

WALMIR DA SILVA MOREIRA

RELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES
FÍSICO-MECÂNICAS E CARACTERÍSTICAS
ANATÔMICAS E QUÍMICAS DA MADEIRA

Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Curso de Ciência
Florestal, para obtenção do título de
“Doctor Scientiae”.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
NOVEMBRO - 1999

WALMIR DA SILVA MOREIRA

RELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES
FÍSICO-MECÂNICAS E CARACTERÍSTICAS
ANATÔMICAS E QUÍMICAS DA MADEIRA

Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Curso de Ciência
Florestal, para obtenção do título de
“Doctor Scientiae”.

APROVADA: 31 de maio de 1999.

Prof. Benedito Rocha Vital
(Conselheiro)

Prof. Eldo Antônio Monteiro da Silva
(Conselheiro)

Prof. Rubens Chaves de Oliveira

Prof. Alexandre Santos Pimenta

Prof. Ricardo Marius Della Lúcia
(Orientador)

A Deus.

Aos meus pais Pedro e Clarice (*in memoriam*).

À minha esposa Ivone.

Aos meus filhos Danilo, Alan e Juliana.

Aos meus irmãos.

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de realizar este curso e pela sua existência.

À Universidade Federal de Mato Grosso e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/PICD), pelo apoio financeiro durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Ricardo Marius Della Lucia, pela orientação, pelo apoio e pela amizade dispensada durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Eldo Antônio Monteiro da Silva, pela inestimável colaboração e pela amizade.

Aos Professores Benedito Rocha Vital, Alexandre Santos Pimenta e Rubens Chaves de Oliveira, pela atenção e pela colaboração.

Aos demais professores, que colaboraram para a minha formação durante o meu treinamento.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Mato Grosso, por terem-me possibilitado o meu afastamento para a realização deste trabalho.

Ao Professor Benedito, pelo auxílio na obtenção de parte do material utilizado neste trabalho.

Aos colegas Juarez, Tarcísio, Ana Paula e Alfredo, pela alegre convivência em um ambiente de constante crescimento pessoal e profissional.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Florestal da UFV, pela acolhida.

Aos funcionários do Laboratório de Tecnologia da Madeira Arnaldo, Evaldo, Fernando Antônio e Jorge Luís, pela colaboração na confecção do material para a realização deste trabalho.

Ao Lucio Gonçalves Coimbra, pela editoração da minha tese, pela agradável convivência e pela amizade.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Walmir da Silva Moreira, filho de Pedro Henedino Moreira e Clarice da Silva Moreira, nasceu em Vargem Grande, Estado do Mato Grosso, em 14 de julho de 1954.

Em 1975, ingressou no Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso, graduando-se em junho de 1978.

Em 1979, foi contratado pela Universidade Federal de Mato Grosso como Professor Auxiliar de Ensino do Departamento de Engenharia Florestal.

A partir de 1982, foi promovido a Professor Assistente e, em 12 de novembro de 1985, recebeu o título de Mestre em Engenharia Florestal, área de Concentração em Tecnologia de Produtos Florestais, pela Universidade Federal do Paraná.

Em 1988, foi promovido a Professor Adjunto e, em 1993, iniciou o Curso de Doutorado em Engenharia Florestal na UFV.

CONTEÚDO

	Página
EXTRATO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Relações entre propriedades físicas e características anatômicas e químicas	4
2.1.1. Densidade e anatomia	4
2.1.2. Densidade e constituintes químicos	11
2.1.3. Contração	13
2.1.4. Relações entre propriedades mecânicas e características anatômicas e químicas	17
2.2. Análise multivariada	20
2.2.1. Análise de agrupamento	21
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. Espécies estudadas	23
3.1.1. Obtenção e preparo do material	23
3.2. Características e propriedades estudadas	24

	Página
3.2.1. Estudos anatômicos	24
3.2.2. Estudos das propriedades físico-mecânicas	27
3.2.3. Estudos das características químicas	28
3.3. Análise dos dados	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. Resultados das determinações das propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas	31
4.2. Variabilidade das madeiras no sentido medula-casca	31
4.3. Agrupamento das espécies	42
4.4. Discriminação entre grupos de espécies	48
4.5. Correlações entre as propriedades	49
4.5.1. Correlações entre as características anatômicas	50
4.5.2. Correlações entre as propriedades mecânicas e as correspondentes anatomia e composição química da madeira	56
4.5.2.1. Resistência à compressão	59
4.5.2.2. Resistência ao cisalhamento no plano radial	62
4.5.2.3. Resistência ao cisalhamento no plano tangencial	66
4.5.2.4. Resistência à flexão estática	69
4.5.2.5. Módulo de elasticidade à flexão	71
4.5.3. Predição dos coeficientes de contração	74
4.5.3.1. Contração radial	74
4.5.3.2. Contração volumétrica	75
4.5.4. Correlações entre a densidade e as demais propriedades da madeira	78
4.5.5. A densidade na predição das propriedades mecânicas da madeira	82
4.5.6. A predição de uma propriedade mecânica a partir de outra .	88
5. RESUMO E CONCLUSÕES	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

EXTRATO

MOREIRA, Walmir da Silva, D.S., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 1999. **Relações entre propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas da madeira.** Orientador: Ricardo Marius Della Lucia. Conselheiros: Benedito Rocha Vital e Eldo Antônio Monteiro da Silva.

O presente trabalho teve como objetivo o estudo das propriedades físico-mecânicas e das características anatômicas e químicas de 23 espécies de madeira. Estudou-se, também, a variabilidade das propriedades e características no sentido medula-casca. Os resultados obtidos indicaram a grande heterogeneidade dessas madeiras no sentido dos raios. Procurou-se com o uso da análise de agrupamento a definição de possíveis grupos, e foi possível destacar a madeira das espécies nativas das exóticas, principalmente quando o agrupamento foi feito com as características anatômicas. Com os dados obtidos, foram feitas correlações entre as propriedades e características estudadas. As propriedades mecânicas apresentaram correlações significativas com várias características anatômicas e químicas, sendo em maior número com as dimensões de fibras e vasos. Procuraram-se ajustar modelos para estimar as propriedades mecânicas com base nas características anatômicas e químicas. Os modelos lineares desenvolvidos indicaram, em inúmeras situações, coeficientes de determinação elevados. Com relação às propriedades físicas, tanto as contrações radial e volumétrica quanto a densidade apresentaram modelos satisfatórios com as características estudadas.

Observou-se que, além das dimensões relacionadas com fibras e vasos, outras características anatômicas, como proporção de células e dimensões de parênquimas axial e radial, foram importantes para o desenvolvimento dos modelos.

ABSTRACT

MOREIRA, Walmir da Silva, D.S. Universidade Federal de Viçosa, November of 1999. **Relationships between physical and mechanical properties, chemical composition and anatomical characteristics of wood.** Adviser: Ricardo Marius Della Lucia. Committee Members: Benedito Rocha Vital and Eldo Antônio Monteiro da Silva.

Twenty three wood species, both exotic and native to Brazil, are described as to their chemical composition, anatomy and some of their physical and mechanical properties. The variability of these properties in the bark-to-pith direction is also reported. The results indicated that all of the species showed some degree of heterogeneity in the radial direction. Cluster analysis can segregate these species in groups; most important is the differentiation between native and exotic species, when anatomical characteristics are used as grouping variables. The correlation between the properties was also studied. Mechanical properties were found to be significantly related to several other variables, specially anatomical characteristics such as fiber and vessel dimensions. Regression models that used anatomical parameters and percentage of chemical components as predictors were developed to estimate mechanical properties; some of the coefficients of determination were very high. Models were also derived to predict physical properties such as specific gravity and shrinkage using information on wood anatomy and chemical composition. Anatomical features other than fiber and vessel dimensions, such as tissue proportions and size of

axial and radial parenchyma, were frequently necessary and added to the models to reduce prediction errors.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é produto de um sistema biológico complexo, apresentando-se como um material altamente variável, tanto em sua estrutura anatômica como em sua composição química. A variabilidade da madeira, que frequentemente acompanha o crescimento da árvore, é ocasionada por fatores como idade, localização geográfica e carga genética. Essas variações são determinantes da grande escala de diferenças nas propriedades físico-mecânicas não só entre as diferentes espécies, mas também dentro de uma mesma espécie e entre partes distintas de uma árvore.

A estrutura anatômica é caracterizada pelo arranjo e pela quantidade proporcional de diferentes tipos de células, como fibras, traqueídeos, vasos, parênquima axial, raios, canais resiníferos e suas dimensões, especialmente a espessura de suas paredes.

Quimicamente, a madeira caracteriza-se por ser um material constituído de compostos de elevados graus de polimerização e pesos moleculares, como a celulose, as hemiceluloses e a lignina. Eles são considerados verdadeiros responsáveis pela morfologia e estrutura da madeira.

O estudo das características anatômicas e químicas e de suas relações com as propriedades físico-mecânicas é muito importante, em termos de aproveitamento e qualidade da madeira das diferentes espécies. Esse estudo pode servir para descrever e prever as propriedades de resistência das espécies, com

base nas estruturas anatômica e química, e ao mesmo tempo obter entendimentos do comportamento da madeira. Em geral, os estudos anatômicos e a caracterização dos constituintes químicos da madeira são desenvolvidos visando apenas à identificação das espécies e à viabilidade para produção de polpa e papel. Contudo, pode-se salientar que poucos trabalhos foram feitos com vistas a relacionar os dados da estrutura anatômica e das características químicas com as propriedades físico-mecânicas.

Esses estudos se revestem de grande importância, tendo em vista a heterogeneidade das espécies que compõem as florestas brasileiras, pois o trabalho para se caracterizar física e mecanicamente essas espécies é muito grande. Em uma escala menor, por exemplo um inventário florestal na Amazônia, podem ser encontradas centenas de espécies, cujas propriedades são desconhecidas. Se o objetivo do inventário for fornecer informações para um estudo de viabilidade econômica de implantação de uma indústria de desdobro mecânico ou para laminação, é conveniente que se tenha estimativa antecipada das propriedades das espécies desconhecidas. O conhecimento prévio dessas propriedades pode auxiliar na seleção de equipamentos, determinando os usos prováveis para as espécies desconhecidas e, conseqüentemente, fornecer subsídios para um planejamento de estudo de mercado para os produtos resultantes.

Os estudos iniciais com vistas a relacionar características e propriedades da madeira foram realizados, utilizando-se, principalmente, a densidade, pela facilidade de sua determinação e por suas excelentes relações com as utilizações da madeira. A densidade é o resultado da combinação das características anatômicas e dos constituintes químicos da madeira. As influências dessas características sobre a densidade são complexas, permanecendo uma série de dúvidas sobre tais relações. Atualmente, há conscientização de que a densidade, sozinha, não reflete a influência das demais características nas propriedades, sendo, dessa maneira, necessária a identificação de outras variáveis, que, juntamente com ela, possam contribuir para a explicação das variações do comportamento e da qualidade da madeira.

O conhecimento e a compreensão relativa da variabilidade e de suas relações têm também grande importância ao fornecerem apoio substancial para

várias áreas da ciência florestal, como o melhoramento e a silvicultura. Assim, por exemplo, no melhoramento esses dados podem simplificar e abreviar os trabalhos, bem como prever e evitar alterações indesejáveis em determinados parâmetros ao se alterar um deles. Essas informações podem ser utilizadas nos esforços de melhorar a qualidade da madeira na floresta (obtenção de matéria-prima mais homogênea e com características desejáveis para sua utilização), através da genética e de práticas silviculturais.

O presente trabalho objetivou verificar as variações das propriedades físico-mecânicas e das características anatômicas e químicas, assim como avaliar a utilização dessas características no desenvolvimento de modelos estatísticos que possam estimar as propriedades físico-mecânicas da madeira de várias espécies.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Relações entre propriedades físicas e características anatômicas e químicas

2.1.1. Densidade e anatomia

A densidade é uma propriedade importante devido à sua relação com várias características da madeira. A sua determinação fornece muitas informações sobre as demais características das madeiras. Trata-se de um parâmetro de qualidade muito utilizado nos diversos setores florestais. Segundo TSOUMIS (1991), a densidade da madeira é uma medida da quantidade de material da parede celular presente em certo volume, e é um índice do volume de espaços vazios. Vários autores têm mencionado que a densidade não pode ser considerada como índice isolado de qualidade da madeira. A estrutura microscópica e a composição química são fatores que devem ser também considerados (WENZEL, 1970; FOELKEL, 1971; BRASIL et al., 1977; FOELKEL et al., 1992; SHIMOYAMA e BARRICHELO, 1991). De acordo com TSOUMIS (1991), a avaliação da influência de tais características é difícil, por isso a relação da densidade com a estrutura da madeira é feita geralmente com base em fatores que podem ser facilmente medidos, como largura dos anéis de crescimento e proporção de lenho tardio.

A densidade pode variar entre gêneros, entre espécies de um mesmo gênero, entre árvores dentro de uma mesma espécie e entre diferentes partes da árvore.

A variabilidade da densidade tem grande importância tecnológica e, por isso, sempre foi objeto de vários estudos. No trabalho de LIMA (1996) pode ser encontrado um sumário recente desses estudos com madeira de *Eucalyptus*. As variações mais importantes são as que ocorrem no sentido medula-casca, associadas, às vezes, com outras, no sentido da altura da árvore. Quando se estuda a variação no sentido medula-casca, podem, freqüentemente, ser encontradas pequenas reduções na densidade da madeira mais recentemente formada, isto é, nas camadas mais próximas à casca (LIMA, 1996).

Assim, é freqüente observar variações da densidade na direção medula-casca. PANSHIN e DE ZEEUW (1980) propuseram três modelos: 1) aumento da densidade da medula para a casca; 2) densidade alta próximo à medula, mas decrescendo nos primeiros anos e, a seguir, aumentando em direção à casca; e 3) decréscimo da medula até a casca.

Na direção radial, a madeira que apresenta anéis de crescimento é heterogênea em suas propriedades, em razão da presença de lenho inicial e de lenho tardio. O lenho tardio se caracteriza pelas células com paredes espessas e por sua densidade, que é mais elevada que a do lenho inicial. Tanto as coníferas como grande parte das folhosas apresentam, na zona inicial da madeira de verão (lenho tardio), densidade duas vezes maior que na madeira de primavera (lenho inicial). Nas folhosas com porosidade difusa, entretanto, a diferença não é tão grande. A largura dos anéis da madeira com porosidade difusa não tem relação marcante com a densidade (Dupont, 1983, citado por GONÇALEZ, 1993). Nas folhosas com porosidade em anel, a densidade da madeira aumenta com a largura dos anéis de crescimento, pois a proporção da área ocupada pelos vasos em relação à área total do anel diminui. Keller (1987) e Polge e Keller (1973), citados por GONÇALEZ (1993), observaram que, quando espécies de carvalho tiveram seu crescimento acelerado, ocorreu aumento na largura do lenho inicial, provocando incremento na densidade e na coloração da madeira.

Variações ocorrem também ao longo do tronco da árvore. Alguns padrões são descritos: decresce com o aumento em altura, pode diminuir na parte

da tora mais baixa e aumentar na parte mais alta ou, ainda, pode aumentar a partir da base para o topo de maneira não-uniforme. Podem-se mencionar também as variações que ocorrem na densidade em razão de tendências hereditárias, de influências fisiológicas e mecânicas, bem como de fatores do ambiente (solo, calor, precipitação e ventos), que afetam a estrutura da madeira e, assim, sua densidade. O crescimento da árvore é afetado não só pelo local em que cresce, mas também pela idade. Diferentes posições de amostragem no tronco da árvore e a diferença de lenhos tardio e inicial também podem causar variações consideráveis na densidade da madeira (KOLLMANN e CÔTE, 1968).

Essas variações podem ser atribuídas às diferenças na estrutura anatômica (diferentes espessuras da parede celular, das dimensões das células e das inter-relações entre esses dois fatores) e à presença de extrativos (PANSHIN e DE ZEEUW, 1980).

Os fatores silviculturais podem também influenciar a densidade básica da madeira. FERRAND (1982) observou que, em espécies de faia (*Fagus spp.*), a densidade básica é mais elevada nas árvores oriundas de povoamentos nativos do que nas de reflorestamento.

O interior de um tronco não é uma massa homogênea, ele apresenta variações em função da presença de alburno, de cerne e de madeira juvenil. Assim, amostras obtidas em diferentes locais do tronco podem apresentar diferenças consideráveis em muitas das propriedades das madeiras. Segundo Owoundi (1988), citado por GONÇALEZ (1993), em algumas espécies de folhosas a largura do anel, assim como a densidade básica, diminui do centro em direção à casca. Juini (1977), também citado por GONÇALEZ (1993), observou que, em espécies de carvalho, a densidade básica é mais elevada no centro (próximo à medula), diminuindo, de maneira progressiva, em direção à casca.

Segundo Polge e Keller, citados por GONÇALEZ (1993), a diminuição da largura do anel e da densidade básica do centro em direção à casca é devida ao envelhecimento do câmbio. Owoundi (1988), citado por GONÇALEZ (1993), acrescentou o fenômeno da cernificação da madeira como fator importante para explicar a diminuição da densidade básica do centro em direção à casca.

O lenho das árvores é constituído de diferentes tipos de células. As folhosas possuem estrutura mais complexa que as coníferas, contendo maior

número de tipos celulares. Dentro do grupo das folhosas, a variação em termos de tipos celulares e arranjos é também maior. As principais células que formam a madeira das folhosas são: as fibras libriformes e os fibrotraqueídeos, responsáveis pela resistência mecânica; e os elementos de vaso, responsáveis pelo transporte de água e nutrientes; e as células parenquimáticas, que constituem os tecidos, tanto axial quanto radial, responsáveis pelo armazenamento e pela condução de nutrientes naquelas direções. Esses elementos anatômicos são formados pela diferenciação das iniciais cambiais ou iniciais fusiformes, que originam as células dispostas no sentido longitudinal (traqueóides, fibras, vaso e parênquima axial) e as iniciais radiais, que originam as células que se colocam no sentido radial (raios). O processo de desenvolvimento tem cinco etapas: 1) divisão celular, 2) diferenciação, 3) crescimento em área, 4) espessamento da parede e 5) lignificação.

Essas etapas de desenvolvimento caracterizam o comprimento, a espessura da parede, a largura e o diâmetro das células (Wardrop, 1964, citado por MOREY, 1981). O comprimento das fibras, dos vasos e das células de parênquima axial é diretamente influenciado pelas divisões das iniciais fusiformes no câmbio. A fibra madura é, no máximo, cinco vezes mais longa do que a inicial fusiforme da qual se originou. Já os traqueídeos mostram somente pequeno aumento de 20 a 30% em comprimento em relação às suas iniciais. A causa do alongamento extensivo da fibra durante a diferenciação poderá ser encontrada na interação do potencial genético da célula em diferenciação com a seqüência de mudanças ambientais, principalmente fisiológicas, encontradas nas proximidades do câmbio (MOREY, 1981).

O comprimento das células varia grandemente dentro da árvore e entre árvores. Essa característica pode ser controlada geneticamente e alterada por mudanças de crescimento através de práticas silviculturais (Wheeler et al., 1965, e Bannan 1967, citados por ZOBEL e BUJTENEN, 1989).

De acordo com PANSWIN e DE ZEEUW (1980) e TSOUMIS (1991), a variação do comprimento das células reflete duas fases. Há uma fase inicial, nas proximidades da medula, que é conhecida como período juvenil. Nesta fase, notam-se um rápido aumento no comprimento da célula e mudanças fundamentais na composição da parede da célula, associadas com o período de

maturação cambial. A segunda fase reflete o período de funcionamento mais ou menos estabilizado (estável) do câmbio maduro. Os referidos autores mencionaram também que o câmbio maduro produz células, cujo comprimento nos anéis de crescimento adjacentes pode variar intensamente. As tendências de alteração do comprimento das células nos anéis de crescimento adjacentes e produzidos por câmbio maduro podem ser classificadas em três tipos:

- aumento, seguido de estabilização do comprimento da célula;
- aumento contínuo do comprimento da célula a partir da medula em direção à casca; e
- variação de formato parabólico, indicando aumento do comprimento da célula até um máximo, seguido de decréscimo.

Esta dimensão é também influenciada pela idade da árvore da seguinte forma: com o aumento da idade, as células cambiais passam a produzir os elementos com maiores dimensões ao longo do raio até atingir a estabilização em idades mais avançadas (TOMAZELLO FILHO, 1985a); assim, há aumento no comprimento das fibras no sentido medula-casca (WILKES, 1988; ANDRADE, 1987).

Alguns autores, estudando as relações entre densidade básica e comprimento de traqueídeos, têm verificado que essas características são independentes. Já outros (KOCH, 1972; WAHLGREEN e SCHUMANN, 1972; KIBBLEWRITE e LLOYD, 1983), que estudaram coníferas e folhosas, afirmaram que, com o aumento do comprimento das fibras ou traqueídeos, há correspondente aumento na densidade da madeira. As informações são controversas, mesmo quando se trata do mesmo gênero. Assim, na madeira de *Eucalyptus deglupta*, DAVIDSON (1972) encontrou correlação positiva entre comprimento de fibra e densidade, enquanto DIAS e CLÁUDIO-DA-SILVA JR. (1985) verificaram que não há relação entre os dois parâmetros em *E. grandis*. SHIMOYAMA (1990), estudando variações de densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*, encontrou um coeficiente de correlação igual a 0,584 entre densidade e comprimento de fibra.

A espessura da parede das fibras é uma característica que está relacionada a fatores genéticos e ambientais e com a idade da árvore. Essa dimensão das fibras está intimamente relacionada com a densidade da madeira. Suas variações dentro das árvores são similares ao padrão de variação da densidade (MALAN, 1995). PANSIN e DE ZEEUW (1980) citaram que estudos sobre *Fraxinus pennsylvanica*, em híbridos de *Populus*, e sobre *Eucalyptus pilularis* evidenciaram que a espessura da parede das fibras da madeira de folhosas tende a aumentar da medula para a casca, de maneira semelhante àquela mostrada nas curvas para variação do comprimento da fibra. TOMAZELLO FILHO (1985a, b), estudando madeira de *E. saligna*, *E. grandis*, *E. gummifera*, *E. microcorys* e *E. pilularis*, verificou que a espessura da parede das fibras tende a aumentar no sentido medula-casca.

Relações positivas entre densidade e espessura de parede dos traqueídeos e fibras em estudos com madeira de coníferas e folhosas foram verificadas por vários autores: ZOBEL (1961), BUIJTENEN (1964), SCARAMUZZI (1965), GODDARD e COLE (1966), DAVIDSON (1972), PALMER e GIBBS (1973), KELLOG e GONZALEZ (1976), MAEGLIN (1976), KIBBLEWRITE e LLOYD (1983), NICHOLLS (1984) e FUJIWARA et al. (1991). No Brasil, BARRICHELO e BRITO (1976), BARRICHELO (1979) e DIAS e CLÁUDIO-DASILVA JR. (1985), ao estudarem a madeira de espécies de *Eucalyptus*, concluíram que a densidade básica pode dar indicações da espessura da parede das fibras. SHIMOYAMA (1990), estudando a madeira das espécies *E. saligna*, *E. grandis* e *E. urophylla*, encontrou um coeficiente de correlação entre densidade básica e espessura da parede das fibras igual a 0,60.

A largura das células é uma dimensão que está relacionada, além de com fatores genéticos e ambientais, com o crescimento sazonal. Os maiores aumentos são verificados durante as estações de primavera e de verão, quando a árvore produz maior quantidade de hormônios. TOMAZELLO FILHO (1985a, b), estudando a madeira de *E. grandis*, *E. saligna*, *E. gummifera*, *E. microcorys* e *E. pilularis*, verificou que a largura das fibras tende a aumentar no sentido medula-casca. A largura das fibras é uma característica que deixa dúvida quanto à sua relação com a densidade básica. Se as fibras apresentarem diâmetros grandes e paredes espessas, serão observadas correlações positivas entre ambos. Porém, se

as fibras são largas e de paredes finas, o resultado será inverso (SHIMOYAMA, 1990).

Nas coníferas, os trabalhos têm evidenciado que há correlação positiva entre essas duas características (ZOBEL, 1961; BUIJTENEN, 1964; WAHLGREEN e SCHUMANN, 1972; KIBBLEWRITE e LLOYD, 1983). FUJIWARA et al. (1991) encontraram correlação positiva ($r = 0,6693$), estudando madeira de 50 espécies de folhosas japonesas, enquanto SHIMOYAMA (1990), estudando *E. saligna*, encontrou correlação positiva ($r = 0,6101$), mas em *E. grandis* ($r = -0,621$), a correlação encontrada foi negativa.

O diâmetro do lúmen depende da largura e da espessura da parede das fibras. Quanto maior o seu valor, mais espaços vazios serão encontrados na madeira e, como consequência, esta apresentará menor densidade básica. DIAS e CLÁUDIO-DA-SILVA JR. (1985), estudando *E. grandis*, encontraram correlação positiva ($r = 0,50$) entre diâmetro do lúmen e densidade. Já SHIMOYAMA (1990) encontrou correlação negativa entre essas duas características ($r = -0,5881$) na mesma espécie.

Os vasos são elementos anatômicos que desempenham a função de condução na árvore, muito variados quanto a frequência, forma e arranjo. No que diz respeito às suas variações no sentido radial, PANSHIN e DE ZEEUW (1980) mencionaram que o comprimento dos elementos de vaso aumenta em anéis sucessivos de crescimento da medula até a casca. Isso foi comprovado em estudos realizados em *Liriodendron tulipifera* L., em cujo caso os elementos de vasos aumentam moderadamente. Quando esses comprimentos são lançados em gráfico, eles formam uma curva, indicando variação semelhante àquela para as mudanças de comprimento das fibras da madeira de folhosa. Esses autores mencionaram também que, de acordo com o número reduzido de estudos que têm sido publicados, os elementos de vaso aumentam em diâmetro, da medula para a casca. TOMAZELLO FILHO (1985a, b) verificou aumento no diâmetro dos vasos e diminuição no seu número por mm^2 , nas madeiras de *E. saligna* e *E. grandis*. WILKES (1988) mostrou em seu trabalho essa mesma tendência. MALAN (1998), estudando a madeira de *Eucalyptus grandis*, encontrou os seguintes coeficientes de correlação entre densidade e características anatômicas:

diâmetro de vasos ($r = -0,33$), frequência de vasos ($r = 0,28$) e proporção de vasos ($r = -0,22$).

Quanto maior o diâmetro e o número de vasos, maior área de espaços vazios será encontrada na madeira. Dessa forma, geralmente suas correlações com a densidade básica, quando encontradas, mostram-se negativas (DAVIDSON, 1972).

2.1.2. Densidade e constituintes químicos

A madeira é composta principalmente de celulose, hemiceluloses e lignina, que constituem a parede celular e são denominados componentes fundamentais. Em adição a esses componentes, encontram-se outras substâncias em quantidades variáveis, denominadas componentes acidentais, que são os extrativos e os compostos minerais. Os últimos são responsáveis, principalmente, pelas cinzas da madeira.

De acordo com FOELKEL (1977), as quantidades relativas desses componentes são as seguintes:

Componente	%
Celulose	40-45
Hemiceluloses	20-30
Lignina	18-25 folhosas 25-35 conífera
Extrativos	3-8

Esses componentes químicos podem ser agrupados em três tipos principais:

- a) Substâncias que formam o esqueleto da madeira; são substâncias rígidas, que se constituem em longas cadeias de polissacarídios.

Celulose é um polissacarídeo linear, de comprimento de cadeia suficiente para ser insolúvel em água e álcali diluído à temperatura ambiente, composto somente de unidades de anidro glucose unidas por ligação ***b***-1-4 e possuindo estrutura bem organizada.

b) Substâncias que formam uma matriz que envolve o esqueleto de celulose.

Hemicelulose, os outros polissacarídeos da madeira, são polímeros de baixo peso molecular, fortemente associados à celulose nos tecidos da planta. São polímeros geralmente amorfos, constituídos de uma cadeia central de unidades representativas, mais as cadeias laterais.

Lignina - polímero de natureza aromática, composto por unidades fenil propanóides, possuindo cadeia altamente ramificada.

Compostos acidentais: são os chamados extrativos, compostos de baixo peso molecular, de vários tipos, que podem ser extraídos da madeira por meio de água e solventes orgânicos, muitos dos quais aproveitados pela indústria. Localizam-se no lúmen, nas paredes celulares e nas células de parênquima.

O teor de extrativos e sua composição variam entre as diferentes espécies de árvores e dentro delas. Frequentemente, eles ocorrem em maiores concentrações em outras partes da árvore e em outros tecidos da planta do que propriamente na madeira (SJÖSTROM, 1993).

A distribuição de extrativos dentro da mesma árvore não é homogênea. Açúcares e outros constituintes solúveis na seiva e materiais de reserva, como amido e gorduras, são encontrados no alburno; materiais fenólicos são usualmente depositados no cerne. Existem também variações nas quantidades de materiais depositados entre as diferentes alturas da árvore, bem como entre o tronco e os galhos (HILLIS, 1962).

Esta variação é causada por vários fatores, como diferenças genéticas, variação sazonal, local de crescimento, posição da amostra na árvore e idade da árvore. O conhecimento da localização precisa dos extrativos nos tecidos (quimiomorfologia) pode fornecer informação útil com respeito à qualidade da

madeira (Krahmer et al., 1970, citados por HILLIS, 1971) e à resistência à deterioração biológica (Shain, 1967, citado por HILLIS, 1971).

Os extrativos estão presentes em maiores quantidades no cerne do que no alburno, e as mudanças no conteúdo podem ser muito abruptas na periferia do cerne. Os extrativos são encontrados quase sempre no parênquima, mas podem aparecer também nos vasos e nas fibras e, em alguns casos, em células especializadas. Grandes quantidades de extrativos polifenólicos podem estar presentes no cerne de algumas espécies (30-40% em eucalipto) (Dadswell e Hillis, 1962, citados por HILLIS, 1971).

A relação entre o teor de extrativos e a densidade da madeira tem sido abordada em alguns estudos. TAYLOR (1969) observou que, quando se faz a remoção dos extrativos, a densidade da madeira diminui. McMILLIN (1968), estudando *Pinus taeda*, encontrou correlação positiva entre os teores de extrativos e a densidade básica. JANKOWSKI (1979), estudando madeiras de algumas folhosas tropicais, e CHAFE (1994), pesquisando *Eucalyptus* e outras espécies, observaram que os extrativos contribuem para aumentar os valores da densidade da madeira. Assim, vários autores, além dos já citados, encontraram correlações positivas entre densidade e teor de extrativos (KOCH, 1972; WAHLGREEN e SCHUMANN, 1972; BARRICHELO e BRITO, 1977; ZOBEL, 1981; GONÇALEZ, 1993). Já outros não observaram correlações significativas entre essas duas variáveis (Foelkel et al., 1980, e Foelkel et al., 1983, citados por SHIMOYAMA, 1990; DIAS e CLÁUDIO-DA-SILVA JR., 1985; SANTOS, 1992; SHIMOYAMA, 1990; Vermaas, 1970, citado por GONÇALEZ, 1993).

2.1.3. Contração

Quando a madeira recém-obtida de uma árvore é exposta à atmosfera, ela perde umidade até que seja alcançado certo teor de água, cuja pressão de vapor esteja em equilíbrio com a da umidade atmosférica. Com a perda de água, e abaixo de certo teor, a madeira sofre contração. O efeito de contração gera um movimento da parede celular, o que ocorre entre a chamada umidade de saturação das fibras e aproximadamente 0% de umidade. Isso significa que as variações dimensionais correspondem à sorção da água higroscópica localizada nas paredes

celulares. A magnitude dessa variação depende da direção estrutural (tangencial, radial e longitudinal) considerada. Naturalmente, também ocorre contração volumétrica (SALLENAVE, 1964).

As contrações ocorrem mais intensamente no sentido transversal das fibras. A camada S2 é mais espessa e a mais rica em celulose, sendo a principal responsável pela contração nesse sentido. No sentido tangencial, a contração é, em geral, de 1,5 a 2 vezes mais intensa que no sentido radial. A contração tangencial atinge, em média, valores compreendidos entre 2 e 7%. É essa diferença entre a contração tangencial e a radial que, freqüentemente, explica as deformações da madeira que ocorrem durante a secagem (SALLENAVE, 1964).

KEISEY (1963) e SKAAR (1972) procuraram explicar, em termos da estrutura anatômica da madeira, a causa da anisotropia da madeira. Segundo eles, são os principais responsáveis por esse comportamento da madeira, no nível microscópico, a largura dos anéis, a proporção de lenho inicial e tardio, a orientação das fibras (grã) e os raios. Em nível submicroscópico, a inclinação das microfibrilas é a principal responsável.

MASSERAN e MARIAUX (1985) concluíram que as dimensões transversais das fibras são os principais fatores que geram as variações dimensionais que caracterizam a anisotropia de contração. Eles verificaram a existência de uma diferença química entre as paredes tangenciais e radiais. Essa diferença explicaria, assim, o fato de que as fibras não constituem um tecido isotrópico no plano transversal. Segundo a teoria de Barber e Meylan (1964) e de Harris e Meylan (1965), citados por GONÇALEZ (1993), a parede celular pode ser considerada, do ponto de vista higroscópico, matriz amorfa isotrópica reforçada por uma carcaça constituída de microfibrilas de celulose cristalina. Em presença de água, o inchamento da matriz seria uniforme se as microfibrilas se contraíssem no mesmo sentido, cujo comprimento é suposto invariável. A orientação quase paralela ao sentido longitudinal das microfibrilas na camada S2 da parede celular explicaria, assim, a anisotropia entre as contrações transversal e longitudinal.

A contração varia em relação à posição na árvore. Na madeira juvenil, a contração é maior próximo à medula e diminui rapidamente no sentido medula-casca, durante a fase de crescimento juvenil. Essa variação está relacionada com

a redução do ângulo microfibrilar na parede celular, com o aumento do comprimento da célula e com o aumento no teor de celulose. Na madeira madura normal, tanto de coníferas como de folhosas, as contrações transversais e volumétricas estão diretamente relacionadas com a densidade, com o comprimento das fibras, com o ângulo microfibrilar das paredes celulares e com o teor de extrativos presentes no cerne; entretanto, o cerne que contém maior teor de extrativos contrai menos que o alburno. A redução da contração ocorre quando moléculas de extrativos bastante pequenas penetram nos espaços internos na parede celular e ocupam os sítios até então disponíveis para adsorção de água (PANSWIN e DE ZEEUW, 1980).

Castera (1983) e Albert (1987), citados por GONÇALEZ (1993), estudando madeira de carvalho vermelho, encontraram evidências de correlações positivas entre a largura do anel de crescimento e diferentes contrações. Nas madeiras de folhosas que apresentam raios largos e nas coníferas, os raios assumem papel importante nas contrações e na anisotropia. SKAAR (1988) citou vários autores que mostraram que a contração radial dos raios isolados em certas espécies é pequena e que, com o aumento da porcentagem dos raios, ocorre redução na contração radial. KELLER e THIERCELIN (1975), estudando blocos de madeira de faia (*Fagus* spp.), constataram que a contração radial relacionou-se, de maneira inversa, com o número de raios/mm. ZHANG (1990) observou que a contração volumétrica depende dos diferentes tecidos anatômicos da matéria lenhosa. Por ordem de importância, a porcentagem de fibras ocupa o primeiro lugar, seguida pela proporção do parênquima axial e dos vasos.

Em uma síntese bibliográfica, Owouni (1992), citado por GONÇALEZ (1993), conclui que a largura do anel não é suficiente para explicar a variabilidade da densidade e da contração. Uma melhor explicação da grande variação que caracteriza essas propriedades deve ser pesquisada, tanto na estrutura anatômica quanto no crescimento anual e em suas mudanças sob o efeito das intervenções silviculturais.

Segundo TSOUMIS (1991), a estrutura anatômica é a principal responsável para a contração e o inchamento anisotrópico. A diferença de contração, ou o inchamento nas diferentes direções de crescimento, é atribuída, principalmente, à estrutura da parede celular e, em parte, à presença dos raios,

que dificultam a variação no sentido radial. Grande teor de extrativos contribuem para redução da contração e do inchamento. A redução é proporcional ao espaço ocupado pelos extrativos, nas paredes das células. A remoção dos extrativos aumenta a contração e o inchamento. A influência dos componentes da parede celular é pequena, porque não existem grandes diferenças entre as espécies de madeiras, com respeito ao teor de celulose. Entretanto, a lignina parece exercer efeito controlador de contração e inchamento, semelhante ao dos extrativos. Ela pode contribuir para aumentar a contração em madeiras de alta densidade, porque tem sido observado que o teor de lignina diminui com o aumento da densidade. As madeiras de folhosas contraem mais que as de coníferas de densidade semelhante, e isso é atribuído ao seu menor teor de lignina (TSOUMIS, 1991).

De acordo com CHOONG (1969), a lignina e os extrativos se incrustam em torno das fibrilas de celulose, diminuindo fortemente os espaços disponíveis para a água, pois elevado teor de moléculas fenólicas diminui a amplitude de contração da madeira. Ele conseguiu melhorar consideravelmente a relação densidade-contração da madeira de *Pinus*, após extrações com água quente e com solventes orgânicos. O valor do coeficiente de correlação da relação contração-densidade estava em torno de 0,20 antes da extração e passou para 0,59 após a extração.

NEARN (1955) notou que espécies que apresentam um teor de extrativos mais elevado são mais estáveis dimensionalmente. KOLLMANN e CÔTE (1968) citaram vários trabalhos explicando os aspectos importantes da relação contração-densidade, nos quais está bem clara a importância da presença de elevados teores de extrativos hidrossolúveis para qualquer madeira

GONÇALEZ (1993), estudando as espécies fava-amargosa (*Vataeropsis speciosa*), jequitibá-rosa (*Cariniana micrantha*), peroba-d'água (*Rauwolfia paraensis*) e peroba-mica (*Aspidosperma macrocarpum*), encontrou as seguintes correlações entre características anatômicas e químicas e propriedades físicas: correlações positivas com comprimento de fibra com contração tangencial, contração volumétrica com coeficiente de anisotropia (T/R), diâmetro do lúmen da fibra com contração tangencial e com contração volumétrica e largura e altura de raios com coeficiente de anisotropia (T/R). Correlações negativas foram encontradas entre número de raios/mm com coeficiente de anisotropia (T/R); teor

de extrativos (álcool/benzeno) com contração volumétrica, contração radial e contração tangencial; teor de extrativos (NaOH -1%) com contração radial e contração tangencial; e teor de lignina com coeficiente de contração volumétrica.

2.1.4. Relações entre propriedades mecânicas e características anatômicas e químicas

A identificação anatômica e a composição química são pontos importantes para caracterizar uma espécie de madeira. Porém, o conhecimento das propriedades mecânicas constitui um dos fundamentos básicos para determinação dos possíveis usos que se podem destinar determinada madeira. De fato, HUMPHREYS e CHIMELO (1990) chegaram à conclusão de que propriedades mecânicas são interessantes para o agrupamento de espécies, por estarem diretamente ligadas com o uso da madeira.

As propriedades mecânicas de uma espécie variam de acordo com a procedência da árvore, variando também entre árvores, com locais dentro de uma mesma árvore, especialmente no sentido centro-periferia e em relação à altura. Além desses aspectos, a estrutura anatômica, com diferentes tipos, número, arranjo e qualidade de células, influencia grandemente as propriedades mecânicas da madeira.

De acordo com PANSHIN e DE ZEEUW (1980), a variabilidade da maior parte das propriedades mecânicas e elásticas da madeira pode ser estimada com base na variação da densidade. Eles mencionaram também que as relações entre densidade e propriedades mecânicas podem ser obscurecidas pela presença de extrativos que se adicionam à massa lenhosa, aumentando, principalmente, a resistência à compressão axial da madeira. A densidade pode ser usada como indicador da variação da resistência mecânica da madeira dentro dos anéis de crescimento. Existem poucos estudos que relacionam características anatômicas com propriedades de resistência mecânica.

Schniewind (1962), citado por CHIMELO (1980), mencionou a existência de três razões importantes para o estudo da relação entre estrutura anatômica e propriedades mecânicas, são elas:

1. Correlações entre as características anatômica macroscópicas e propriedades mecânicas podem ser estabelecidas, as quais podem também servir para estimar, visualmente, as características de resistência de uma peça de madeira.
2. Tais relações levam a um maior entendimento do comportamento mecânico da madeira.
3. As características morfológicas, que determinam a resistência da madeira, devem ser conhecidas de maneira precisa, se se deseja desenvolver um mecanismo mais eficiente de melhoramento genético de árvores, quando o objetivo é obter melhor comportamento mecânico.

A efetiva resistência da madeira a algum esforço é função não só da quantidade total da parede celular, mas, também, da proporção dos componentes das células estabelecidas em dada espécie e da quantidade de extrativos presentes no lúmen das células (PANSWIN e DE ZEEUW, 1980). Por exemplo, segundo NORMAN (1972), a espessura definitiva da parede das fibras ocasiona somente uma dureza mais ou menos elevada de uma madeira, sem afetar, de maneira marcante, a sua densidade. Keller e Thiercelin (1975), citados por GONÇALEZ (1993), estudando madeira de faia (*Fagus spp.*), notaram que os raios são fatores que influenciam a resistência. Segundo Meyer (1930), citado por GONÇALEZ (1993), a proporção de raios tem ligação com a dureza e com a resistência em compressões axial e transversal da madeira. KENNEDY (1968) testou nove espécies em compressão transversal e teor de umidade de 4,0 a 5,5%, para determinar a variação da tensão no limite de proporcionalidade e no módulo de elasticidade. Esses testes foram realizados em amostras com diferentes orientações dos anéis, do volume de raios e da porcentagem de lenho tardio. Ele observou que, dentro de uma espécie, amostras carregadas radialmente (carga aplicada na face tangencial) foram mais resistentes que aquelas carregadas tangencialmente. A razão entre as resistências das amostras avaliadas radial e tangencialmente aumentou com a elevação do volume dos raios e decresceu com o aumento na porcentagem de lenho tardio. BODIG (1963), estudando várias propriedades mecânicas de Douglas-fir (*Pseudotsuga taxifolia*), observou que a

resistência à compressão na direção radial foi diferente nas camadas de lenho inicial e tardio com distintas densidades, alegando que isso ocasionaria diferença na resistência à direção radial para coníferas e folhosas com porosidade em anel. Schniewind (1959) e Price (1928), citados por CHIMELO (1980), mostraram, com base na teoria da elasticidade, que um módulo de elasticidade mais alto deve ser encontrado mais no sentido radial do que no tangencial, diferença essa ocasionada pela estrutura em anel, isto é, pelas camadas alternadas de lenho inicial e tardio. CHIMELO (1980) citou também que McIntosh (1955) calculou a razão entre os módulos de elasticidade do parênquima axial e do tecido de raios, obtendo os valores de 0,181 para carvalho-vermelho (*Quercus* sp.) e 0,124 para faia (*Fagus* sp.), o que indicou rigidez mais elevada dos raios em comparação com a do parênquima axial. BODIG (1965) estudou duas espécies de coníferas e duas de folhosas, com a intenção de verificar as relações entre tensão e deformação em compressão transversal e a estrutura anatômica. Ele concluiu que, no sentido tangencial, as amostras ofereceram resistência menor em relação à radial. Observou também que as células de vasos deformaram mais que o agregado de células de raios, evidenciando, assim, a resistência relativa das células dos raios. Berry (1979), citado por CHIMELO (1980), observou que os valores de resistência, de rigidez e de tensão no limite de proporcionalidade foram maiores no carregamento radial que no tangencial. Ele observou, também, que espécies com porosidade em anel apresentam valores maiores ou iguais no sentido tangencial, em comparação com o radial, enquanto espécies com porosidade difusa, exceto faia (*Fagus* sp.), apresentam valores maiores no sentido radial. Todas as espécies com porosidade difusa foram mais resistentes que as espécies com porosidade em anel. O referido autor atribuiu essa diferença aos vasos de grande calibre do lenho inicial, os quais formam uma camada de menor resistência; forte interação entre tipo de anel e tamanho de raio foi estabelecida. Em espécies com porosidade difusa, os raios estão associados com fibras de paredes espessas tanto no lenho inicial quanto no tardio; já nas madeiras com porosidade em anel, os raios estão nas proximidades dos vasos largos (diâmetro grande), no lenho inicial, criando, assim, uma segunda zona de menor resistência. Os valores de módulo de elasticidade e tensão no limite de proporcionalidade são similares nos diferentes sentidos, mas pôde ser observado que espécies com raios

largos apresentaram valores maiores que aquelas com raios estreitos (pequenos). Ficou evidente também que a maioria das espécies com raios estreitos apresentaram valores de deformações mais elevados que as espécies com raios largos.

Clarke (1939), citado por KOLLMANN e CÔTE (1968), comprovou que madeiras tropicais com alto teor de lignina apresentam resistência à compressão axial mais alta e mais baixa resistência ao choque, quando comparadas com espécies que crescem em zonas temperadas. Trendelenberg (1939), também citado por KOLLMANN e CÔTE (1968), avaliando dados de vários pesquisadores, constatou que o fator de qualidade $\sigma_{cb}/100r$, o quociente entre resistência à compressão paralela às fibras e a densidade da madeira, mesmo apresentando grande dispersão, cresceu de uma linear com o aumento no teor de lignina.

2.2. Análise multivariada

Normalmente, quando se trabalha com grande número de variáveis, a estatística convencional, ou univariada, passa a não ser suficiente para esclarecer todos os problemas, impossibilitando melhor análise dos dados. Nesse caso, ganha importância a análise multivariada, que é um ramo da matemática que examina numerosas variáveis, simultaneamente, revelando suas estruturas, avaliando redundâncias, elucidando inter-relações e identificando indivíduos; descrevendo comunidades, ou outros tipos de dados, incluindo dados ambientais e históricos; e facilitando o entendimento de ambientes naturais complexos, a partir da elaboração de melhores modelos de comunidades (MARRIOT, 1974).

As técnicas de análise multivariada podem ser distinguidas em: a) análise de dependência, quando se estuda a dependência de uma ou mais variáveis em relação às outras (ex.: análises de regressão e de variância multivariada); e b) análise de interdependência, quando se estudam as relações de um conjunto de variáveis entre si, sem selecionar nenhuma delas (ex. análise de componentes principais e análise de agrupamento).

A análise multivariada presta-se, basicamente, para:

- formar grupos de indivíduos: análise de agrupamento;
- comparar grupos de indivíduos: análise de variância (Anova) ou análise de regressão;
- classificar indivíduos em grupos conhecidos: análise discriminante;
- relacionar grupos de variáveis: correlações canônicas;
- reduzir dimensões de conjunto de variáveis: análise de componentes principais; e
- decompor conjunto de variáveis: análise de fatores.

FINNEY (1956) classificou as técnicas multivariadas da seguinte forma:

- técnicas de avaliação da interdependência: componentes principais, correlação canônica, análise de agrupamento e análise de fatores; e
- técnica de avaliação de dependência: regressão, relação funcional, múltipla contingência e análise discriminante.

2.2.1. Análise de agrupamento

A análise de agrupamento é uma técnica multivariada que tem por finalidade proporcionar uma ou várias partições da massa de dados em grupos, por algum critério de classificação, de tal forma que exista homogeneidade dentro de grupos e heterogeneidade entre grupos (Sneath e Sokal, 1973; Mardia et al., 1979, citados por FERREIRA e SOUZA, 1997). Essa técnica constitui um procedimento que procura grupos hierárquicos, ascendentes e excludentes, conduzindo finalmente à elaboração de um dendrograma ou uma tabela. Com sua utilização, pode-se obter um sumário dos dados, reduzindo as informações de um conjunto de n indivíduos para informações sobre um novo conjunto de g grupos, em que g é significativamente menor que n , o que possibilita a simplificação na interpretação dos resultados (FERREIRA e SOUZA (1997).

De acordo com SOUZA et al. (1997), as técnicas de agrupamento podem ser utilizadas com os seguintes objetivos: a) reduzir uma grande massa de dados

em grupos, de forma a permitir a sua análise; b) facilitar a descrição dos dados; c) permitir a predição baseada em grupos; d) formular hipóteses sobre a estrutura de dados; e e) servir como técnica alternativa à análise estatística clássica.

Os métodos de agrupamento podem ser classificados em hierárquicos e não-hierárquicos. Nos métodos hierárquicos, os indivíduos são reunidos em grupos, e o processo repete-se em diferentes níveis, até formar uma árvore de classificação. Podem ser: aglomerativos, nos quais, por meio de fusões sucessivas dos n objetos, vão sendo obtidos $n-1$, $n-2$ etc. grupos, até reunir todos os objetos num único grupo; e divisivos, que partem de um único grupo e, por divisões sucessivas, vão sendo obtidos 2,3 etc. grupos. Os métodos não-hierárquicos são usados para agrupar unidades de dados dentro de uma classificação simples de k grupos, em que k é especificado “a priori”, ou é determinado como parte do método de agrupamento (Van Laar, 1987, e Bussab et al., 1990, citados por FERREIRA e SOUZA, 1997).

Para obter os agrupamentos, devem-se estimar uma medida de similaridade ou dissimilaridade entre os indivíduos a serem agrupados e, depois, adotar uma técnica de agrupamento para formação dos grupos.

De acordo com GAMA (1980), os algoritmos utilizados para tal finalidade baseiam-se na quantificação da distância entre agrupamentos, destacando-se: método de Ward (variância mínima), método de ligação simples, método de ligação completa, método da centróide e método da mediana. Na literatura são encontradas várias medidas de similaridade ou dissimilaridade. Como exemplo de medidas de similaridade, podem-se citar os coeficientes de comunidade de Jaccard e de Sorensen, a distância binária de Sokal e o coeficiente de correlação; como medida de dissimilaridade, a distância euclidiana, a distância absoluta e a distância D^2 de Mahalanobis, dentre outras.

A escolha da utilização de determinada medida de similaridade ou dissimilaridade tem sido feita em função das unidades amostrais avaliadas, da precisão das estimativas e da facilidade de computação dos dados (CRUZ, 1990).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Espécies estudadas

Para realização deste estudo foram utilizadas madeiras das seguintes espécies: folhosas tropicais: angelim (*Andira* sp.), pinho-cuiabano (*Schyzolobium amazonicum* Duke), mogno (*Swietenia macrophylla* King.), cerejeira (*Torresia acreana* Ducke), farinha-seca (*Pithecelobium* sp.), morcegueira (*Trattinickia burserifolia* (Mart.) Willd; espécies de cerrado: cambará-rugoso (*Vochysia divergens*), cambará-liso (*Vochysia haenkiana* Mart.), cedro (*Cedrela fissilis* Vell), lixeira (*Curatella americana* L.), pau-d'óleo (*Copaifera langsdorffii* Destf), jequitibá (*Cariniana estrellensis* (Roddi) Oltze), mama-de-porca (*Zanthoxylum rhoifolium* Lam.), carne-de-vaca 1 (*Roupala montana* Klatz.), peroba-rosa (*Aspidosperma cylindrocarpon* Muell. Arg.), carne-de-vaca 2 (*Neea* sp.); e folhosas exóticas: *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden., *Eucalyptus saligna* Sm., *Eucalyptus pilularis* Sm., *Eucalyptus maculata* Hook, *Eucalyptus cloeziana* F.Muell., *Eucalyptus citriodora* Hook e teca (*Tectona grandis* L.f).

3.1.1. Obtenção e preparo do material

De cada árvore foram obtidos toretes de ± 30 cm de comprimento na base do tronco (30 cm) e na altura do DAP (1,30 cm). De cada torete, retirou-se uma bagueta de aproximadamente 3 cm de largura, de casca a casca e simétrica em

relação à medula. Na parte mediana (medula) de cada bagueta foi feito um corte, obtendo-se duas porções. Uma metade foi utilizada para produção dos corpos de prova livres de defeitos para determinação das propriedades físicas, da compressão axial, de características anatômicas e de composição química, enquanto a outra foi utilizada para produção dos corpos de prova para determinação das outras propriedades mecânicas, conforme ilustrado na Figura 1.

3.2. Características e propriedades estudadas

Com os corpos de prova foram realizados os estudos mencionados nos tópicos subsequentes.

3.2.1. Estudos anatômicos

As características anatômicas foram determinadas com corpos de prova de $2 \times 2 \times 2$ cm devidamente orientados nos planos transversal, longitudinal tangencial e longitudinal radial. Com os corpos de prova obtidos foram realizados os seguintes procedimentos:

a. Cortes histológicos e preparação de lâminas para determinação das dimensões e quantificação porcentual dos elementos anatômicos

Os cortes histológicos foram confeccionados, obedecendo-se às técnicas padronizadas para a anatomia da madeira. Os corpos de prova foram fervidos em água para amolecimento. O tempo de fervura variou de uma hora, nas madeiras de menor densidade, até três horas, nas de maior densidade. Em seguida, com o auxílio de micrótomo de deslizamento de marca Jung, foram obtidos os cortes com espessura variando de 18 a 22 μm . Os cortes histológicos foram submetidos à coloração dupla e, posteriormente, montados em lâminas permanentes. Os corantes utilizados foram a safranina, para tornar mais evidentes células como fibras e vasos e o azul-de-metileno, para evidenciar as células de parênquima. Com as lâminas foram obtidas as seguintes dimensões e quantificações dos elementos anatômicos: número de vasos/ mm^2 ; diâmetro dos vasos;

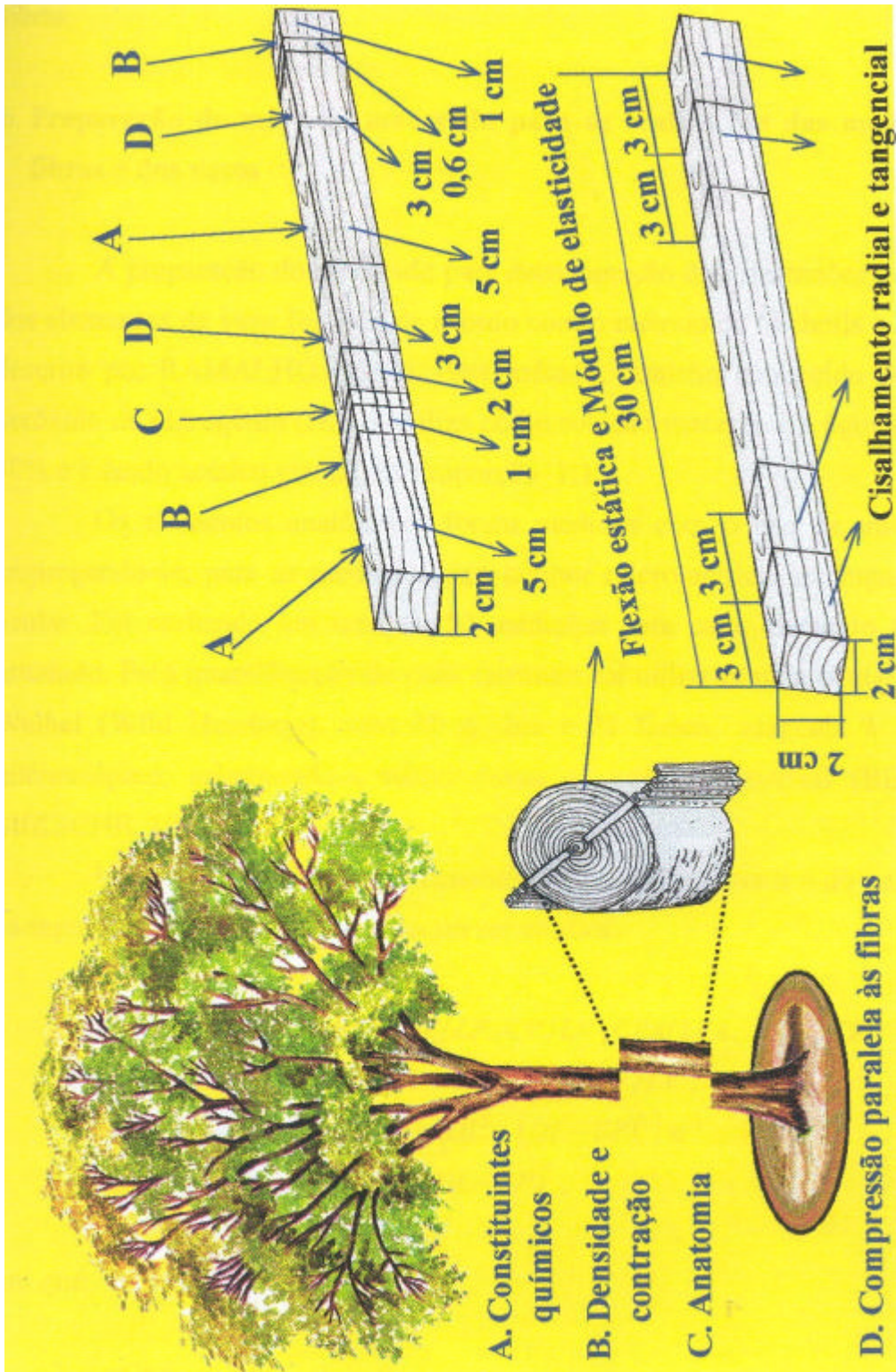


Figura 1 - Esquema mostrando como os corpos de prova foram obtidos.

proporção de vasos; proporção de parênquima axial; largura e comprimento do parênquima axial; largura e altura dos raios; proporção dos raios; e proporção das fibras.

b. Preparação de material macerado para as realizações das medições das fibras e dos vasos

A preparação do macerado para determinação das dimensões das fibras e dos elementos de vaso foi feita de acordo com o método de Nicholls e Dadswell, descrito por RAMALHO (1987). Esse método, também conhecido como o do peróxido de hidrogênio (H₂O₂), utiliza como solução macerante a água oxigenada 30% e o ácido acético glacial, na proporção 1:1.

Os elementos anatômicos foram medidos com o uso de microscópio, empregando-se, para as medições, um tambor micrométrico, no lugar da lente ocular. Foi realizado um total de 50 medições para cada elemento anatômico estudado. Para quantificação de cada estrutura foi utilizada uma ocular graduada Weibel (Wild Heerburg), com 42 pontos e 21 linhas, adaptada à ocular do microscópico, sobrepondo-a várias vezes no corte transversal (BERLYN e MIKSCHE, 1976).

Uma vez de posse das dimensões das fibras, dos vasos e do parênquima, os seguintes índices também puderam ser obtidos:

$$\text{Índice de enfieltramento} = CF/LF, CV/LV, CPA/LPA, ALTR/LR,$$

$$\text{Coeficiente de flexibilidade} = DLF/LF, DLV/LV,$$

$$\text{Área da parede da fibra} = p(DL^2 - (DL - EP)^2) e$$

$$\text{Área de vazios da fibra} = p(DL - EP)^2,$$

em que

ALTR = altura do raio;

CFb = comprimento da fibra;

CPA = comprimento do parênquima axial;

CV = comprimento do vaso;

DLFb = diâmetro do lúmen da fibra;
DLV = diâmetro do lúmen do vaso;
EPFb = espessura da parede da fibra;
EPV = espessura da parede dos vasos;
LFb = largura da fibra;
LPA = largura do parênquima axial;
LR = largura do raio; e
LV = largura do vaso.

3.2.2. Estudos das propriedades físico-mecânicas

As seguintes propriedades físico-mecânicas foram determinadas:

a. Densidade básica e densidades a 12 e 0% de umidade

Para determinação da variação da densidade no sentido medula-casca, foram confeccionados corpos de prova de dimensões de $2 \times 2 \times 1$ cm, provenientes das baguetas, conforme mostrado na Figura 1. Esses corpos de prova foram saturados em água e, em seguida, tiveram seu volume determinado pelo método da balança hidrostática (AMERICAN... - ASTM, 1994); posteriormente, eles foram secados em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ e pesados. A densidade básica foi determinada pela divisão da massa seca dos corpos de prova pelo seu volume saturado. A densidade a 12% de umidade foi obtida por meio da determinação da massa e do volume a 12% de umidade. A densidade a 0% de umidade foi obtida pela divisão da massa a 0% de umidade dos corpos de prova pelo seu volume a 0% de umidade. A água na balança hidrostática foi substituída pelo mercúrio metálico, quando se determinava, então, o volume da madeira seca.

b. Contração

Os corpos de prova utilizados na determinação da densidade da madeira serviram também para avaliação dos coeficientes de contração (Figura 1). As medições das dimensões radiais e tangenciais foram realizadas com um relógio

comparador, com sensibilidade de 0,01 mm, diretamente nos corpos de prova, em locais previamente estabelecidos e marcados. O volume dos corpos de prova, no entanto, foi determinado pelo método da balança hidrostática, por imersão em mercúrio. As medições foram feitas, inicialmente, na madeira em estado saturado de umidade. Os corpos de prova foram secados até 12% de umidade e novamente medidos. Eles foram, então, colocados em estufa, cuja temperatura foi elevada por etapas até atingir $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$, para que a remoção de toda a água da madeira não fosse acompanhada pela ocorrência de defeitos. Assim, pôde-se determinar o montante de contração que ocorre entre o estado de verde e o de 12% de umidade e entre o estado de verde e o de total ausência de água. Os valores das contrações linear e volumétrica foram obtidos, dividindo-se a diferença entre as dimensões dos corpos de prova saturados e secos, isto é, a base da porcentagem foi a dimensão no estado anidro.

c. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas estudadas foram a resistência à compressão paralela às fibras, a resistência à flexão estática, o módulo de elasticidade à flexão estática e a resistência ao cisalhamento nos planos radial e tangencial. As propriedades mecânicas foram determinadas de acordo com a norma da ASSOCIAÇÃO... - ABNT (1940) - MB26-1940.

3.2.3. Estudos das características químicas

Com os corpos de prova já usados no ensaio de compressão axial e com outras amostras, como mostrado na Figura 1, foi preparada a serragem que atravessava a peneira de 45 mesh, mas que era retida na peneira de 60 mesh, a ser utilizada na determinação dos teores de extrativos e de lignina.

O teor de extrativos foi determinado de acordo com as normas M3/69, M6/68 e M4/68, da ASSOCIAÇÃO... - ATBCP (1974). O teor de lignina foi obtido de acordo com a norma M10/71, dessa mesma associação.

No Quadro 1, resumem-se todas as propriedades e características avaliadas no presente trabalho, bem como as abreviações doravante empregadas.

Quadro 1 - Propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas determinadas neste estudo e respectivas abreviaturas

Propriedades mecânicas

1. COMPS = compressão paralela às fibras secas (kgf/cm²) (+ 12% de teor de umidade)
 2. CISRAD = cisalhamento no sentido radial (kgf/cm²)
 3. CISTANG = cisalhamento no sentido tangencial (kgf/cm²)
 4. FLEX = flexão estática (kgf/cm²)
 5. MOE = módulo de elasticidade (kgf/cm²)
-

Propriedades físicas

1. DB = densidade básica (g/cm³)
 2. DS = densidade seca (g/cm³)
 3. DO = densidade a 0% de umidade (g/cm³)
 4. CONRAD = contração radial (%)
 5. CONTANG = contração tangencial (%)
 6. CONVOL = Contração volumétrica (%)
 7. COEAN = Coeficiente de anisotropia dimensional (CONTANG/CONRAD)
-

Características químicas

1. AT = teor de extrativos em álcool/tolueno (%)
 2. AQ = teor de extrativos em água quente (%)
 3. LIG = teor de lignina (%)
-

Características anatômicas

1. CFb = comprimento da fibra (µm)
 2. LFb = largura da fibra (µm)
 3. EPFb = espessura da parede da fibra (µm)
 4. DLFb = diâmetro do lúmen da fibra (µm)
 5. PFb = proporção de fibras (%)
 6. INFb = índice do enfeltramento da fibra
 7. COEFb = coeficiente da flexibilidade da fibra
 8. APFb = área da parede da fibra (µm²)
 9. AVZFb = área de vazios da fibra (µm²)
 10. CV = comprimento do vaso (µm)
 11. DV = diâmetro do vaso (µm)
 12. EPV = espessura da parede do vaso (µm)
 13. LV = largura do vaso (µm)
 14. DLV = diâmetro do lúmen do vaso (µm)
 15. INFV = índice do enfeltramento do vaso
 16. COEFV = coeficiente de flexibilidade do vaso
 17. NV = número de vasos/mm²
 18. PV = proporção de vasos (%)
 19. CPA = comprimento do parênquima axial (µm)
 20. LPA = largura do parênquima axial (µm)
 21. CPALPA = índice do enfeltramento do parênquima axial
 22. PPA = proporção de parênquima axial (%)
 23. ALR = altura do raio (µm)
 24. LR = largura do raio (µm)
 25. ARTLR = índice do enfeltramento do raio
 26. PR = proporção de raio
-

3.3. Análise dos dados

Com os valores das propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas, foram constituídas as variáveis que estão relacionadas no Quadro 1. Devido ao seu grande número, as análises das influências conjuntas das características anatômicas e químicas sobre as propriedades físico-mecânicas e as das diferentes espécies estudadas envolveram duas etapas:

a. Análise de agrupamento (“Cluster Analysis”)

Esta análise foi usada para agrupar as diferentes espécies estudadas, com grandes semelhanças nas propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas.

As técnicas de agrupamento podem ser empregadas para realizar uma sumarização de dados, reduzindo-se as informações de um conjunto de N indivíduos para informações sobre um novo conjunto de G grupos, em que G é significativamente menor que N. Dessa maneira, torna-se possível obter melhor compreensão dos dados em estudo (FERREIRA e LIMA, 1978).

As análises de agrupamento foram conduzidas, usando-se como medida de dissimilaridade a distância euclidiana.

b. Análise de regressão

A análise de regressão entre as propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas foi conduzida com o uso do software STATISTICA, usando-se o procedimento Forward Stepwise. A vantagem deste procedimento é mostrar o modelo com menor número de variáveis independentes, que são relacionadas com as variáveis dependentes. Frequentemente, as equações eram escolhidas quando se obtinham maiores coeficientes de determinação (R^2) e menores erros-padrão da estimativa (Syx). Também, observaram-se os resíduos, a redundância, os sinais dos termos da equação, a dispersão de valores observados e previstos etc.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultados das determinações das propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas

Os valores médios de cada espécie obtidos nas determinações das propriedades e características estão apresentados no Quadro 2.

4.2. Variabilidade das madeiras no sentido medula-casca

A maioria das espécies de madeira estudadas apresenta algum tipo de variação nos valores de suas propriedades na medida em que as amostras se afastavam do centro da tora. O exame das tendências resultou nas informações resumidas, contidas no Quadro 3. Neste quadro, **L** simboliza uma tendência linear de aumento (quando **L** é acompanhado de **C**) ou de diminuição (quando **L** é acompanhado de **D**). A letra **P** significa tendência polinomial ou mais complexa, que pode ser também de aumento ou de redução. O asterisco (*) chama a atenção para o fato de que o modelo, seja linear, seja polinomial, é fortemente afetado em seu formato pelo primeiro valor, isto é, pelo que se obteve na determinação das propriedades da madeira que envolve a medula. A letra **N** representa a ausência de qualquer tendência notável de mudança nos valores. Em algumas espécies de toras de pequenos diâmetros, não se obtiveram mais que

Quadro 2 - Valores médios das propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas de 23 espécies de madeira

Espécies	Propriedades físico-mecânicas					
	COMPS (MPa)	FLEX (MPa)	MOE (MPa)	CISRAD (MPa)	CISTANG (MPa)	CONRAD (%)
Angelim (<i>Andira</i> sp.)	50,0	67,5	8.286	11,0	10,0	3,3
Pinho-cuiabano (<i>Schyzolobium amazonicum</i>)	36,5	49,6	6.050	6,2	7,2	3,1
Mogno (<i>Swietenia macrophylla</i>)	59,8	-	-	-	-	3,4
Cerejeira (<i>Torresia acreana</i>)	44,4	-	-	-	-	2,0
Farinha-seca (<i>Pithecelobium</i> sp.)	46,4	73,8	8.470	7,9	9,7	4,0
Morcegueira (<i>Trattinickia burserifolia</i>)	32,3	56,1	5.747	6,9	9,0	3,8
<i>Eucalyptus grandis</i>	50,9	93,5	10.611	8,2	9,8	4,5
<i>Eucalyptus maculata</i>	60,3	133,6	15.063	15,4	17,1	4,4
<i>Eucalyptus pilularis</i>	76,1	123,2	13.982	15,3	19,3	7,2
<i>Eucalyptus saligna</i>	73,9	116,6	9.581	14,8	14,9	8,5
<i>Eucalyptus citriodora</i>	83,6	126,9	12.864	13,2	15,2	7,7
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	60,7	133,5	12.730	13,7	17,9	5,5
Teca (<i>Tectona grandis</i>)	48,0	90,1	8.461	12,3	12,6	2,0
Cambará-rugoso (<i>Vochysia divergens</i>)	33,0	53,0	4.503	7,9	9,0	3,7
Cambará-liso (<i>Vochysia haenkiana</i>)	53,2	92,7	8.226	10,8	9,1	5,2
Lixeira (<i>Curatella americana</i>)	41,1	39,9	4.794	11,7	12,5	2,4
Cedro (<i>Cedrela fissilis</i>)	35,6	58,8	5.538	8,6	9,0	7,3
Mama-de-porca (<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>)	38,8	63,0	6.254	11,2	11,1	5,3
Jequitibá (<i>Cariniana estrellensis</i>)	37,6	55,6	3.926	8,5	8,5	3,6
Pau-d'óleo (<i>Copaifera langsdorffii</i>)	54,1	100,8	7.201	12,2	14,7	5,4
Peroba-rosa (<i>Aspidosperma cylindrocarpon</i>)	77,6	-	-	-	-	5,2
Carne-de-vaca 1 (<i>Roupala montana</i>)	50,2	-	-	-	-	3,7
Carne-de-vaca 2 (<i>Neea</i> sp.)	38,3	54,5	6.109	10,7	8,4	4,2

COMPS = resistência à compressão paralela às fibras, FLEX = resistência à flexão, MOE = módulo de elasticidade à flexão, CISRAD = resistência ao cisalhamento no plano radial, CISTANG = resistência ao cisalhamento no plano tangencial e CONRAD = coeficiente de contração radial.

Quadro 2, Cont.

Espécies	Propriedades físico-mecânicas					
	CONTANG (%)	CONVOL (%)	COEAN	Db (g/cm ³)	D-12% (g/cm ³)	D-0% (g/cm ³)
Angelim (<i>Andira</i> sp.)	7,50	9,2	2,4	0,53	0,63	0,59
Pinho-cuiabano (<i>Schyzolobium amazonicum</i>)	6,50	7,3	2,2	0,38	0,44	0,41
Mogno (<i>Swietenia macrophylla</i>)	4,70	6,9	4,2	0,67	0,74	0,73
Cerejeira (<i>Torresia acreana</i>)	3,4	5,5	1,7	0,43	0,97	0,45
Farinha-seca (<i>Pithecelobium</i> sp.)	7,3	4,8	1,4	0,54	0,63	0,59
Morcegueira (<i>Trattinickia burserifolia</i>)	6,6	8,4	1,8	0,39	0,46	0,43
<i>Eucalyptus grandis</i>	9,4	12,4	2,2	0,47	0,57	0,53
<i>Eucalyptus maculata</i>	7,9	11,4	1,8	0,66	0,78	0,75
<i>Eucalyptus pilularis</i>	11,3	15,9	1,6	0,65	0,80	0,77
<i>Eucalyptus saligna</i>	12,6	20,5	1,5	0,74	0,96	0,94
<i>Eucalyptus citriodora</i>	9,2	15,2	1,3	0,77	0,96	0,90
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	8,3	14,3	1,5	0,69	0,83	0,80
Teca (<i>Tectona grandis</i>)	4,9	5,6	2,3	0,50	0,80	0,53
Cambará-rugoso (<i>Vochysia divergens</i>)	12,4	15,6	3,5	0,53	0,66	0,66
Cambará-liso (<i>Vochysia haenkiana</i>)	11,8	15,1	2,3	0,61	0,76	0,72
Lixeira (<i>Curatella americana</i>)	4,3	13,1	3,3	0,67	0,82	0,78
Cedro (<i>Cedrela fissilis</i>)	12,3	18,3	1,6	0,45	0,59	0,57
Mama-de-porca (<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>)	9,2	12,2	1,7	0,58	0,55	0,60
Jequitibá (<i>Cariniana estrellensis</i>)	5,5	8,6	1,6	0,56	0,57	0,53
Pau-d'óleo (<i>Copaifera langsdorffii</i>)	9,0	11,7	1,7	0,73	0,88	0,82
Peroba-rosa (<i>Aspidosperma cylindrocarpon</i>)	8,9	13,8	1,7	0,79	0,88	0,85
Carne-de-vaca 1 (<i>Roupala montana</i>)	8,8	11,5	2,4	0,73	0,88	0,89
Carne-de-vaca 2 (<i>Neea</i> sp.)	8,4	13,5	2,0	0,50	0,60	0,58

CONTANG = coeficiente de contração tangencial, CONVOL = coeficiente de contração volumétrica, COEAN = coeficiente de anisotropia, Db = densidade básica, D-12% = densidade a 12% de umidade e D-0% = densidade a 0% de umidade.

Quadro 2, Cont.

Espécies	Características anatômicas e químicas								
	CFb (µm)	LFb (µm)	EPFb (µm)	DLFb (µm)	PFb (%)	CV (µm)	DV (µm)	EPV (µm)	LV (µm)
Angelim	1.507	27,1	6,1	15,0	49,6	474,9	224,0	7,0	301,0
Pinho-cuiabano	1.353	23,0	4,4	14,2	61,4	435,8	199,2	5,7	235,9
Mogno	1.216	25,5	4,0	17,5	64,0	523,0	228,9	5,3	281,8
Cerejeira	1.327	32,1	4,0	24,1	64,5	465,0	213,6	5,9	305,3
Farinha-seca	1.113	27,3	3,9	19,6	45,7	271,5	194,5	6,9	230,3
Morcegueira	1.280	19,9	4,6	10,5	64,5	401,8	167,8	6,4	192,4
<i>Eucalyptus grandis</i>	1.168	19,0	4,7	9,7	61,5	491,1	170,5	4,8	217,2
<i>Eucalyptus maculata</i>	1.045	17,0	5,4	6,2	61,5	419,7	139,6	6,0	167,2
<i>Eucalyptus pilularis</i>	1.154	20,2	5,5	9,1	57,2	485,9	142,4	5,2	160,7
<i>Eucalyptus saligna</i>	1.014	16,6	4,2	8,3	60,8	425,8	130,4	5,2	169,3
<i>Eucalyptus citriodora</i>	1.197	16,8	6,9	3,0	71,2	443,8	134,2	5,7	168,3
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	1.174	19,8	6,4	7,1	59,0	491,9	113,4	4,8	133,0
<i>Tectona grandis</i>	1.130	24,4	4,7	14,9	46,4	338,5	166,9	5,0	161,4
Cambará-rugoso	1.577	24,5	7,4	9,8	36,6	392,7	215,8	6,0	236,3
Cambará-liso	1.385	25,1	8,2	8,7	39,6	514,3	187,7	5,1	238,8
Lixeira	1.753	39,3	12,9	13,4	34,1	716,0	190,2	7,1	245,1
Cedro	1.221	23,7	4,2	15,2	50,3	385,8	206,9	5,4	185,5
Mama-de-porca	1.386	19,2	4,5	10,2	51,4	374,5	144,0	5,4	144,3
Jequitibá	1.607	24,9	7,3	10,4	33,6	492,1	128,9	6,3	160,7
Pau-d'óleo	1.409	22,8	4,4	13,9	41,1	454,0	173,3	5,3	192,2
Peroba-rosa	1.001	25,1	5,1	14,9	60,5	419,0	176,1	5,5	225,5
Carne-de-vaca 1	1.855	24,6	11,7	1,3	36,9	466,2	113,6	5,0	144,8
Carne-de-vaca 2	1.481	24,2	8,9	6,5	54,9	502,8	87,8	4,4	97,6

CFb = comprimento da fibra, LFb = largura da fibra, EPFb = espessura da parede da fibra, DLFb = diâmetro do lúmen da fibra, PFb = proporção de fibras, CV = comprimento do elemento do vaso, DV = diâmetro do vaso, EPV = espessura da parede do vaso e LV = largura do vaso.

Quadro 2, Cont.

Espécies	Características anatômicas e químicas											
	DLV (µm)	NV (mm ²)	PV (%)	CPA (µm)	LPA (µm)	PPA (%)	ALR (µm)	LR (µm)	PR (µm)	AT (µm)	AQ (µm)	LIG (%)
Angelim	210,0	2,9	6,6	147,8	33,3	22,3	341,4	29,2	23,8	2,7	3,3	22,3
Pinho-cuiabano	187,9	5,2	9,8	150,6	30,3	18,1	182,9	13,9	10,6	2,2	4,0	21,9
Mogno	218,3	7,2	15,1	108,9	29,5	7,4	350,7	52,4	14,4	2,8	3,5	21,8
Cerejeira	201,7	4,3	8,9	168,0	35,2	14,5	310,4	36,6	12,2	15,7	16,7	20,3
Farinha-seca	180,6	4,8	7,2	150,1	41,1	35,4	281,1	38,3	11,3	1,5	2,5	23,1
Morcegueira	155,0	9,4	11,7	114,2	23,4	8,8	306,3	44,5	14,6	7,3	7,7	25,3
<i>Eucalyptus grandis</i>	160,9	10,3	18,0	96,2	25,8	13,2	214,3	13,6	15,8	4,3	3,4	21,7
<i>Eucalyptus maculata</i>	127,5	10,9	12,3	104,0	32,0	9,0	211,3	21,6	14,6	6,4	7,0	19,9
<i>Eucalyptus pilularis</i>	132,0	12,9	15,2	104,9	21,6	4,5	200,9	14,1	10,4	4,8	5,7	24,5
<i>Eucalyptus saligna</i>	120,1	9,5	10,2	104,9	22,4	7,5	237,5	18,3	22,5	4,0	5,3	24,0
<i>Eucalyptus citriodora</i>	122,8	12,6	17,0	94,3	27,9	8,3	204,5	16,2	15,0	6,0	7,5	22,6
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	103,8	25,6	19,7	94,0	23,2	5,6	217,2	16,2	14,2	4,4	9,4	21,9
<i>Tectona grandis</i>	157,0	8,8	13,4	124,2	26,6	5,8	501,9	53,6	16,8	5,0	4,6	22,7
Cambará-rugoso	203,7	4,5	9,7	134,8	36,7	30,4	585,6	93,3	23,1	7,5	6,8	24,0
Cambará-liso	177,5	5,4	9,1	146,0	29,4	27,6	646,1	66,0	23,6	14,2	4,2	22,2
Lixeira	176,1	3,6	5,5	144,3	28,3	21,8	3136,1	355,9	38,5	11,0	11,3	22,4
Cedro	196,0	5,8	8,4	145,5	34,2	27,0	410,6	50,2	15,0	4,8	4,5	23,4
Mama-de-porca	133,2	7,5	9,9	154,6	28,6	14,8	369,7	60,7	23,5	12,6	12,9	19,0
Jequitibá	116,4	7,8	10,7	132,7	36,9	31,7	368,3	55,2	24,0	3,6	3,6	19,6
Pau-d'óleo	162,7	9,0	13,2	125,7	29,0	27,9	300,1	34,0	19,1	6,8	8,5	30,0
Peroba-rosa	165,0	4,8	8,3	86,8	24,7	9,9	277,2	15,6	21,8	0,6	3,2	22,6
Carne-de-vaca 1	103,6	11,8	11,3	235,1	31,5	19,0	1333,1	298,9	33,9	21,1	5,0	25,5
Carne-de-vaca 2	79,0	42,6	24,5	95,7	25,6	6,2	223,3	20,0	15,6	9,0	6,3	27,2

DLV = diâmetro do lúmen dos vasos, NV = número de vasos, PV = proporção de vasos, CPA = comprimento do parênquima, LPA = largura do parênquima, PPA = proporção de parênquima, ALR = altura dos raios, LR = largura dos raios, PR = proporção de raios, AT = teor de extrativos em álcool/tolueno, AQ = teor de extrativos em água quente e LIG = teor de lignina.

Quadro 3 - Tendências de variação no sentido medula-casca das propriedades físicas e mecânicas e das características anatômicas e composição química de 23 espécies de madeira

Espécies	Propriedades físico-mecânicas					
	COMPS	FLEX	MOE	CISRAD	CISTANG	CONRAD
Angelim (<i>Andira</i> sp.)	PC	LD	LD	PC*	-	PC
Pinho-cuiabano (<i>Schyzolobium amazonicum</i>)	LC	PC	PC	LC	LC	LD
Mogno (<i>Swietenia macrophylla</i>)	N	-	-	-	-	LC
Cerejeira (<i>Torresia acreana</i>)	LD	-	-	-	-	PC
Farinha-seca (<i>Pithecelobium</i> sp.)	PC	PC*	PC*	PD	PC	LD
Morcegueira (<i>Trattinickia burserifolia</i>)	PC*	PC	N	PC	LC	N
<i>Eucalyptus grandis</i>	LC	LC*	LC	PC*	PC*	LC
<i>Eucalyptus maculata</i>	LC	PC*	PC*	N	LD	LC
<i>Eucalyptus pilularis</i>	PC	LC	LC	PC	PC	PC
<i>Eucalyptus saligna</i>	C	C	C	C	C	N
<i>Eucalyptus citriodora</i>	LC	N	PC	LD	LC	LC
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	PC	LC	LC	N	N	PC*
Teca (<i>Tectona grandis</i>)	LC	PC*	PC	PC	LC	N
Cambará-rugoso (<i>Vochysia divergens</i>)	D	N	N	N	N	D
Cambará-liso (<i>Vochysia haenkiana</i>)	C	C	N	D	N	D
Lixeira (<i>Curatella americana</i>)	LD	N	PD*	LD	N	PD
Cedro (<i>Cedrela fissilis</i>)	LC	LC	PC*	PC*	PC*	LD
Mama-de-porca (<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>)	C	-	-	-	-	D
Jequitibá (<i>Cariniana estrellensis</i>)	N	N	N	N	N	LD*
Pau-d'óleo (<i>Copaifera langsdorffii</i>)	C*	-	-	-	-	N
Peroba-rosa (<i>Aspidosperma cylindrocarpon</i>)	PC*	-	-	-	-	N
Carne-de-vaca 1 (<i>Roupala montana</i>)	N	-	-	-	-	N
Carne-de-vaca 2 (<i>Neea</i> sp.)	D	-	-	-	-	C*

COMPS = resistência à compressão paralela às fibras, FLEX = resistência à flexão, MOE = módulo de elasticidade à flexão, CISRAD = resistência ao cisalhamento no plano radial, CISTANG = resistência ao cisalhamento no plano tangencial, CONRAD = coeficiente de contração radial, L = tendência linear, P = tendência polinomial, D = decrescente, C = crescente, N = não-variável e * = tendência influenciada pelos primeiros valores.

Quadro 3, Cont.

Espécies	Propriedades físico-mecânicas				
	CONVOL	COEAN	Db	D-12%	D-0%
Angelim (<i>Andira</i> sp.)	PC	LC	PC	PC	PC
Pinho-cuiabano (<i>Schyzolobium amazonicum</i>)	N	LD	LC	LC	LC
Mogno (<i>Swietenia macrophylla</i>)	N	N	PC	PC	PC
Cerejeira (<i>Torresia acreeana</i>)	PC	LC	N	N	N
Farinha-seca (<i>Pithecelobium</i> sp.)	LD	LC	N	N	N
Morcegueira (<i>Trattinickia burserifolia</i>)	LD	N	N	N	N
<i>Eucalyptus grandis</i>	LC	LD	PC	PC	PC
<i>Eucalyptus maculata</i>	LC	PD	LC	LC	LC
<i>Eucalyptus pilularis</i>	PC	LD	PC	PC	PC
<i>Eucalyptus saligna</i>	C	C	C	C	C
<i>Eucalyptus citriodora</i>	LC	LD	PC	PC	PC
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	LC	PD*	PC	PC	PC
Teca (<i>Tectona grandis</i>)	N	N	N	N	N
Cambará-rugoso (<i>Vochysia divergens</i>)	D	C	N	N	N
Cambará-liso (<i>Vochysia haenkiana</i>)	D	C	N	N	N
Lixeira (<i>Curatella americana</i>)	N	PC	LD*	LD*	N
Cedro (<i>Cedrela fissilis</i>)	LD	N	LC	N	N
Mama-de-porca (<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>)	C	C	N	N	C
Jequitibá (<i>Cariniana estrellensis</i>)	N	N	N	N	N
Pau-d'óleo (<i>Copaifera langsdorffii</i>)	C	C	C	N	C
Peroba-rosa (<i>Aspidosperma cylindrocarpon</i>)	N	N	PC	PC	PC
Carne-de-vaca 1 (<i>Roupala montana</i>)	N	N	LC	LC	LC
Carne-de-vaca 2 (<i>Neea</i> sp.)	D*	C	D	D	D

CONVOL = coeficiente de contração volumétrica, COEAN = coeficiente de anisotropia, Db = densidade básica, D-12% = densidade a 12% de umidade, D-0% = densidade a 0% de umidade, L = tendência linear, P = tendência polinomial, D = decrescente, C = crescente, N = não-variável e * = tendência influenciada pelos primeiros valores.

Quadro 3, Cont.

Espécies	Características anatômicas e composição química								
	CFb	LFb	EPFb	DLFb	PFb	CV	DV	EPV	LV
Angelim (<i>Andira</i> sp.)	PC*	PC	PC	PC	N	PC*	PC*	LC*	LC
Pinho-cuiabano (<i>Schyzolobium amazonicum</i>)	PC*	LD	LC	LD	LD	LD	N	N	N
Mogno (<i>Swietenia macrophylla</i>)	LC	N	LC	LD	N	N	LC	LC	LC
Cerejeira (<i>Torresia acreana</i>)	PC*	PC	N	PC	LD	N	N	PC*	PC*
Farinha-seca (<i>Pithecelobium</i> sp.)	PC	LC*	LC*	N	LD	PC*	N	LC	LC
Morcegueira (<i>Trattinickia burserifolia</i>)	PC*	LC*	LD	LC*	PC*	LC*	LC*	N	LC*
<i>Eucalyptus grandis</i>	PC	PC	PC	LC	N	PC*	LC	LC	PC
<i>Eucalyptus maculata</i>	LC	N	LC	LD	PC*	PC*	LC*	PC	PC
<i>Eucalyptus pilularis</i>	LC	LD	LC	LD	PD*	PC	PC	PC*	N
<i>Eucalyptus saligna</i>	C	D	C	D	C	N	C	C	C
<i>Eucalyptus citriodora</i>	PC	N	PC	LD	LC	LC	LC	LC	LC
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	N	N	LC	LD	N	N	PC	LC	LC
Teca (<i>Tectona grandis</i>)	LC	N	LC*	LC	N	N	PC	LC	N
Cambará-rugoso (<i>Vochysia divergens</i>)	D	D	D	C	C	D	D	D	D
Cambará-liso (<i>Vochysia haenkiana</i>)	C	N	C	N	N	C	C	C	C
Lixeira (<i>Curatella americana</i>)	LC	LC*	LC*	PC*	LD	LC*	PD*	N	LC*
Cedro (<i>Cedrela fissilis</i>)	PC	N	PC	N	PC	LC	N	N	LC
Mama-de-porca (<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>)	C	N	N	N	C	C	C	C	C
Jequitibá (<i>Cariniana estrellensis</i>)	C*	C*	C*	C*	D*	C*	C*	D	C
Pau-d'óleo (<i>Copaifera langsdorffii</i>)	C	C	N	C	D	N	D	D	C
Peroba-rosa (<i>Aspidosperma cylindrocarpon</i>)	PC*	LC*	LC*	LC	LD	N	LC	PC*	LC*
Carne-de-vaca 1 (<i>Roupala montana</i>)	LC	LC	LC	LD	LC	LD	PC	LC	PC*
Carne-de-vaca 2 (<i>Neea</i> sp.)	C*	N	N	N	D*	N	C*	C*	C*

CFb = comprimento da fibra, LFb = largura da fibra, EPFb = espessura da parede da fibra, DLFb = diâmetro do lúmen da fibra, PFb = proporção de fibras, CV = comprimento do elemento do vaso, DV = diâmetro do vaso, EPV = espessura da parede do vaso, LV = largura do vaso, L = tendência linear, P = tendência polinomial, D = decrescente, C = crescente, N = não-variável e * = tendência influenciada pelos primeiros valores.

Quadro 3, Cont.

Espécies	Características anatômicas e composição química											
	DLV	NV	PV	CPA	LPA	PPA	ALTR	LR	PR	AT	AQ	LIG
Angelim (<i>Andira</i> sp.)	PC*	N	LC	LC*	LC	N	LD	LC	LD	LD	LD	N
Pinho-cuiabano (<i>Schyzolobium amazonicum</i>)	N	N	N	N	LD	N	N	N	N	PC	LC	LD
Mogno (<i>Swietenia macrophylla</i>)	LC	PD	PC	LD	PC	N	PD	LC	N	LC*	LC	LD
Cerejeira (<i>Torresia acreana</i>)	PC*	N	N	N	PC	LC	LD	LC	PC*	LD	LD	LD
Farinha-seca (<i>Pithecelobium</i> sp.)	PC*	PD*	N	PC*	PC*	N	N	PC*	LC	PC	N	N
Morcegueira (<i>Trattinickia burserifolia</i>)	LC*	LD	N	N	PC*	N	PC	LC	N	N	N	LD
<i>Eucalyptus grandis</i>	LC	LC	LC	PC	PD	PD	PC*	N	LD	LC	PC	N
<i>Eucalyptus maculata</i>	LC	PD*	PD*	LC	PD*	N	N	LC	N	LC	LC	PD*
<i>Eucalyptus pilularis</i>	PC	N	LC	N	N	PC*	LD	N	LD	N	N	LD
<i>Eucalyptus saligna</i>	C	D	D	D	D	D	N	C	D	C	C	N
<i>Eucalyptus citriodora</i>	LC	LD	N	N	N	PD	PC	PC	N	N	N	N
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	PC	N	PC	N	N	PD	PC	PC	N	N	PC	N
Teca (<i>Tectona grandis</i>)	PC	PD*	N	N	PC	LC	N	N	N	LD*	LD	LD*
Cambará-rugoso (<i>Vochysia divergens</i>)	D	D	D	D	D	D	N	N	D	D	D	N
Cambará-liso (<i>Vochysia haenkiana</i>)	C	N	N	C	N	N	N	C	N	C	D	N
Lixeira (<i>Curatella americana</i>)	PD*	N	PC	LC	LC*	LD	N	N	LC	N	N	PD
Cedro (<i>Cedrela fissilis</i>)	N	PD	PD	N	N	PD	PD*	LD	N	N	N	N
Mama-de-porca (<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>)	C*	D	D	D*	N	N	C	C	N	N	N	N
Jequitibá (<i>Cariniana estrellensis</i>)	C*	D*	D*	C	C*	D*	C	N	C	N	C	N
Pau-d'óleo (<i>Copaifera langsdorffii</i>)	D	N	C*	D*	N	N	C	C	N	D	D	D
Peroba-rosa (<i>Aspidosperma cylindrocarpon</i>)	LC	N	PC*	PC	PC	LD	N	PC*	PC*	N	N	D
Carne-de-vaca 1 (<i>Roupala montana</i>)	PC*	PD*	N	N	LC	LD	PC*	PC	LD	N	N	N
Carne-de-vaca 2 (<i>Neea</i> sp.)	C*	N	D*	D*	C	N	C*	C	C*	D	D	C

DLV = diâmetro do lúmen dos vasos, NV = número de vasos, PV = proporção de vasos, CPA = comprimento do parênquima, LPA = largura do parênquima, PPA = proporção de parênquima, ALR = altura dos raios, LR = largura dos raios, PR = proporção de raios, AT = teor de extrativos em álcool/tolueno, AQ = teor de extrativos em água quente, LIG = teor de lignina, L = tendência linear, P = tendência polinomial, D = decrescente, C = crescente, N = não-variável e * = tendência influenciada pelos primeiros valores.

três amostras ao longo do raio da tora. O ajuste de um modelo a tão poucos pontos não faz sentido, pois, nessas situações, as letras **L** ou **P** não são empregadas, indicando-se tão-somente uma tendência ao crescimento (**C**) ou à redução (**D**). Finalmente, o hífen mostra aquelas situações em que não se pôde obter informação, porque o volume de madeira à disposição não era suficiente para a confecção da amostra.

Chama a atenção, nesses quadros, o grande número de espécies cujas madeiras na vizinhança da medula têm propriedades diferentes daquelas encontradas a maiores distâncias do centro da tora (situações **LC** e, mais especialmente, **PC**). Esse fenômeno é mais freqüente nas características anatômicas da madeira e parece indicar a presença da chamada “madeira juvenil”. A presença desse tecido anômalo, considerado indesejável (BENDTSEN, 1978; PANSHIN e DE ZEEUW, 1980; MAEGLIN, 1988), quase sempre dificulta a utilização da madeira; felizmente, nas madeiras aqui estudadas, o volume por ele ocupado foi muito pequeno. Segundo esses autores, a madeira juvenil caracteriza-se por apresentar fibras e vasos mais curtos que os da madeira adulta; por apresentar maior proporção de fibra e menor de vasos; e, ainda, por apresentar fibras de paredes mais finas nessa região. Isso pôde ser constatado em *Pithecelobium sp.* e em *E. pilularis*. Daqueles cinco critérios, quatro foram classificados como madeira juvenil e puderam ser encontrados em outras nove espécies. Foi atribuída importância relativa mais elevada à proporção de fibras e ao seu comprimento, características de maior interesse tecnológico; então, muitas outras espécies poderiam ser consideradas como portadoras de madeira juvenil.

A presença dessa camada de tecido diferente, como se disse, afeta o modelo utilizado para representar a tendência de mudança de valores. Se esse valor central fosse retirado da análise, obtinha-se, quase sempre, dispersão de resultados que não indicava qualquer tendência notável de acréscimo ou de redução ou, quando muito, apenas pequenas tendências lineares, não-significativas. Assim, nessas espécies, a madeira torna-se mais homogênea, a partir de dois centímetros a contar da medula.

Outras madeiras não apresentaram valores notavelmente diferentes nessa primeira região de amostragem: *Vochysia haenkiana* e *Vochysia divergens*; dois

dos eucaliptos, *Swietenia macrophylla*, *Schyzolobium amazonicum* e *Copaifera langsdorffii*. A ausência dessa região significa madeira mais homogênea; pode, ainda, haver tendência de aumento ou redução dos valores das propriedades, embora sem a mudança abrupta observada nas espécies que a têm. Observa-se, no Quadro 2, que os eucaliptos, por exemplo, apresentam tendências de alteração que sugerem um modelo linear, ou polinomial, em quase todas as propriedades determinadas. Essas árvores, que tinham, por ocasião do abate, 21 anos de idade, ainda não apresentavam madeira com características estáveis. Não se sabe a idade em que essas espécies deixam de formar lenho juvenil; aparentemente, as usadas neste trabalho ainda não haviam atingido a maturidade.

Percebe-se, no exame dos quadros, que é mais freqüente a tendência ao aumento nos valores das propriedades mecânicas, mas, também, em muitas das características anatômicas e da densidade. Neste último caso, a tendência à estabilização é também comum, sendo rara a redução. Por exemplo, a resistência à compressão da madeira seca (COMPS) aumentou em 17 espécies, decresceu em quatro e manteve-se constante em apenas duas. Uma situação extrema é a do comprimento das fibras, que se mostrou crescente até a casca em 21 espécies. Houve casos muito numerosos de redução dos coeficientes de contração da madeira.

Exceções são também comuns. Em apenas uma espécie foi encontrado teor crescente de lignina. Nas demais, ele foi estável (12 espécies) ou reduziu-se (10 espécies). Da mesma maneira, o número de vasos/mm² foi crescente em uma espécie, decresceu em 12 e manteve-se estável em outras 10.

Os eucaliptos parecem formar um grupo de madeira particularmente variável, especialmente nas propriedades físicas e mecânicas, que quase sempre aumentam, em magnitude, da medula para a casca; muitas características anatômicas variam acentuadamente. Os coeficientes de contração radial e volumétrico aumentam em quase todas as espécies, provavelmente como um reflexo do aumento da densidade.

4.3. Agrupamento das espécies

Uma análise de agrupamento foi realizada com as 23 espécies de madeira em estudo, usando-se os valores das propriedades determinadas. O dendrograma da Figura 2 ilustra a situação obtida quando foram usadas as propriedades físicas. Vê-se, nessa figura, que as madeiras de *Torresia acreana*, *Swietenia macrophylla* e *Aspidosperma cylindrocarpon*, muito conceituadas, formam um grupo homogêneo, que se destaca das espécies restantes. Nota-se, ainda, que cinco dos eucaliptos estão também agrupados, embora *E. citriodora* e *E. cloeziana* não estejam muito próximo dos outros três. Observa-se também, nessa figura, que as espécies *Pithecelobium sp.* e *Tectona grandis* estão muito próximas, assim como *Trattinickia burserifolia* e *Cedrela fissilis*. Não puderam ser constatados grupos nítidos que destacassem espécies das florestas daquelas do cerrado.

Tampouco puderam ser observados grupos nítidos de espécies quando se usaram as variáveis que representavam a composição química (Figura 3). A espécie *Roupala montana* estava isolada por apresentar, provavelmente, o maior teor de substâncias solúveis em etanol/tolueno. *Torresia acreana*, *Curatella americana* e *Copaifera langsdorffii* formam, também, grupos, sendo todas elas ricas em extrativos solúveis em água quente ou em etanol/tolueno.

Grupos de espécies podem também ser formados quando se utilizam as dimensões das fibras (Figura 4). Chama a atenção, nesse caso, o grupo formado pelas espécies *Curatella americana* e *Roupala montana*, muito distante dos demais. Essas duas espécies se destacam pelas fibras muito longas e de paredes espessas. Não há grupo muito nítido naquilo que diz respeito às dimensões dos vasos (Figura 5). A espécie *Curatella americana* mais uma vez se destacou, por apresentar vasos muito longos e de paredes espessas. A madeira de *Torresia acreana* também se mostrou isolada; ela apresenta os vasos mais curtos, embora de paredes espessas e que aparecem em pequena proporção. Observando o dendrograma obtido com as informações de parênquima axial, notou-se a presença de poucos grupos nítidos (Figura 6). *Roupala montana* e *Schyzolobium amazonicum* estão isolados, provavelmente por possuírem parênquima axial muito longo. Os eucaliptos estão todos em um mesmo grupo, mas que contém outras espécies nativas. Quando foram empregadas as dimensões dos raios,

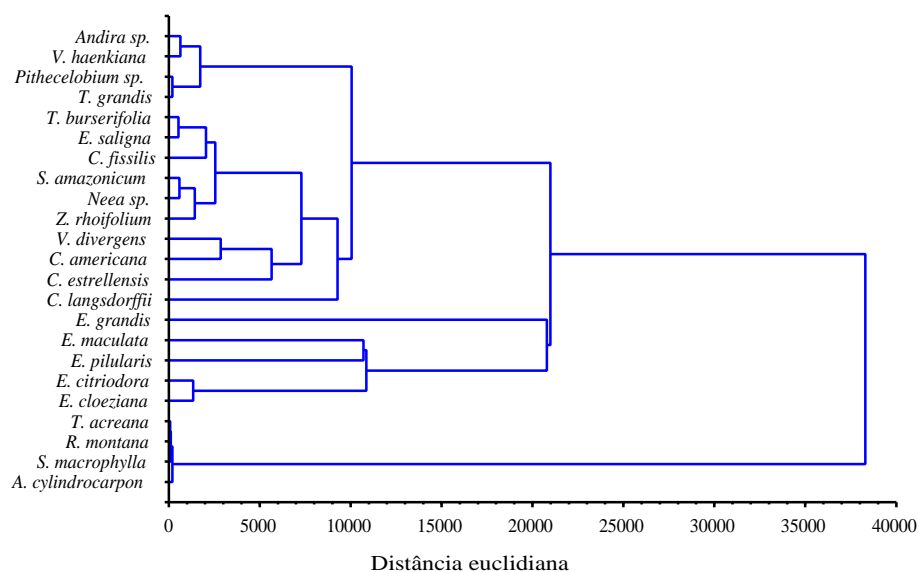


Figura 2 - Dendrograma obtido pelo emprego da análise de agrupamento nos dados de propriedades físicas de 23 espécies de madeira.

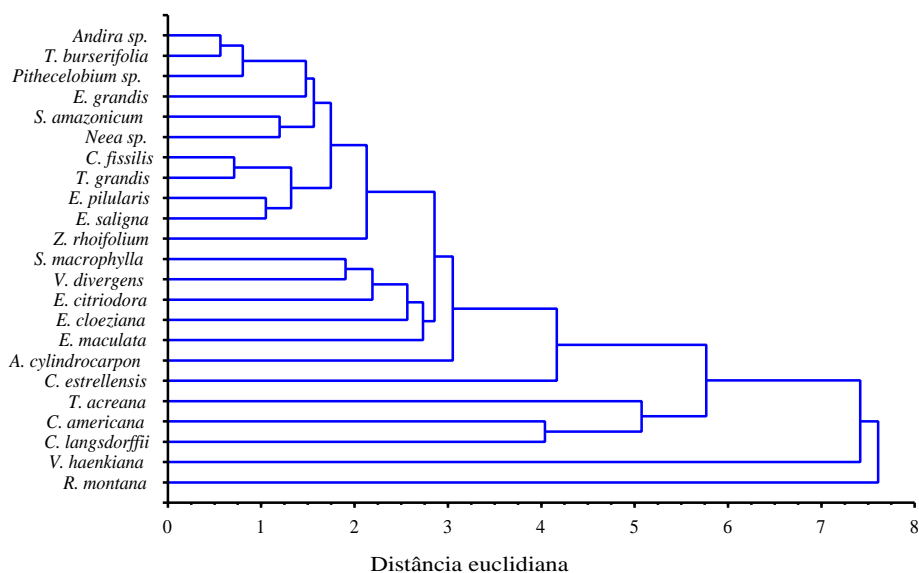


Figura 3 - Dendrograma obtido pelo emprego da análise de agrupamento nos dados de composição química de 23 espécies de madeira.

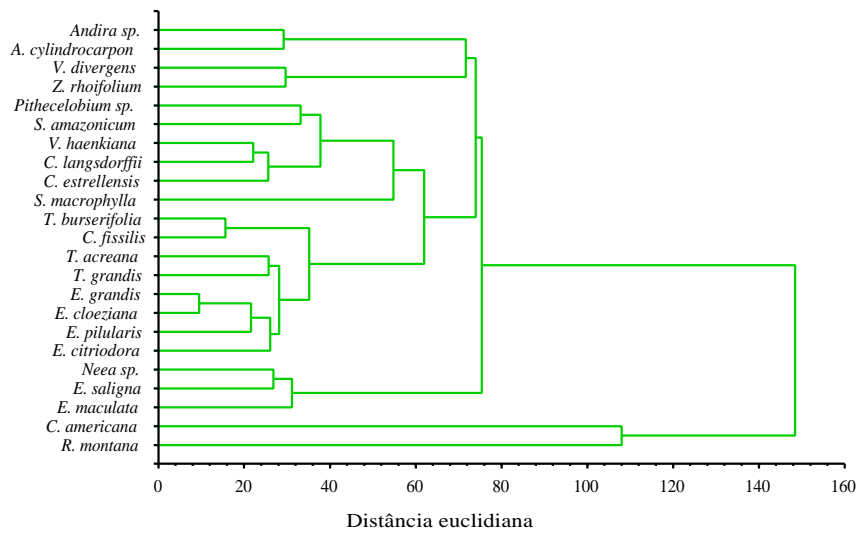


Figura 4 - Dendrograma obtido pelo emprego da análise de agrupamento nos dados de dimensões das fibras de 23 espécies de madeira.

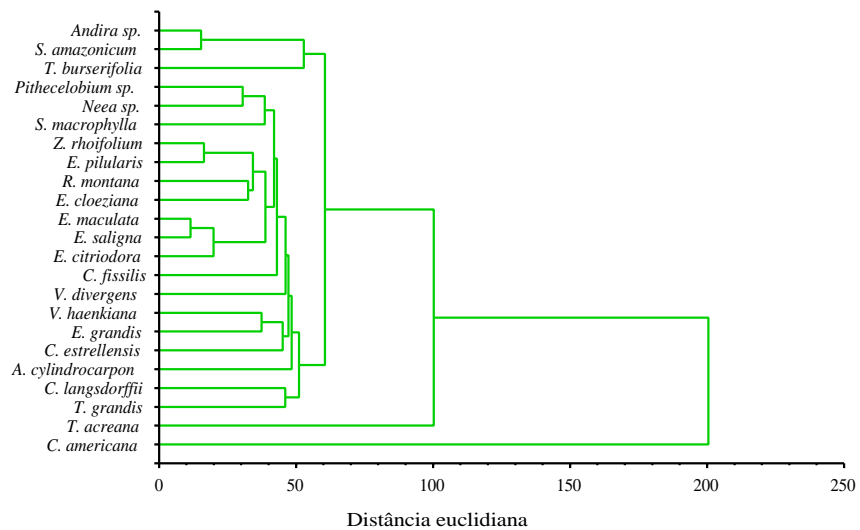


Figura 5 - Dendrograma obtido pelo emprego da análise de agrupamento nos dados de dimensões dos vasos de 23 espécies de madeira.

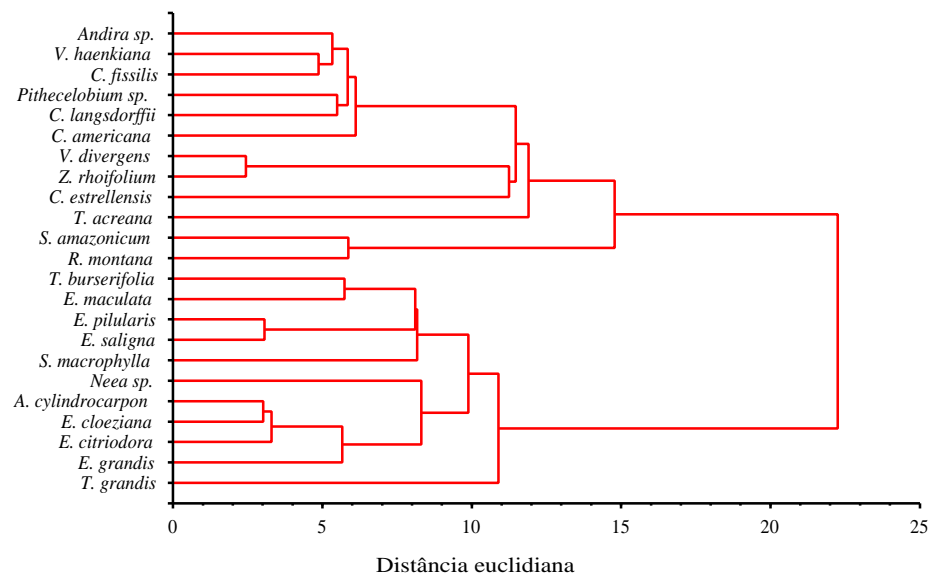


Figura 6 - Dendrograma obtido pelo emprego da análise de agrupamento nos dados de parênquima axial de 23 espécies de madeira.

encontrou-se o dendrograma mostrado na Figura 7. *Curatella americana* e *Roupala montana* estão isoladas, porque apresentam raios excepcionalmente altos e largos, além de abundantes.

A distância euclidiana dessas duas espécies é tão elevada, que mascara o agrupamento das demais. Excluídas aquelas duas espécies, obtém-se novo dendrograma, o da Figura 8. Verifica-se, nessa figura, que os eucaliptos são todos muito semelhantes, sendo também similares, pelo menos neste aspecto, à madeira de *Aspidosperma cylindrocarpon*. *Vochysia divergens* e *V. haenkiana* formam um grupo muito diferenciado dos demais; *Tectona grandis* está bastante isolada.

Muitas das madeiras estudadas apresentaram propriedades cujas magnitudes variavam no sentido medula-casca. Essa variação pode ser quantificada, dentre outras maneiras, pelo desvio-padrão. Se o desvio-padrão dos valores de certa variável for considerado uma nova variável, podem-se construir

dendogramas que mostrariam grupos de espécies semelhantes nas variabilidades de suas madeiras. Poucas informações novas foram obtidas quando esse procedimento foi realizado. A Figura 9 representa a situação mais marcante, obtida com a variabilidade das propriedades físicas e mecânicas das madeiras. Nota-se, nessa figura, um grupo constituído pelas espécies *Torresia acreana*, *Swietenia macrophylla*, *Aspidosperma cylindrocarpon* e *Roupala montana*, muito semelhantes entre si.

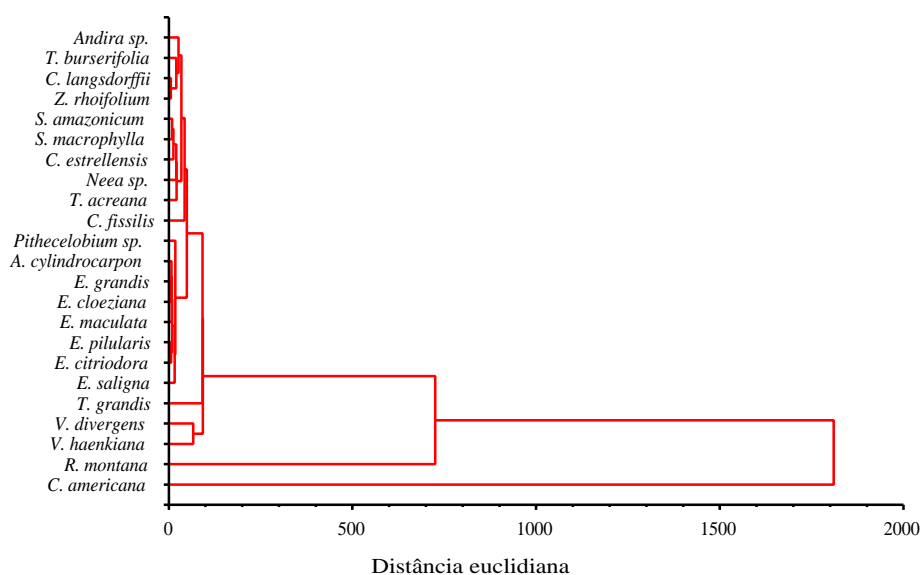


Figura 7 - Dendrograma obtido pelo emprego da análise de agrupamento nos dados dos raios de 23 espécies de madeira.

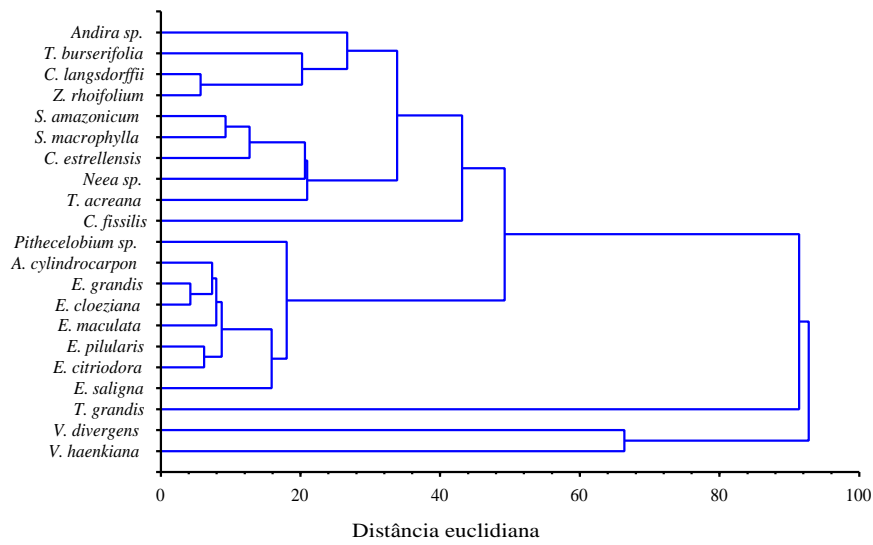


Figura 8 - Dendrograma obtido pelo emprego da análise de agrupamento nos dados dos raios, quando são excluídas as espécies *Curatella americana* e *Roupala montana*.

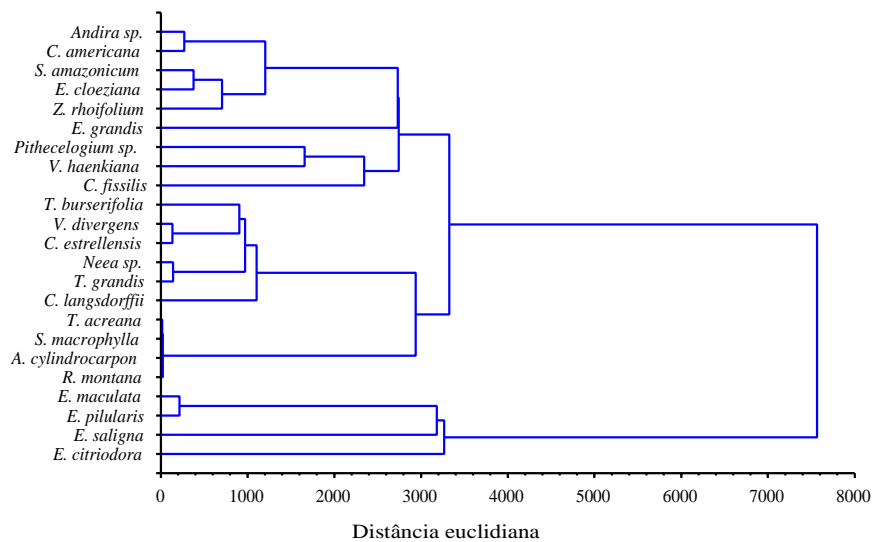


Figura 9 - Dendrograma obtido quando são usados como variáveis os desvios-padrão das propriedades físicas.

4.4. Discriminação entre grupos de espécies

Como se viu anteriormente, as madeiras utilizadas neste trabalho foram obtidas de florestas naturais ou do cerrado ou eram exóticas plantadas. No tópico anterior, viu-se que é possível agrupar espécies de acordo com suas propriedades. É também interessante verificar em que aspectos esses três grupos de espécies se diferem.

Uma análise de discriminação foi aplicada aos resultados desta pesquisa, permitindo constatar a existência de certas situações e que grupos se destacavam uns dos outros. A diferença entre grupos raramente é perfeita. Certas espécies de um grupo quase sempre poderiam fazer parte de outro.

O grupo de exóticas, por exemplo, tem em geral densidade anidra mais elevada que o grupo do cerrado; este, por sua vez, em média, tem madeiras mais densas que as madeiras de mata. A distância entre o grupo das espécies provenientes do cerrado e o das exóticas é pequena. Com exceção do *E. citriodora*, as demais exóticas não se distinguem neste aspecto. *Aspidosperma cylindrocarpon*, no entanto, não se distingue das exóticas.

Dentre as três variáveis que descrevem a composição química das madeiras, o teor de extrativos em álcool/tolueno é o que mais discrimina os grupos. As madeiras de espécies do cerrado têm, quase sempre, teores mais elevados. Há, no entanto, exceções. A madeira de *Torresia acreana*, por exemplo, não se ajusta bem ao padrão, assemelhando-se mais às madeiras do cerrado.

A resistência ao cisalhamento radial e ao tangencial, a resistência à flexão e a propriedade de rigidez discriminam bem o grupo das exóticas dos dois outros grupos, que são muito semelhantes. Ainda assim, há exceções. As madeiras de *Torresia acreana* e de *Swietenia macrophylla* estão mais próximas das madeiras do cerrado; *Tectona grandis* e *E. grandis* assemelham-se mais às madeiras nativas da mata.

A contração radial e a volumétrica discriminam bem a madeira proveniente da mata daquela das exóticas e do cerrado. Estes dois últimos grupos são muito semelhantes. As exceções são importantes: *Tectona grandis*, *Cariniana estrellensis*, *E. grandis*, *E. maculata* e *E. cloeziana* estão mais

próximos das espécies da mata do que dos demais eucaliptos. No entanto, *Copaifera langsdorffii* e *Zanthoxylum rhoifolium* assemelham-se mais aos eucaliptos restantes.

Dentre as propriedades relacionadas com as dimensões da fibra e sua proporção, o comprimento e o diâmetro do lúmen separam bem os grupos. Em média, as madeiras do cerrado têm menores proporções de fibra; os outros dois grupos apresentam pequena distância entre si. As exceções são poucas: *Tectona grandis* poderia ser classificada como madeira de mata, ao passo que *Swietenia macrophylla* e *Neea* sp. assemelham-se mais aos eucaliptos.

As dimensões dos vasos, seu número e proporção discriminam mal o grupo das exóticas do das madeiras do cerrado. As madeiras da mata estão, no entanto, bem distantes, especialmente na proporção e no número de vasos por mm², que são, em média, muito inferiores. Os vasos têm, nelas, diâmetros maiores e paredes mais espessas.

A proporção do parênquima e a sua largura, que são menores, distinguem bem o grupo de exóticas dos outros dois grupos, pouco distantes entre si.

A proporção de raios é um parâmetro que distingue a madeira de árvores do cerrado. Os dois outros grupos são semelhantes entre si, embora *Tectona grandis* não mostre muita distância das árvores do cerrado.

Em resumo, a madeira proveniente do cerrado parece distinta da que se obtém da mata e das exóticas. Sem dúvida, essa diferença deve representar maior adaptabilidade dessas árvores. Este estudo, no entanto, limitou-se a apenas 23 espécies. Somente estudos mais amplos poderão corroborar essa hipótese, que poderia ser útil no que diz respeito à seleção de espécies para plantio em determinada região, além de indicar a melhor utilização da madeira.

4.5. Correlações entre as propriedades

Correlações significativas entre as propriedades e características da madeira eram esperadas e, de fato, ocorreram com frequência neste trabalho. Pesquisadores têm procurado, com insistência, relações que permitiriam prever a magnitude de certa propriedade, conhecidos os valores de outra ou de outras. Em especial, a predição de propriedades mecânicas vem sendo muito explorada.

4.5.1. Correlações entre as características anatômicas

Já se viu, anteriormente, que muitas das características anatômicas estão associadas com a distância da medula: algumas aumentam de valor, outras diminuem, outras são uniformes e outras diminuem em certa espécie, mas aumentam em outras etc.

As correlações entre as características anatômicas são também fortemente influenciadas pela presença da madeira juvenil. Se as 20 características mais importantes da madeira de *Swietenia macrophylla*, por exemplo, forem correlacionadas entre si, obtêm-se 42 correlações significativas. Se o primeiro valor, da madeira mais próxima da medula, for removido, o número de correlações significativas cai para 33. No Quadro 4, mostram-se essas correlações, para essa madeira apenas. No entanto, muitas das espécies estudadas tinham pequenos diâmetros e forneciam apenas pequeno número de amostras no sentido medula-casca. O ajuste de um modelo linear a tais situações sempre fornece coeficientes de correlação elevados. Assim, só se procuraram correlacionar as características de sete espécies que forneceram, pelo menos, cinco amostras. Esses coeficientes estão sumariados no Quadro 5. O primeiro dígito em cada célula da tabela indica o número de vezes em que se encontrou correlação significativa positiva entre as duas características nessas sete espécies; o segundo dígito indica o número de correlações negativas.

A obtenção de um padrão de comportamento das correlações não é fácil, quando se procura interpretar o quadro. O número de correlações significativas é pequeno; quando numerosas, a correlação é óbvia (EPF e DLF, DV, DLV e outras). Correlações que ocorrem numa espécie raras vezes ocorrem nas demais, o que parece indicar que a identidade anatômica da espécie também é preservada, em nível quantitativo; há poucas exceções. O comprimento da fibra, por exemplo, está correlacionado com muitas outras características, mas apenas em poucas espécies. Chama a atenção o fato de, em quatro espécies, as fibras mais longas estarem associadas a espessuras maiores da parede. Também, essas fibras mais longas são acompanhadas por raios mais largos, o que parece mera coincidência. Nas coníferas, por exemplo, os traqueídeos são longos, mas os raios são muito finos.

Quadro 4 - Correlações entre as principais características anatômicas da madeira de mogno

Variável	CFb	DLFb	LFb	EPFb	PFb	CV	DV	EPV	LV	NV	PV	DLV	CPA	PPA	LPA	LR	PR
CFb	1,00	-0,48	0,46	0,85*	-0,20	0,02	0,83*	0,84*	0,84*	-0,19	0,51	0,83*	-0,77*	-0,15	0,43	0,95*	-0,25
DLFb	-0,48	1,00	0,48	-0,73*	-0,10	0,51	-0,51	-0,51	-0,26	-0,29	0,19	-0,51	0,59	0,34	-0,29	-0,36	0,18
LFb	0,46	0,48	1,00	0,13	-0,25	0,41	0,34	0,33	0,48	-0,39	0,66	0,34	-0,13	0,07	-0,04	0,46	-0,05
PFb	-0,20	-0,10	-0,25	0,15	1,00	-0,24	-0,29	-0,07	-0,51	-0,72*	-0,62	-0,31	0,36	-0,18	-0,69	-0,30	-0,70
CV	0,02	0,51	0,41	-0,44	-0,24	1,00	0,09	0,17	0,45	-0,21	0,70	0,08	0,47	0,16	-0,28	-0,00	-0,33
DV	0,83*	-0,51	0,34	0,67	-0,29	0,09	1,00	0,96*	0,84*	-0,08	0,63	1,00*	-0,60	-0,45	0,37	0,80*	-0,21
EPV	0,84*	-0,51	0,33	0,70	-0,07	0,17	0,96*	1,00	0,82*	0,01	0,59	0,95*	-0,51	-0,38	0,16	0,75*	-0,48
LV	0,84*	-0,26	0,48	0,47	-0,51	0,45	0,84*	0,82*	1,00	-0,40	0,85*	0,84*	-0,53	-0,06	0,42	0,81*	-0,18
NV	-0,19	-0,29	-0,39	0,15	0,72*	-0,21	-0,08	0,01	-0,40	1,00	-0,58	-0,09	0,42	-0,72*	-0,43	-0,19	-0,48
PV	0,51	0,19	0,66	0,02	-0,62	0,70	0,63	0,59	0,85*	-0,58	1,00	0,63	-0,20	0,10	0,19	0,49	-0,05
DLV	0,83*	-0,51	0,34	0,66	-0,31	0,08	1,00*	0,95*	0,84*	-0,09	0,63	1,00	-0,61	-0,45	0,39	0,80*	-0,19
CPA	-0,77*	0,59	-0,13	-0,78*	0,36	0,47	-0,60	-0,51	-0,53	0,42	-0,20	-0,61	1,00	-0,07	-0,73*	-0,75*	-0,5
PPA	-0,15	0,34	0,07	-0,31	-0,18	0,16	-0,45	-0,38	-0,06	-0,72*	0,10	-0,45	-0,07	1,00	-0,03	-0,25	0,14
LPA	0,43	-0,29	-0,04	0,35	-0,69	-0,28	0,37	0,16	0,42	-0,43	0,19	0,39	-0,73*	-0,03	1,00	0,61	0,64
ALR	-0,01	0,66	0,56	-0,43	-0,37	0,82*	0,11	0,07	0,36	-0,14	0,63	0,12	0,43	-0,14	-0,03	0,13	0,00
LR	0,95*	-0,36	0,46	0,79*	-0,30	-0,00	0,80*	0,75*	0,81	-0,19	0,49	0,80*	-0,75*	-0,25	0,61	1,00	-0,07
PR	-0,25	0,18	-0,05	-0,28	-0,70	-0,33	-0,21	-0,48	-0,18	-0,48	-0,05	-0,19	-0,25	0,14	0,64	-0,07	1,00

* Significativo a 5% de probabilidade.

CFb = comprimento da fibra, DLFb = diâmetro do lúmen da fibra, LFb = largura da fibra, EPFb = espessura da parede da fibra, PFb = proporção de fibras, CV = comprimento do elemento do vaso, DV = diâmetro do vaso, EPV = espessura do vaso, LV = largura do vaso, NV = número de vasos, PV = proporção de vasos, DLV = diâmetro do lúmen do vaso, CPA = comprimento do parênquima axial, PPA = proporção de parênquima axial, LPA = largura do parênquima axial, ALR = altura do raio, LR = largura do raio e PR = proporção de raios.

Quadro 5 - Número de vezes em que ocorre correlação significativa positiva (1º dígito) ou negativa (2º dígito) em sete espécies

Variável	CFb	DLFb	LFb	EPFb	PFb	CV	DV	EPV	LV	NV	PV	DLV	CPA	PPA	LPA	ALR	LR	PR
CFb	-																	
DLFb	1-0	-																
LFb	1-0	3-0	-															
EPFb	4-0	0-5	0-2	-														
PFb	-	1-0	1-0	-	-													
CV	2-0	1-0	2-0	0-1	1-0	-												
DV	2-1	1-0	1-0	-	-	2-0	-											
EPV	2-0	-	-	1-0	-	-	1-0	-										
LV	2-0	-	-	-	1-0	2-0	2-0	1-0	-									
NV	1-1	1-1	0-1	0-1	0-1	0-2	0-1	0-1	0-1	-								
PV	1-0	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	-	-	2-0	1-0	-							
DLV	2-1	1-0	1-0	-	-	2-0	7-0	1-0	2-0	1-0	-	-						
CPA	1-0	-	1-0	0-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
PPA	0-1	0-3	0-3	2-0	0-1	0-1	-	-	-	1-1	1-0	-	-	-				
LPA	0-1	2-0	2-0	0-1	-	2-0	1-0	-	0-1	-	-	1-0	2-0	-	-			
ALR	-	-	-	-	-	1-0	-	-	-	0-1	-	-	1-0	0-1	1-1	-		
LR	4-0	-	-	1-0	1-0	2-0	2-1	1-0	2-0	0-1	-	0-3	2-0	-	-	-	-	
PR	-	0-1	0-1	-	0-3	0-1	-	-	-	1-0	1-0	-	1-1	2-0	1-0	-	0-1	-

CFb = comprimento da fibra, DLFb = diâmetro do lúmen da fibra, LFb = largura da fibra, EPFb = espessura da parede da fibra, PFb = proporção de fibras, CV = comprimento do elemento do vaso, DV = diâmetro do vaso, EPV = espessura do vaso, LV = largura do vaso, NV = número de vasos, PV = proporção de vasos, DLV = diâmetro do lúmen do vaso, CPA = comprimento do parênquima axial, PPA = proporção de parênquima axial, LPA = largura do parênquima axial, ALR = altura do raio, LR = largura do raio e PR = proporção de raios.

A inexistência de correlação parece até mais interessante. A proporção de vasos, por exemplo, raramente está associada às outras características. Também, é possível encontrar correlações significativas quando se agrupam as espécies e se usam os valores médios das características. No Quadro 6, mostram-se as correlações encontradas no grupo de 23 espécies. Os valores foram baixos, exceto naquelas situações de correlação óbvia. Em geral, as espécies de fibras mais longas as têm de paredes mais espessas; as fibras são também mais abundantes. A proporção de fibras está relacionada, de maneira negativa, com todas as dimensões de parênquima. A interessante relação positiva entre diâmetros de lúmen de fibras e de vasos e deste último com a proporção de vasos, deve ser muito importante para a densidade da madeira. As correlações sempre positivas entre comprimentos de fibra, de vasos e de parênquima se mostraram curiosas e talvez estivessem ligadas à atividade cambial.

Como mencionado anteriormente, as correlações para o total de espécies foram baixas ou inexistentes. O exame das dispersões, no entanto, permitiu verificar certas tendências que o mero exame dos coeficientes não indica. Na Figura 10, por exemplo, mostra-se a dispersão obtida quando se plota diâmetro dos vasos contra espessura da parede da fibra. Os pontos parecem indicar a existência de duas seqüências, uma mais abaixo e mais numerosa, que se poderia ajustar bem a um modelo assintótico, e outra mais acima, também decrescente e aparentemente paralela à primeira. Quatro espécies de madeira constituem a seqüência menos numerosa: *Andira sp.*, *Vochysia divergens*, *Vochysia haekiana* e *Curatella americana*. Algo semelhante parece ocorrer quanto se têm comprimento e espessura da parede da fibra (Figura 11). Houve duas seqüências aproximadamente lineares e crescentes, além de um agrupamento de espécies de paredes finas, mas de comprimentos variáveis. Encontraram-se, na seqüência linear inferior, quatro das espécies de eucalipto, além das espécies *Curatella americana*, *Aspidosperma cylindrocarpon*, *Vochysia haekiana* e *Neea sp.* Esse fenômeno merece maiores estudos, com maior número de espécies.

Quadro 6 - Correlações entre os valores médios das características anatómicas de 23 espécies de madeira

Variável	CFb	DLFb	LFb	EPFb	PFb	CV	DV	EPV	LV	NV	PV	DLV	CPA	PPA	LPA	ALR	LR	PR
CFb	1,00	-0,19	0,53*	0,76*	-0,75*	0,48*	-0,01	0,22	0,05	-0,00	-0,18	-0,02	0,66*	0,47*	0,33	0,61*	0,73*	0,69*
DLFb	-0,19	1,00	0,56*	-0,49*	0,13	-0,15	0,75*	0,39	0,70*	-0,48*	-0,46*	0,75*	0,10	0,27	0,39	-0,04	-0,16	-0,27
LFb	0,53*	0,56*	1,00	0,45*	-0,44*	0,46*	0,48*	0,47*	0,55*	-0,28	-0,47*	0,47*	0,43*	0,42*	0,40	0,70*	0,60*	0,44*
EPFb	0,76*	-0,49*	0,45*	1,00	-0,60*	0,65*	-0,30	0,07	-0,18	0,22	-0,00	-0,31	0,35	0,15	-0,00	0,78*	0,81*	0,76*
PFb	-0,75*	0,13	-0,44*	-0,60*	1,00	-0,25	-0,06	-0,28	-0,05	0,20	0,36	-0,05	-0,51*	-0,82*	-0,51*	-0,54*	-0,60*	-0,72*
CV	0,48*	-0,15	0,46*	0,65*	-0,25	1,00	-0,04	0,03	0,16	0,13	0,10	-0,04	-0,03	-0,10	-0,27	0,64*	0,51*	0,49*
DV	-0,01	0,75*	0,48*	-0,30	-0,06	-0,04	1,00	0,49*	0,90*	-0,73*	-0,60*	1,00*	0,19	0,42*	0,45*	0,10	0,00	-0,07
EPV	0,22	0,39	0,47*	0,07	-0,28	0,03	0,49*	1,00	0,54*	-0,59*	-0,70*	0,46*	0,22	0,49*	0,54*	0,35	0,25	0,22
LV	0,05	0,70*	0,55*	-0,18	-0,05	0,16	0,90*	0,54*	1,00	-0,68*	-0,58*	0,90*	0,19	0,33	0,40	0,14	0,05	0,02
NV	-0,00	-0,48*	-0,28	0,22	0,20	0,13	-0,73*	-0,59*	-0,68*	1,00	0,86*	-0,72*	-0,36	-0,47*	-0,42*	-0,20	-0,18	-0,21
PV	-0,18	-0,46*	-0,47*	-0,00	0,36	0,10	-0,60*	-0,70*	-0,58*	0,86*	1,00	-0,59*	-0,52*	-0,58*	-0,50*	-0,37	-0,34	-0,41
DLV	-0,02	0,75*	0,47*	-0,31	-0,05	-0,04	1,00*	0,40*	0,90*	-0,72*	-0,59*	1,00	0,18	0,41	0,44*	0,09	-0,01	-0,08
CPA	0,66*	0,10	0,43*	0,35	-0,51*	-0,03	0,19	0,22	0,19	-0,36	-0,52*	0,18	1,00	0,51*	0,53*	0,39	0,60*	0,45*
PPA	0,47*	0,27	0,42*	0,15	-0,82*	-0,10	0,42*	0,49*	0,33	0,47*	-0,58*	0,41	0,51*	1,00	0,79*	0,22	0,26	0,31
LPA	0,33	0,39	0,40	-0,000	-0,51*	-0,27	0,45*	0,54*	0,40	-0,42*	-0,50*	0,44*	0,53*	0,79*	1,00	0,05	0,13	0,06
ALR	0,61*	-0,04	0,70*	0,78*	-0,54*	0,64*	0,10	0,35	0,14	-0,20	-0,37	0,09	0,39	0,22	0,05	1,00	0,93*	0,78*
LR	0,73*	-0,16	0,60*	0,81*	-0,60*	0,51*	0,00	0,25	0,05	-0,18	-0,34	-0,01	0,60*	0,26	0,13	0,93*	1,00	0,82*
PR	0,69*	-0,27	0,44*	0,76*	-0,72*	0,49*	-0,07	0,22	0,02	-0,21	-0,41	-0,08	0,45*	0,31	0,06	0,78*	0,82*	1,00

* Significativo a 5% de probabilidade.

CFb = comprimento da fibra, DLFb = diâmetro do lúmen da fibra, LFb = largura da fibra, EPFb = espessura da parede da fibra, PFb = proporção de fibras, CV = comprimento do elemento do vaso, DV = diâmetro do vaso, EPV = espessura do vaso, LV = largura do vaso, NV = número de vasos, PV = proporção de vasos, DLV = diâmetro do lúmen do vaso, CPA = comprimento do parênquima axial, PPA = proporção de parênquima axial, LPA = largura do parênquima axial, ALR = altura do raio, LR = largura do raio e PR = proporção de raios.

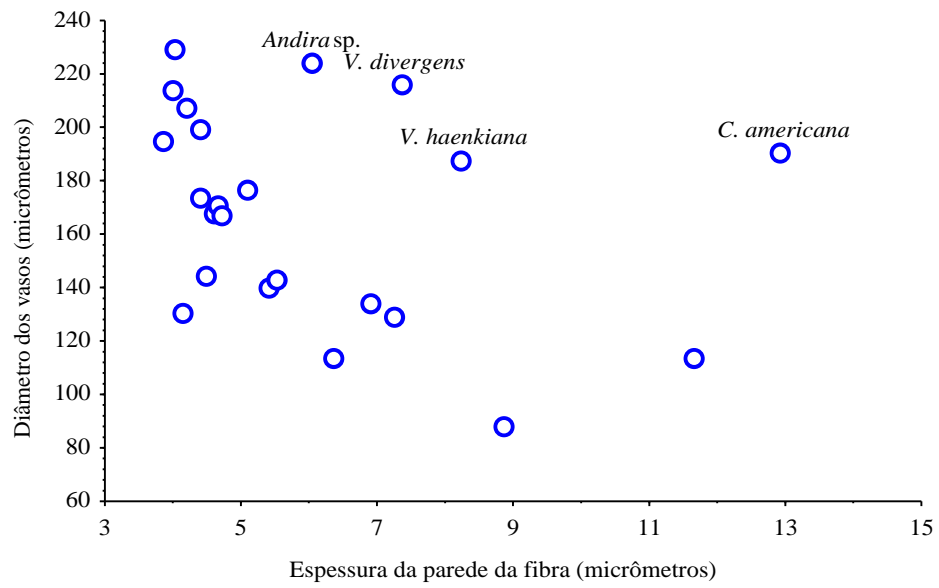


Figura 10 - Valores médios do diâmetro dos vasos de 23 espécies de madeira, plotados contra o valor médio da espessura da parede das fibras.

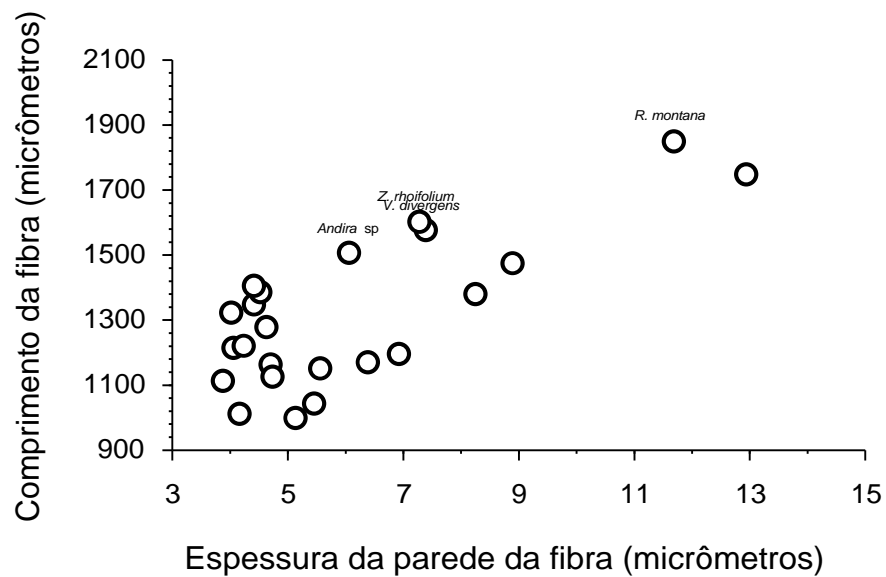


Figura 11 - Valores médios do comprimento de fibras de 23 espécies de madeira, plotados contra a espessura média dessas fibras.

4.5.2. Correlações entre as propriedades mecânicas e as correspondentes anatomia e composição química da madeira

As propriedades mecânicas apresentam associação significativa com muitas das características anatômicas, em especial aquelas que dizem respeito às fibras e aos vasos, e com a composição química (Quadro 7). Este quadro foi obtido quando se usaram os valores de todas as espécies e pode ser diferente para espécies individuais ou certos grupos.

Chama a atenção, no referido quadro, a importância da proporção dos tecidos, característica raramente determinada. O diâmetro do lúmen das fibras, sua largura e seu índice de enfiletramento foram também muito importantes, como era esperado. Entretanto, não se encontrou relação significativa entre comprimento das fibras e resistência à compressão, o que é surpreendente, pois essa variável está presente no índice de enfiletramento. Esperava-se que o teor de extrativos mostrasse relação com a resistência à compressão, o qual, no entanto, foi também correlacionado com a resistência ao cisalhamento. De qualquer modo, os coeficientes de correlação, mesmo quando significativos, foram baixos, indicando, talvez, o comportamento muito diferenciado entre espécies. No Quadro 8, mostram-se os coeficientes de correlação para uma única espécie, *Schyzolobium amazonicum*. O número de associações significativas é muito menor; os coeficientes de correlação, entretanto, atingem valores mais elevados, em comparação com os das espécies agrupadas.

As propriedades mecânicas podem ser previstas quando se empregam modelos matemáticos que usam como variáveis independentes uma ou mais características anatômicas ou valores de composição química. Em algumas situações, há necessidade de criar novas variáveis a partir daquelas medidas diretamente nas amostras. A precisão alcançada varia entre as propriedades mecânicas e, dentro da mesma propriedade, com o maior ou menor número de espécies que o modelo deve representar.

Quadro 7 - Correlações entre os valores médios das propriedades mecânicas e características anatômicas e químicas de 23 espécies de madeira

Variáveis	CFb	DLFb	LFb	EPFb	PFb	INFB	COEFb	APFb	AVZFb	CV	DV	EPV	LV	NV	PV	INFV	DLV	COEFV	CPA	PPA	LPA	CPALPA	ALR	LR	ALTLR	PR	AT	AQ	LIG
COMPS	0,02	-0,67*	-0,49*	0,30*	0,23*	0,57*	-0,66*	-0,13	-0,57*	0,03	-0,50*	-0,04	-0,42*	0,51*	0,48*	0,52*	-0,50*	0,17	-0,27*	-0,40*	-0,46*	0,03	-0,17	-0,18	0,11	-0,17	0,20*	0,23*	0,07
CISRAD	-0,14	-0,64*	-0,40*	0,33*	0,09	0,38*	-0,63	-0,01	-0,58*	-0,01	-0,47*	0,02	-0,51*	0,43*	0,25*	0,50*	-0,47*	0,32*	-0,42*	-0,35*	-0,46*	-0,04	0,04	-0,01	0,20	0,12	0,23*	0,46*	-0,17
CISTAN	-0,20	-0,63*	-0,45*	0,26*	0,25*	0,39*	-0,60*	-0,09	-0,55*	0,04	-0,52*	-0,08	-0,54*	0,60*	0,41*	0,62*	-0,53*	0,32*	-0,46*	-0,51*	-0,49*	-0,08	-0,02	-0,06	0,17	-0,07	0,19	0,49*	-0,19
FLEX	-0,28*	-0,66*	-0,61*	0,07	0,32*	0,54*	-0,58*	-0,35*	-0,53*	-0,09	-0,44*	-0,21	-0,45*	0,59*	0,58*	0,50*	-0,44*	0,31*	-0,48*	-0,49*	-0,40*	-0,22	-0,32*	-0,31*	0,04	-0,31*	0,21	0,32*	-0,23*
MOE	-0,27*	-0,58*	-0,53*	0,07	0,41*	0,44*	-0,53*	-0,30*	-0,46*	-0,05	-0,35*	-0,09	-0,32*	0,50*	0,51*	0,42*	-0,35*	0,24*	-0,47*	-0,50*	-0,36*	-0,24*	-0,30*	-0,34*	0,18	-0,36*	0,07	0,17	-0,25*

COMPS = resistência à compressão paralela às fibras, CISRAD = resistência ao cisalhamento no plano radial, CISTANG = resistência ao cisalhamento no plano tangencial, FLEX = resistência à flexão, MOE = módulo de elasticidade à flexão, CFb = comprimento da fibra, DLFb = diâmetro do lúmen da fibra, LFb = largura da fibra, EPFb = espessura da parede da fibra, PFb = proporção de fibras, INFB = índice de flexibilidade da fibra, COEFb = coeficiente de enfiamento da fibra, APFb = área de parede da fibra, AVZFb = área de vazios da fibra, CV = comprimento do elemento do vaso, DV = diâmetro do vaso, EPV = espessura da parede do vaso, LV = largura do vaso, NV = número de vaso, INFV = índice de inflexibilidade do vaso, DLV = diâmetro do lúmen do vaso, COEFV = coeficiente de enfiamento do vaso, CPA = comprimento do parênquima axial, PPA = proporção de parênquima axial, LPA = largura do parênquima axial, CPALPA = índice de flexibilidade do parênquima axial, ALR = altura do raio, LR = largura do raio, ALTLR = índice de flexibilidade do raio, PR = proporção de raios, AT = teor de extrativos em álcool/tolueno, AQ = teor de extrativos em água quente e LIG = proporção de lignina.

Quadro 8 - Correlações entre os valores médios das propriedades mecânicas e características anatômicas e químicas da madeira de pinho-cuiabano

Variáveis	CFb	DLFb	LFb	EPFb	PFb	INFB	COEFb	APFb	AVZFb	CV	DV	EPV	LV	NV	PV	INFV	DLV	COEFV	CPA	PPA	LPA	CPALPA	ALR	LR	ALTLR	PR	AT	AQ	LIG
COMPS	0,98*	-0,78*	-0,72*	0,89*	-0,58	0,77*	-0,76	-0,00	-0,84*	-0,51	0,44	-0,02	0,18	0,53	0,60	-0,68*	0,44	0,28	-0,18	0,52	-0,90*	0,58	0,80*	0,42	-0,40	0,58	0,59	0,79*	-0,44
CISRAD	0,75*	-0,67*	-0,60	0,85*	-0,24	0,59	-0,67*	0,08	-0,74*	-0,45	0,51	-0,36	-0,05	0,20	0,15	-0,40	0,52	0,46	-0,15	0,24	-0,78*	0,50	0,57	0,09	-0,11	0,24	0,90*	0,86*	-0,81*
CISTAN	0,73*	-0,55	-0,49	0,67*	-0,19	0,46	-0,47	0,13	-0,65	-0,43	0,72*	-0,12	-0,18	0,14	0,16	-0,29	0,72*	0,70*	0,30	0,16	-0,61	0,73*	0,53	-0,10	0,08	0,20	0,54	0,88*	-0,68*
FLEX	0,91*	-0,66	-0,58	0,85*	-0,38	0,62	-0,65	0,15	-0,73*	-0,34	0,62	-0,22	0,30	0,41	0,33	-0,59	0,62	0,38	-0,17	0,38	-0,81*	0,51	0,73	0,23	-0,21	0,33	0,62	0,76*	-0,49
MOE	0,92*	-0,76*	-0,69*	0,91*	-0,41	0,71*	0,74*	0,03	-0,83*	-0,49	0,55	-0,26	0,14	0,41	0,34	-0,60	0,55	0,40	-0,16	0,41	-0,84*	0,54	0,67*	0,25	-0,25	0,37	0,72*	0,84*	-0,63

COMPS = resistência à compressão paralela às fibras, CISRAD = resistência ao cisalhamento no plano radial, CISTANG = resistência ao cisalhamento no plano tangencial, FLEX = resistência à flexão, MOE = módulo de elasticidade à flexão, CFb = comprimento da fibra, DLFb = diâmetro do lúmen da fibra, LFb = largura da fibra, EPFb = espessura da parede da fibra, PFb = proporção de fibras, INFB = índice de flexibilidade da fibra, COEFb = coeficiente de enfiamento da fibra, APFb = área de parede da fibra, AVZFb = área de vazios da fibra, CV = comprimento do elemento do vaso, DV = diâmetro do vaso, EPV = espessura da parede do vaso, LV = largura do vaso, NV = número de vaso, INFV = índice de inflexibilidade do vaso, DLV = diâmetro do lúmen do vaso, COEFV = coeficiente de enfiamento do vaso, CPA = comprimento do parênquima axial, PPA = proporção de parênquima axial, LPA = largura do parênquima axial, CPALPA = índice de flexibilidade do parênquima axial, ALR = altura do raio, LR = largura do raio, ALTLR = índice de flexibilidade do raio, PR = proporção de raios, AT = teor de extrativos em álcool/tolueno, AQ = teor de extrativos em água quente e LIG = proporção de lignina.

4.5.2.1. Resistência à compressão

Modelos lineares simples, do tipo $Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 \dots \pm epe$, com apenas duas ou três variáveis independentes, podem ser utilizados para explicar, com precisão, variação nos valores de resistência à compressão. Se X_1 é ESPAÇOF, uma variável que representa o espaço ocupado pela parede das fibras, em certa área unitária de madeira, é obtida pela multiplicação da proporção de fibras pelo quociente entre a área da parede da fibra e a área total da fibra; se X_2 é AT, a proporção de solúveis em álcool/tolueno é uma equação da fórmula

$$COMPS = -33,20 + 177,80 \times ESPAÇOF + 3,33 \times AT$$

explicou 96,35% da variação nos valores de resistência à compressão de *E. grandis*, com erro-padrão da estimativa de 2,68 MPa.

A variável ESPAÇOF não foi adequada em todas as situações. Na espécie *Pithecelobium sp.*, por exemplo, o índice de enfiamento (INFb), juntamente com o teor de lignina, explicou 99,7% da variação em resistência à compressão. A equação tomou a forma

$$COMPS = 2,30 + 0,822 \times INFb - 1,87 \times LIG$$

com estimativa de erro de tão-somente 0,230 MPa. O sinal negativo do termo que representa o teor de lignina se mostrou de aceitação difícil. Se o termo for removido, ainda assim o modelo em apenas INFb teria um coeficiente de determinação superior a 0,97.

A variável ESPAÇOF, assim como o teor de lignina, era também importante quando se desejava estimar a resistência à compressão de todo o grupo de eucaliptos. O coeficiente de determinação era de 0,769, mas o erro-padrão de estimativa era elevado, de 8,15 MPa. Alguns dos resíduos tinham valor inaceitável e estavam associados, frequentemente, com a madeira retirada das vizinhanças da medula. Novas variáveis poderiam ser incluídas no modelo, com efeito negligível na redução dos desvios. Isso parece indicar que a madeira

juvenil tem propriedades, talvez submicroscópicas, que são importantes para a resistência mecânica, mas que não puderam ser determinadas neste trabalho.

As mesmas duas variáveis ESPAÇOF e LIG poderiam ser empregadas para descrever o comportamento à compressão do grupo de 23 espécies. Embora essas variáveis fossem mais bem correlacionadas, o resultado foi medíocre. Uma nova variável, SQCF, criada pela extração da raiz quadrada do comprimento da fibra, elevou o coeficiente de determinação até o valor de 0,721, com erro-padrão de 8,30 MPa, muito elevado. Esse foi o modelo simples de coeficiente de determinação mais elevado.

Uma única variável foi capaz de explicar 74,5% da variabilidade em resistência à compressão do grupo de 23 espécies. A variável, denominada SUMESPA, representava o espaço ocupado, numa área unitária, pelas paredes das fibras, dos vasos e do parênquima. A equação tinha a forma

$$COMPS = -7,40 + 129,47 \times SUMESPA$$

com erro-padrão de 7,92 MPa. Os valores observados e previstos, nesse caso, estão representados na Figura 12.

Os comentários anteriores dizem respeito à situação em que se usaram valores individuais para obtenção dos coeficientes dos modelos. Também, pode-se trabalhar com os valores médios de cada uma das 23 espécies. De maneira diferente do que geralmente acontece, o emprego dos valores médios leva à redução dos coeficientes de determinação e ao aumento dos erros de estimativa. Além disso, a explicação para a variabilidade da resistência à compressão exige a presença de maior número de variáveis, para levar em conta a grande diferença entre as propriedades das espécies. O modelo mais simples que se pôde obter continha a variável SUMESPA mais a variável que representava o teor de extrativos em álcool/tolueno e a variável que representava a largura dos raios. A equação final foi

$$COMPS = 8,92 + 125,55 \times SUMESPA + 0,77 \times AT - 0,032 \times LR$$

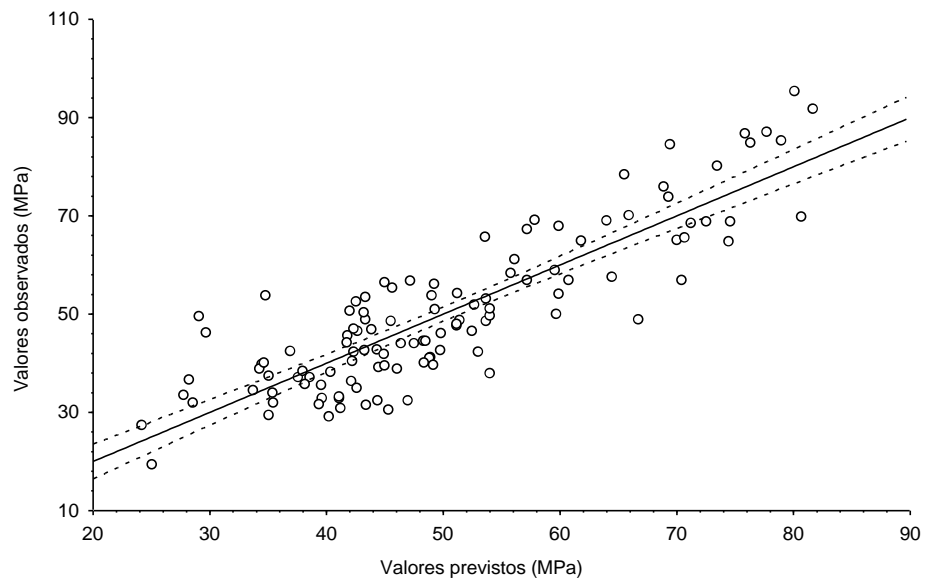


Figura 12 - Valores observados e previstos na resistência à compressão paralela às fibras com os dados das 23 espécies de madeira.

O coeficiente de determinação foi igual a 0,817, com erro-padrão de estimativa de 6,14 MPa. Os valores estimados e observados estão representados na Figura 13.

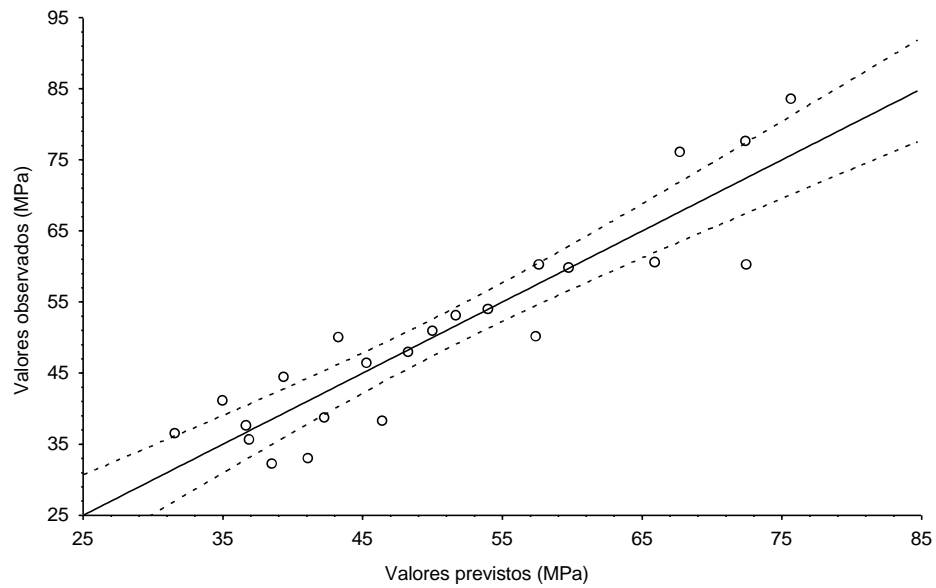


Figura 13 - Valores observados e previstos na resistência à compressão paralela às fibras com os dados médios das 23 espécies de madeira.

4.5.2.2. Resistência ao cisalhamento no plano radial

A predição dessa propriedade, quando se usam espécies isoladas, não é difícil. O mesmo modelo linear anterior, quando ajustado aos dados da espécie *Schyzolobium amazonicum*, por exemplo, deu origem à equação

$$CISRAD = 15,74 + 18,21 \times ESPAÇOF - 0,869 \times NV - 0,309 \times LPA$$

em que

NV = número de vasos por mm^2 ; e

LPA = largura do parênquima axial.

O coeficiente de determinação atingiu 0,96, com erro-padrão de 0,31 MPa. A Figura 14 ilustra esse ajuste. Nota-se, na referida equação, que os termos em NV e LPA têm sinal negativo.

Infelizmente, esse mesmo modelo, com essas mesmas variáveis, não se ajustou a outras espécies. A espécie *Pithecelobium* sp., por exemplo, exigiu a presença das variáveis que representam a espessura da parede e o comprimento dos vasos, além da que representa a altura dos raios. O coeficiente de determinação era também elevado. Outras espécies requereram ainda outras variáveis. Em todas as situações, no entanto, pôde-se perceber a importância de componentes anatômicos, como vasos, parênquima e raios, para predição dessas propriedades, ao contrário do que foi percebido quando se analisou a resistência à compressão, para cuja predição as fibras foram mais importantes.

Em decorrência dessa grande variação do comportamento das espécies quando analisadas separadamente, o ajuste de modelos às informações individuais do grupo de 19 espécies não foi bem-sucedido. Grande número de variáveis foi aceito, tornando o modelo de manuseio difícil. Retiradas algumas dessas variáveis, puderam-se obter equações mais simples, uma, muito simples, com o formato

$$CISRAD = -2,70 + 24,70 \times SUMESPA + 0,127 \times PR$$

O coeficiente de determinação foi igual a 0,61, com erro-padrão de estimativa de 2,07MPa. Os resíduos, embora não mostrassem qualquer tendência, foram, infelizmente, elevados em algumas espécies.

Esse mesmo modelo simples foi ajustado aos valores médios da resistência ao cisalhamento radial das 19 espécies. A equação final foi

$$CISRAD = 3,47 + 26,28 \times SUMESPA + 0,132 \times PR$$

com pequeno ganho na determinação ($R^2 = 0,757$) e pequena redução no erro-padrão da estimativa (1,33 MPa). Os valores observados e previstos estão representados na Figura 15. Deve-se ressaltar, nessas duas últimas equações, a

contribuição positiva da proporção dos raios, o que parece contraditório. Esperava-se, nessa orientação do esforço de cisalhamento, que proporções elevadas de raios deveriam reduzir a resistência. Talvez o plano que continha os raios não fosse assim tão fraco. Também, deve-se levar em consideração o fato de que, embora os esforços de cisalhamento sejam pouco complexos quando comparados, por exemplo, com esforços de flexão, eles sofrem influência decisiva do plano em que o esforço é aplicado. Se corpos de prova da mesma madeira são confeccionados, mas em alguns deles o plano de cisalhamento inclui grande área contendo madeira de lenho inicial, outros corpos de prova, regiões com predominância de lenho tardio e, ainda, outras regiões contendo elementos orientados, como vasos em anel etc., deve-se esperar variação entre os valores de resistência.

Cumpra também destacar o fato de que, embora os ensaios para determinação da resistência ao cisalhamento sejam de concepção e execução fáceis, eles têm sempre recebido muitas críticas. Para alguns pesquisadores, não se consegue cisalhamento puro nos ensaios atuais. Há algum componente de esforço que causa fendilhamento ou flexão das amostras, e a distribuição de forças no interior delas não é uniforme. Os resultados estarão contaminados por esses fenômenos, o que pode explicar, talvez, a grande variabilidade no comportamento das espécies. É também interessante constatar a importância nula da composição química nos modelos analisados. O efeito dessas variáveis mostrou-se, quase sempre, não-significativo.

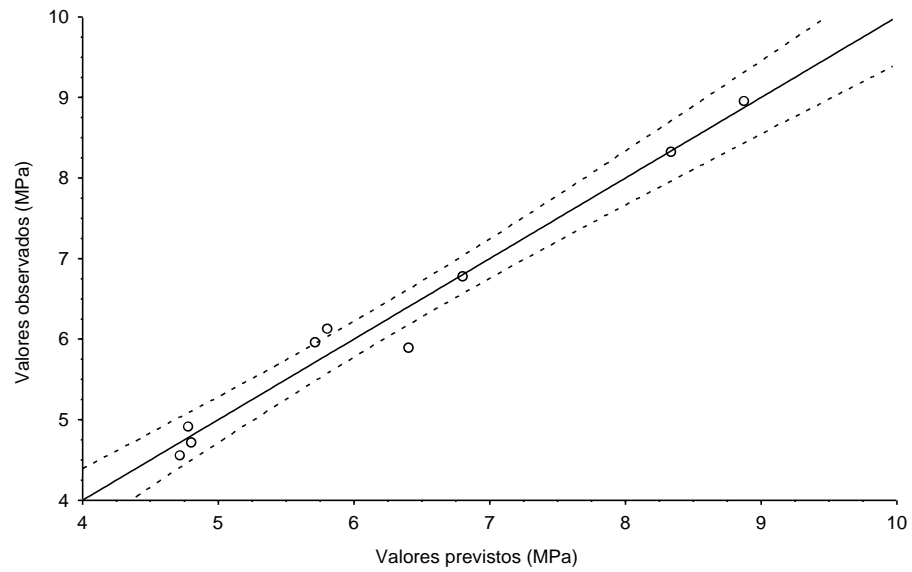


Figura 14 - Valores observados e previstos na resistência ao cisalhamento no plano radial com os dados da espécie de *Schyzolobium amazonicum*.

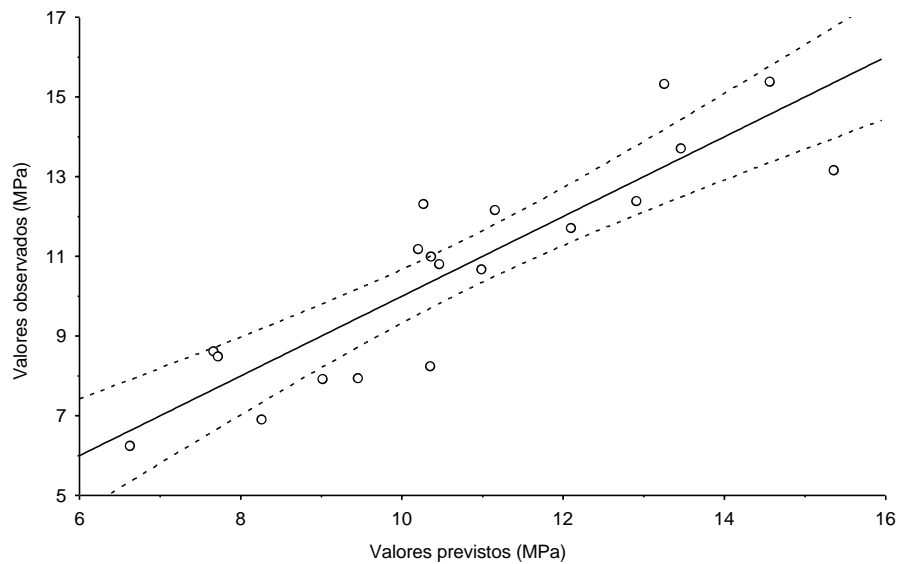


Figura 15 - Valores observados e previstos da resistência ao cisalhamento no plano radial com os dados médios das 23 espécies.

4.5.2.3. Resistência ao cisalhamento no plano tangencial

As normas de ensaio atuais, quando descrevem o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras, não especificam se o plano de cisalhamento deve ser o tangencial aos anéis de crescimento, se perpendicular a eles ou se oblíquo. Alguns pesquisadores têm relatado pequenas diferenças na resistência entre os dois planos. Assim, também neste trabalho (Quadro 2), a resistência ao cisalhamento no plano tangencial é ligeira, mas não significativamente superior à resistência no plano radial. Seria interessante descobrir se essa diferença está relacionada com alguma propriedade química ou anatômica.

Pelo exame do Quadro 7, não se observa muita distinção entre os coeficientes de correlação das resistências dos dois planos com as variáveis medidas, pelo menos para a média das 19 espécies. A resistência no plano tangencial indica correlação significativa com a proporção de fibras, o que não existe para o plano radial. Este, no entanto, parece ser afetado pelo teor de extrativos em álcool/tolueno. A situação parece bem diferente naquilo que tange às espécies individuais (Quadro 8). Assim, espera-se que variáveis importantes num dos planos não o sejam em outro.

De fato, as variáveis ESPAÇOF, NV e LPA, empregadas no modelo ajustado aos resultados de cisalhamento radial da madeira de *Schyzolobium amazonicum*, não se mostraram significativas quando aplicadas ao cisalhamento tangencial. A equação de melhor ajuste tinha o formato

$$CISTAN = -7,85 + 0,0264 \times CF - 0,236 \times LT - 0,0563 \times DLV$$

com coeficiente de determinação de 0,85 e erro-padrão da estimativa de 0,668 MPa inferiores à situação radial. A dispersão dos valores previstos e observados é ilustrada na Figura 16.

O ajuste aos valores individuais das 19 espécies requeria novas variáveis. A melhor equação tinha o formato

$$CISTAN = 0,411 + 24,60 \times ESPAÇOF + 0,218 \times NV + 0,00146 \times ALTR$$

com erro-padrão de 2,19 MPa e $R^2 = 0,689$. Esse ajuste também deixa a desejar. A dispersão dos valores previstos e observados pode ser vista na Figura 17. Vasos e raios continuam sendo importantes. Keller e Thiercelim (1975), citados por GONÇALEZ (1993), mencionaram que os raios são fatores que influenciam a resistência da madeira.

Percebeu-se, durante a análise desses dados, que a variável AQ, o teor de extrativos solúveis em água quente, mostrava-se tão fortemente associada com a resistência ao cisalhamento no plano radial, que a sua presença no modelo tornava não-significativo o efeito de qualquer outra variável. A razão para essa associação não é clara. Optou-se, portanto, pela exclusão dessa variável do modelo. Entretanto, quando se ajustou o modelo aos valores médios das 19 espécies, verificou-se que AQ só se tomava significativa na presença da variável que representava o somatório das áreas das paredes celulares, SUMESPA. Assim, obteve-se uma equação de formato

$$CISTAN = -3,62 + 29,27 \times SUMESPA + 0,389 \times AQ$$

que prevê, de maneira razoável, os valores de resistência ao cisalhamento tangencial. O coeficiente de determinação foi igual a 0,81, com erro-padrão da estimativa de 1,55 MPa, reconhecidamente alto.

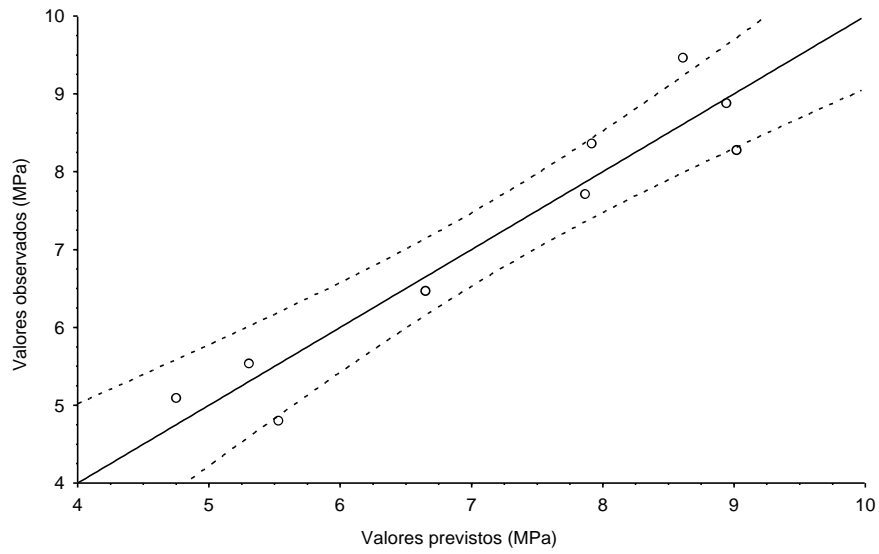


Figura 16 - Valores observados e previstos da resistência ao cisalhamento no plano tangencial com os dados da espécie de *Schyzolobium amazonicum*.

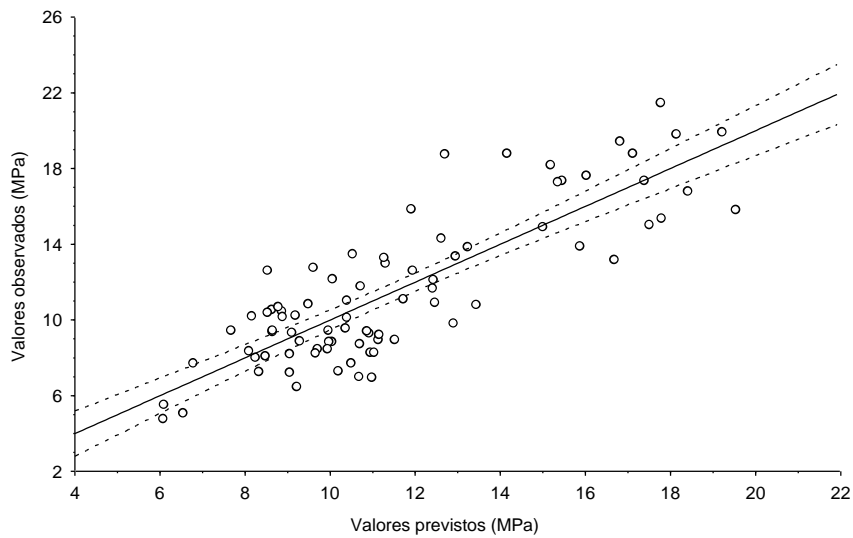


Figura 17 - Valores observados e previstos da resistência ao cisalhamento no plano tangencial com os dados de 19 espécies de madeira.

4.5.2.4. Resistência à flexão estática

As tentativas de explicar a variabilidade da resistência à flexão de espécies individuais não foram bem-sucedidas. Modelos simples, de coeficiente de determinação elevado e baixo erro-padrão, podem ser obtidos. Sua validade, no entanto, parece questionável. A equação

$$FLEX = -127,87 + 0,108 \times CFb + 0,171 \times DLV$$

por exemplo, obtida com os resultados da madeira de *Schyzolobium amazonicum*, tem $R^2 = 0,94$, com $epe = 3,96$ MPa. O sinal positivo do último termo não faz sentido. A retirada desse termo reduziu muito o coeficiente de determinação, tomando a nova equação quase inútil. A dispersão dos valores observados e previstos (Figura 18) é aceitável; no entanto, as três variáveis (FLEX, CF e DLV) estão correlacionadas com distância medula-casca. Assim, é possível que a equação acima reflita tão-somente essa correlação. Situações semelhantes aconteceram com as demais espécies.

A situação não melhorou quando se empregaram os valores individuais das 23 espécies. Grande número de variáveis tem efeito significativo na resistência. Um modelo contendo todas elas, no entanto, consegue explicar apenas 72% da variação na resistência, com resíduos muito elevados.

O ajuste aos valores médios das propriedades das 23 espécies foi mais bem-sucedido. Uma equação que previa a resistência média de uma espécie a partir dos valores médios das propriedades e era capaz de explicar 84,7% da variabilidade com erro-padrão da estimativa de 11,96 MPa tinha o formato

$$FLEX = 79,26 + 220,26 \times ESPAÇOF + 3,54 \times AT - 40,59 \times LOGALTR$$

O último termo lê-se “logaritmo na base 10 da altura do raio” e foi criado para levar em consideração as duas espécies que se destacaram muito pelas dimensões dos seus raios vasculares. A dispersão dos valores observados e previstos é mostrada na Figura 19. Houve, ainda, alguns resíduos elevados, especialmente nas espécies *Tectona grandis* e *E. cloeziana*, que não puderam ser explicados.

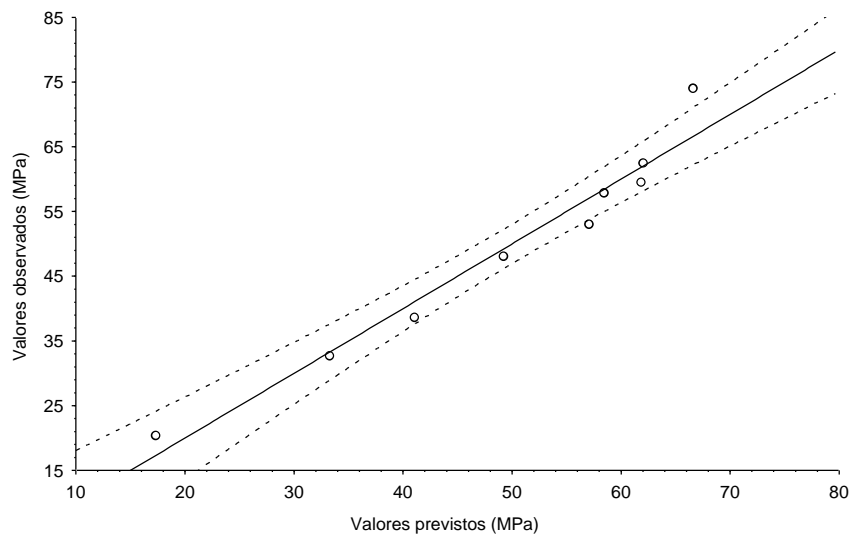


Figura 18 - Valores observados e previstos da resistência à flexão estática com os dados da espécie *Schyzolobium amazonicum*.

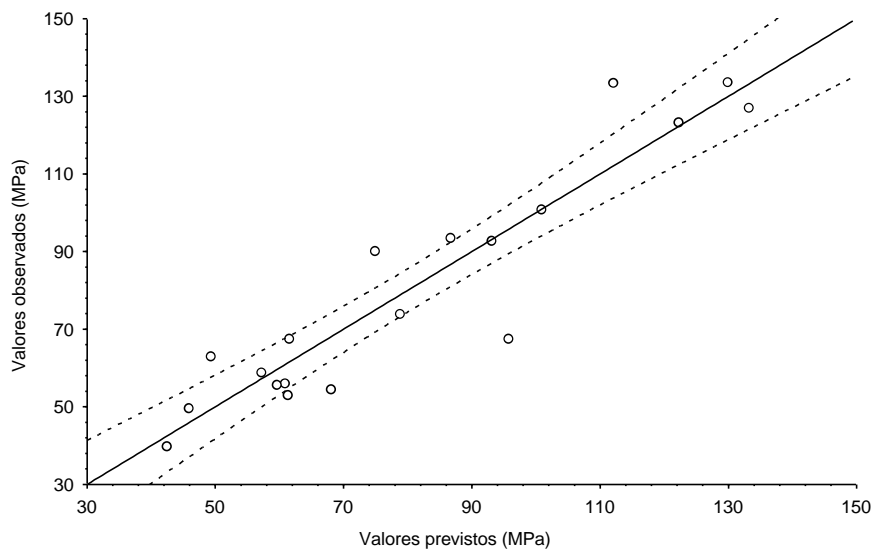


Figura 19 - Valores observados e previstos da resistência à flexão estática com os dados médios de 23 espécies de madeira.

A resistência à flexão, portanto, é de representação difícil em termos de modelo matemático, o que não é de estranhar. O fenômeno da flexão é de natureza complexa, pois nele estão envolvidas a resistência à compressão, à tração e ao cisalhamento. Além disso, a teoria de vigas, quando aplicada à madeira, é apenas aproximada, pois ela foi desenvolvida, considerando-se isotrópicos os materiais e a hipótese de que a madeira não satisfaz.

4.5.2.5. Módulo de elasticidade à flexão

O módulo de elasticidade, uma medida da rigidez dos materiais, é obtido por intermédio de procedimento laboratorial complexo, durante o qual amostras de madeira são submetidas a carregamento, enquanto se medem as deformações que elas sofrem. Um diagrama dito de tensão/deformação é obtido e interpretado, dele se obtendo a magnitude do módulo. Essa magnitude está, portanto, muito sujeita a erros de leitura e de interpretação. Assim, os valores são, freqüentemente, muito dispersos.

É possível, no entanto, obter, quando se utilizam espécies individuais, correlações muito acentuadas entre a rigidez e as características da madeira. O módulo da madeira *Pithecelobium* sp., por exemplo, pode ser estimado por uma equação simples, de formato

$$MOE = 25.727 + 4.340 \times ALT \times LR + 112,40 \times AT$$

com coeficiente de determinação de 0,87 e erro-padrão da estimativa de 497 MPa. A variável $ALT \times LR$ foi obtida pela multiplicação da altura dos raios pela sua largura. Apenas duas características anatômicas e uma de composição química explicaram quase toda a variação nos valores de laboratório.

Outra espécie pode requerer outras variáveis. A madeira de *Schyzolobium amazonicum*, por exemplo, exigiu, para estimar o módulo, o comprimento de fibras e a área de vazios no interior dessas fibras, além da proporção de raios. A equação tem o formato

$$MOE = 747,00 + 9,47 \times CF - 4,82 \times AVZFB - 401,50 \times PR$$

O erro-padrão foi de 443 kgf/cm², com coeficiente de determinação de 0,94. Vê-se, nessas duas espécies, que os raios lenhosos são importantes, pelo menos para predição dessa característica mecânica dessas madeiras.

Uma equação razoavelmente simples pode ser obtida para estimar o valor de MOE do grupo de seis espécies de eucaliptos. O coeficiente de determinação atingiu 0,63, com um erro-padrão da estimativa de 2.237 MPa. O formato dessa equação era

$$MOE = 29.805 + 19,21 \times Cfb - 4.931 \times ALT \times LR$$

Nos eucaliptos, portanto, dimensões de fibra são importantes, embora os raios lenhosos também explicassem pelo menos parte da variabilidade. Os valores previstos e observados podem ser vistos na Figura 20. Apesar de algumas discrepâncias, o ajuste pode ser considerado bom, especialmente quando se nota que o valor de MOE oscila entre 4.000 e 20.000 MPa.

O valor de MOE do grupo de espécies nativas pode também ser estimado por modelo simples. A melhor equação tem o formato

$$MOE = -1.761 + 18.824 \times ESPAÇOF + 307,00 \times ALTR - 218,00 \times AQ + 99,50 \times AT$$

O coeficiente de determinação desse ajuste foi igual a 0,67, com erro-padrão de 1.130 MPa. Mais uma vez, os raios mostraram-se importantes na predição da rigidez. O ajuste pode ser visto na Figura 21. Pôde-se também ajustar um modelo simples aos valores médios das 19 espécies. A equação resultante tinha o formato

$$MOE = -8.059 + 5.010 \times ESPAÇOF + 2,48 \times Cfb$$

O erro-padrão da estimativa desse ajuste era de 1.610 MPa, com coeficiente de determinação de 0,772. A dispersão dos valores observados e previstos pode ser vista na Figura 22.

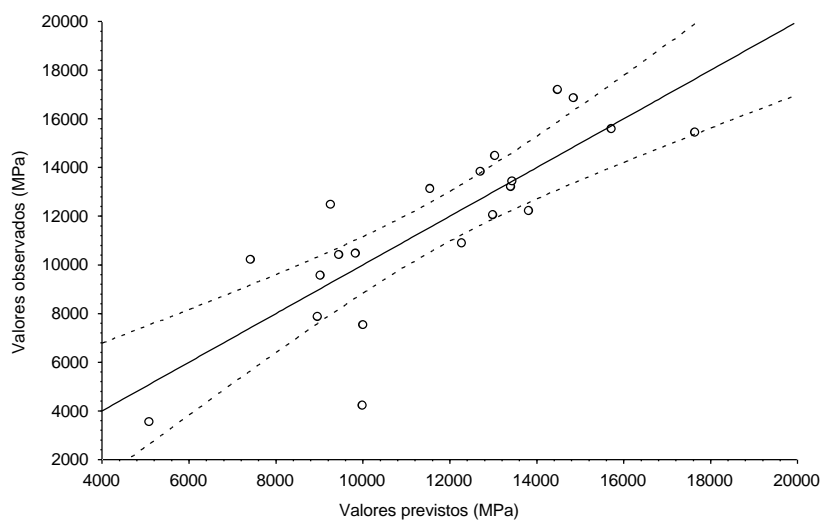


Figura 20 - Valores observados e previstos do módulo de elasticidade com os dados das madeiras de eucalipto.

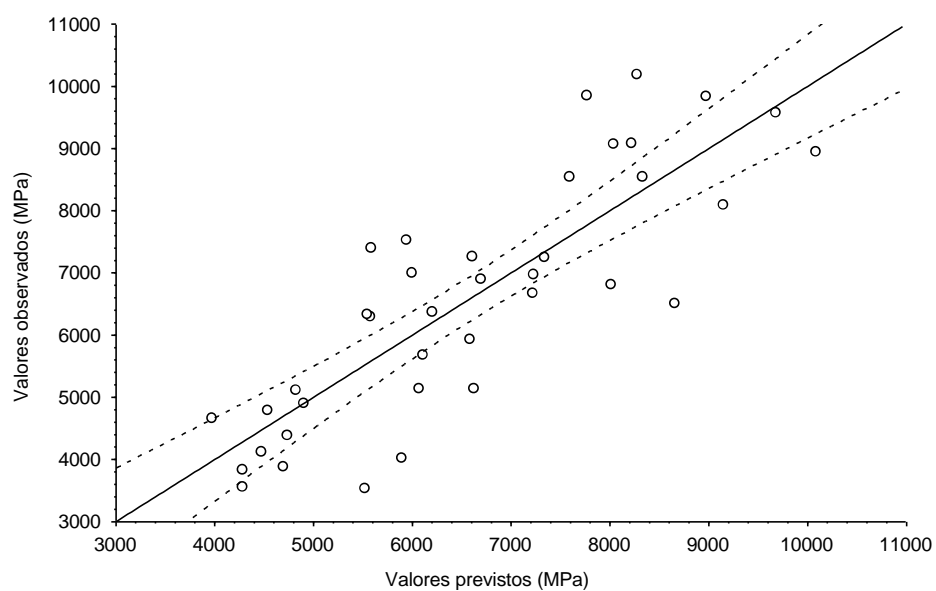


Figura 21 - Valores observados e previstos do módulo de elasticidade nas madeiras de espécies nativas.

4.5.3. Predição dos coeficientes de contração

A contração da madeira é um fenômeno complexo, ainda mal explicado, especialmente naquilo que tange à diferença entre contrações radial e tangencial. Grande número de fatores está envolvido nela, o que torna a predição difícil.

4.5.3.1. Contração radial

Não foi possível encontrar modelos simples que descrevessem a associação entre contração radial e características da madeira. A variabilidade dos valores da madeira de *Schyzolobium amazonicum*, por exemplo, pode ser explicada perfeitamente ($R^2 = 0,99$), mas apenas por uma equação contendo cinco variáveis:

$$CONRAD = -3,11 + 22,53 \times ESPAÇOF - 1,12 \times AT + 0,202 \times ALTLR - 0,212 \times CPA + 0,523 \times EPV$$

Essa mesma equação é, entretanto, inadequada para descrever outras espécies. A madeira de *Andira* sp., por exemplo, é descrita por outra equação contendo cinco termos, apenas um dos quais (ALTLR) é comum à anterior. Outras variáveis, mais importantes nela, são a largura do raio, o espaço ocupado pelos vasos, a altura dos raios e o teor de extrativos em água quente.

A contração radial da madeira do grupo de seis espécies de eucaliptos pode também ser estimada, embora o ajuste não fosse perfeito. O resultado foi uma equação de formato

$$CONRAD = 28,46 - 0,293 \times PPA + 0,140 \times INFb - 3,57 \times ALTR \times LR$$

O erro-padrão da estimativa foi de 0,96%, com coeficiente de determinação de 0,713. Os valores estimados e observados são mostrados na Figura 23.

Nenhum ajuste satisfatório pôde ser obtido quando se empregaram os valores médios de 19 espécies, mesmo com número grande de variáveis.

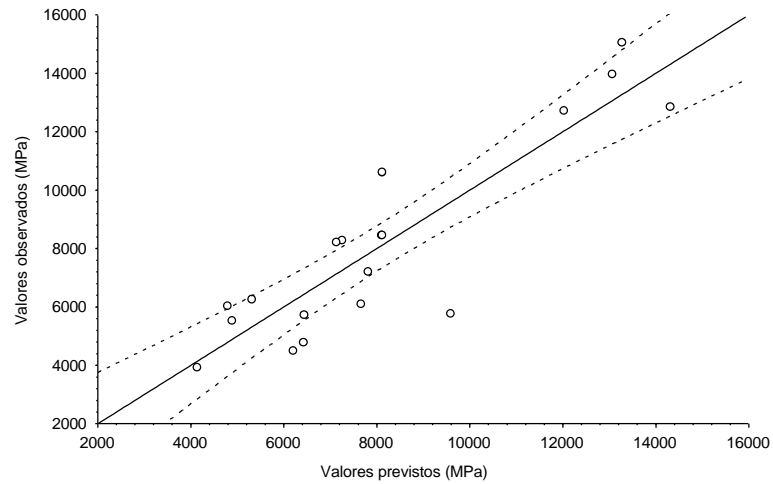


Figura 22 - Valores médios observados e previstos do módulo de elasticidade com os dados médios de 19 espécies de madeira.

4.5.3.2. Contração volumétrica

O coeficiente de contração volumétrica de espécies individuais pode ser descrito por modelos simples. Na espécie *Schyzolobium amazonicum*, por exemplo, obteve-se uma equação de formato

$$CONVOL = 14,69 - 0,436 \times ALTR - 0,787 \times AT - 226,05 \times ESPAÇOV$$

O coeficiente de determinação atingiu 0,91, com erro-padrão da estimativa de 0,22%.

A madeira de *E. grandis* foi também de ajuste fácil. Obteve-se uma equação de forma

$$CONVOL = -16,91 + 0,1013 \times APFb + 0,0266 \times DV - 1,098 \times EPV + 3,042 \times INFV$$

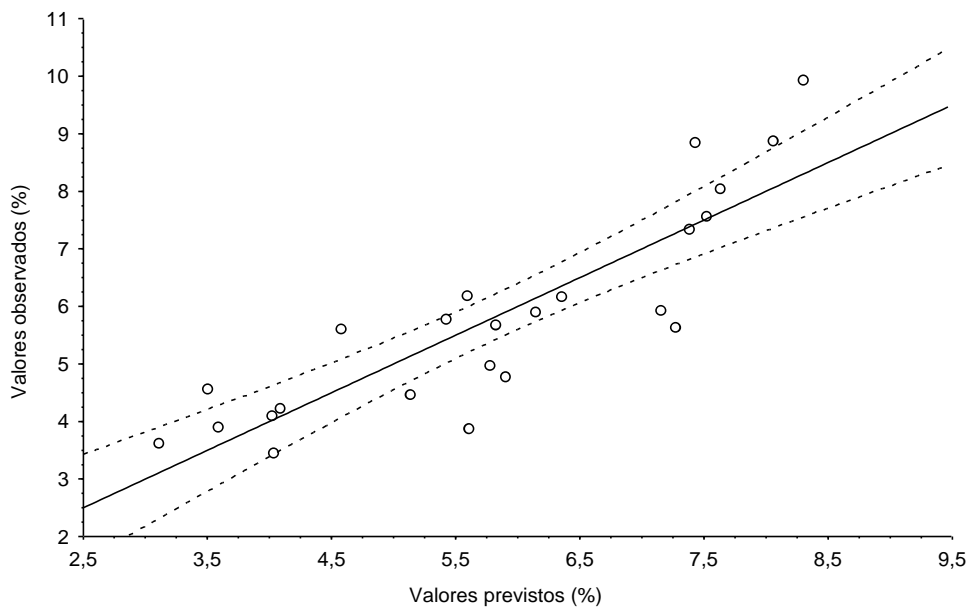


Figura 23 - Valores observados e previstos da retratibilidade radial de seis espécies de eucaliptos.

O coeficiente de determinação foi de 0,991 e o erro-padrão da estimativa, de 0,13%. Também se pôde ajustar um modelo aos dados do grupo de seis espécies de eucalipto. A equação gerada foi

$$CONVOL = 10,1 - 0,587 \times LPA + 0,092 \times INFb + 0,377 \times PR + 20,734 \times ESPAÇOF - 104,17 \times ESPAÇOV$$

Como se vê, nesse grupo de espécies tão diferentes, é necessário conhecer a largura do parênquima, o índice de enfiamento, a proporção de raios e o espaço ocupado por paredes de fibras e de vasos. O coeficiente de determinação é de 0,80, com um erro-padrão associado de 1,36%. A dispersão de valores observados e previstos pode ser vista na Figura 24.

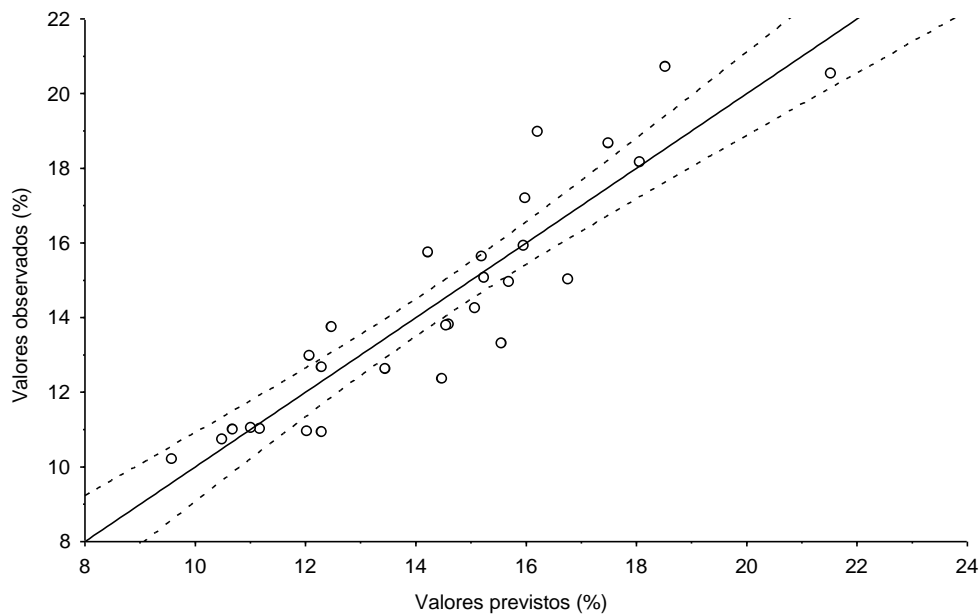


Figura 24 - Valores individuais observados e previstos da contração volumétrica de seis espécies de eucaliptos.

O ajuste para o grupo de madeiras nativas não se revelou muito preciso. Obteve-se um coeficiente de determinação de apenas 0,629, com erro-padrão da estimativa elevado de 1,76%, mesmo num modelo contendo três características anatômicas. Na Figura 25, mostra-se a dispersão dos valores estimados e observados, sendo a equação correspondente

$$CONVOL = 18,19 - 7,77 \times COEFb - 1,08 \times EPV + 0,118 \times PR$$

O ajuste aos valores médios de 19 espécies não proporcionou equação que permitisse emprego prático. O erro-padrão da estimativa mostrou-se excessivamente elevado.

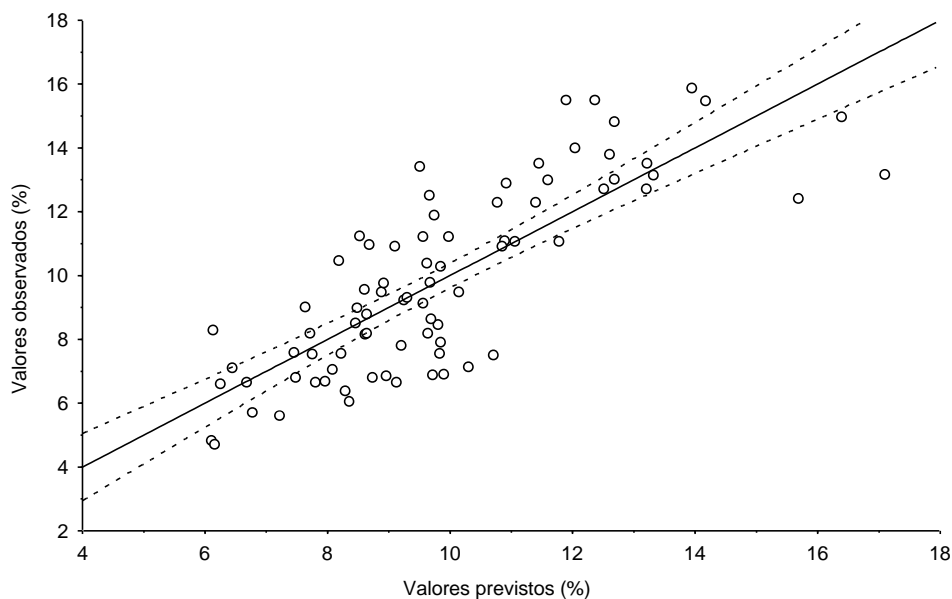


Figura 25 - Valores individuais observados e previstos da retratibilidade volumétrica de madeiras nativas.

4.5.4. Correlações entre a densidade e as demais propriedades da madeira

Neste trabalho, determinaram-se a densidade básica da madeira e também a densidade da madeira secada ao ar e a da madeira totalmente anidra. Procurava-se, com isso, determinar qual dessas três possíveis maneiras de expressar a relação entre massa e volume estaria mais relacionada com as outras propriedades.

A densidade básica mostrou-se ligeiramente melhor nos coeficientes de correlação; assim, ela foi escolhida para análises posteriores.

A densidade básica mostrou-se de previsão fácil em várias espécies. Variáveis mais importantes são, naturalmente, aquelas que dizem respeito à quantidade de material, isto é, de paredes dos diversos elementos. A composição química, especialmente o teor de extrativos, também contribui para a massa,

sendo, portanto, importante sua presença no modelo. Um modelo ajustado às informações da madeira *Schyzolobium amazonicum*, por exemplo, gerou a equação

$$Db = -0,024 + 0,95 \times SUMESPA + 0,034 \times AQ$$

com coeficiente de determinação de 0,95 e erro-padrão da estimativa de 0,02 g/cm³. Esse erro de estimativa pode ser reduzido se se adicionar um terceiro termo à equação, a altura dos raios, variável que mais contribuiu para explicação depois das duas primeiras, ou seja:

$$Db = -0,26 + 0,77 \times SUMESPA + 0,036 \times AQ + 0,00092 \times ALTR$$

O novo erro-padrão é de 0,01 g/cm³, com R² = 0,98. O sinal positivo do novo termo é de explicação difícil. Talvez ele esteja relacionado com o grau de “empacotamento” dos elementos na madeira.

A variável SUMESPA também importante em outras espécies. Em *E. grandis*, por exemplo, ela, sozinha, explica 93,7% da variação na densidade básica, com erro-padrão de 0,028 g/cm³. A dispersão de resíduos indicou certa curvatura. Um modelo polinomial, com SUMESPA e o seu quadrado, removeu essa curvatura. A equação tomou o formato

$$Db = 1,82 \pm 7,48 \times SUMESPA + 9,78 \times (SUMESPA)^2$$

O erro-padrão da estimativa reduziu-se para 0,011 g/cm³.

Outras variáveis podem descrever com precisão a densidade desse eucalipto, quando em conjunto com SUMESPA. O teor de extrativos em água quente e o coeficiente de enfiamento foram as mais importantes. A equação resultante foi

$$Db = -0,16 + 0,85 \times SUMESPA + 0,0305 \times AQ + 0,0024 \times INFb$$

O coeficiente de determinação é quase a unidade ($R^2 = 0,998$), e as previsões têm erro de apenas $0,006 \text{ g/cm}^3$. Também, puderam-se estimar os valores individuais da densidade do grupo das seis madeiras de eucalipto, com erro-padrão de $0,03 \text{ g/cm}^3$. O coeficiente de determinação encontrado valia $0,96$, e a equação tinha o formato

$$Db = -0,564 + 1,437 \times SUMESPA + 0,0066 \times PR + 0,000141 \times CFb + 0,00622 \times LIG$$

A dispersão dos valores observados e dos estimados por essa última equação pode ser vista na Figura 26.

O ajuste ao valores individuais das 23 espécies pode ser visto na Figura 27. A equação, com coeficiente de determinação de $0,865$, permitiu a estimativa com erro-padrão de $0,049 \text{ g/cm}^3$, talvez um pouco elevado para finalidades práticas. Essa equação tinha o formato

$$Db = -0,231 + 1,069 \times SUMESPA + 0,00382 \times PR + 0,000147 \times CFb + 0,00934 \times AQ$$

Finalmente, o ajuste aos valores médios das 23 espécies estudadas gerou um ajuste, representado na Figura 28. A equação, com coeficiente de determinação de $0,932$, continha cinco termos, necessários para representar espécies tão diferentes. Seu formato foi

$$Db = 0,337 + 1,152 \times ESPAÇOF + 2,350 \times ESPAÇOP + 0,0311 \times CPALPA + 0,00824 \times AQ + 0,000132 \times CFb$$

Essa equação permite estimar a densidade básica, conhecendo-se essas características anatômicas, com erro de $0,035 \text{ g/cm}^3$.

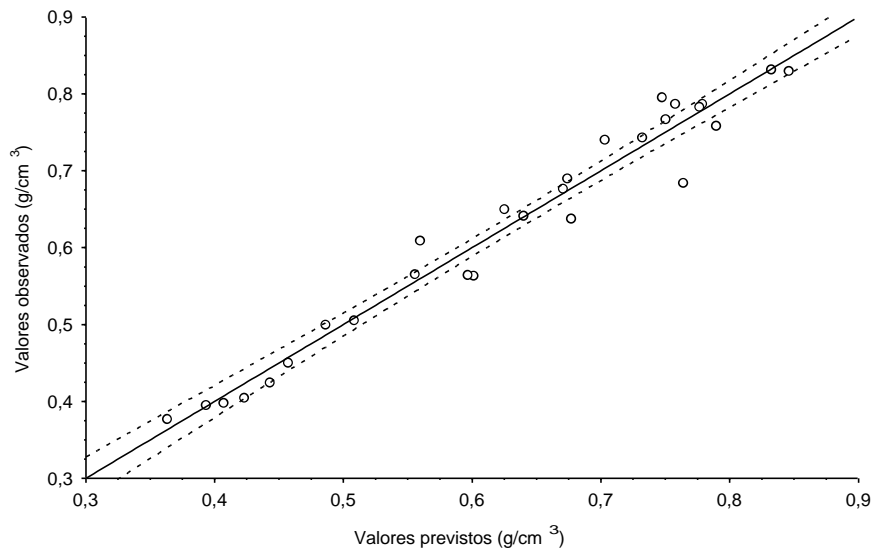


Figura 26 - Valores individuais observados e previstos da densidade básica de seis espécies de eucaliptos.

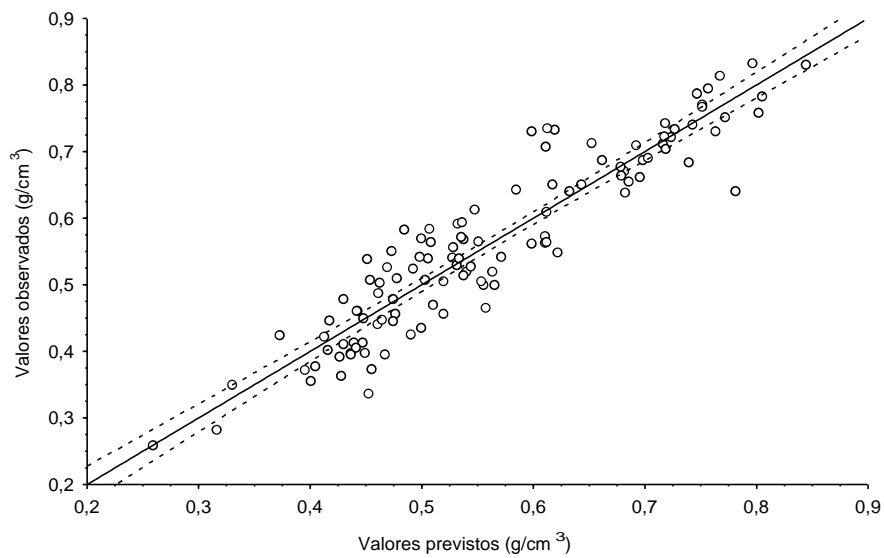


Figura 27 - Valores individuais observados e previstos da densidade média de 23 espécies de madeira.

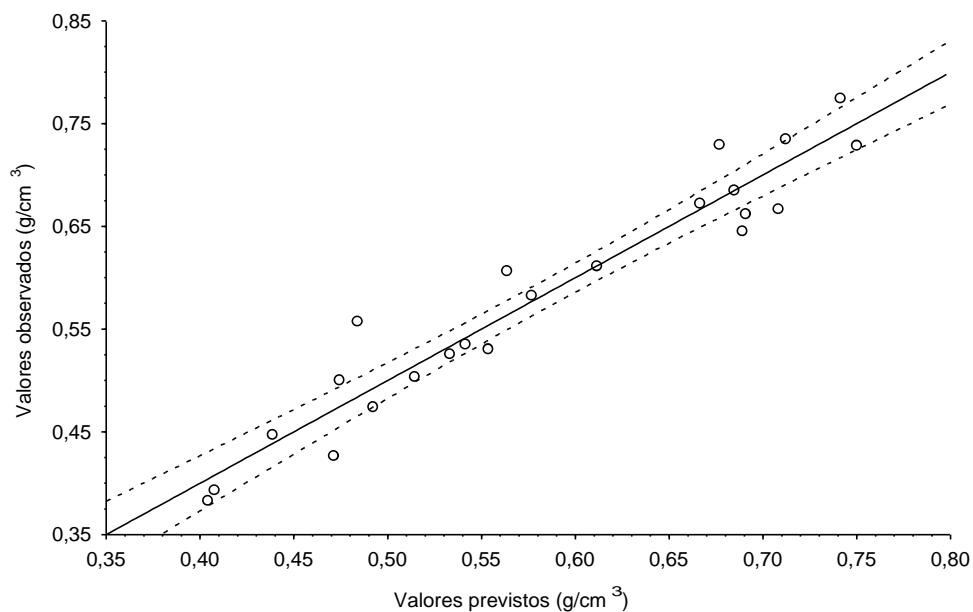


Figura 28 - Valores médios observados e previstos da densidade básica de 23 espécies de madeira.

4.5.5. A densidade na predição das propriedades mecânicas da madeira

A relação massa/volume da madeira tem sido sempre empregada para estimar suas propriedades mecânicas. A determinação dessa propriedade física é fácil, razão da sua popularidade. A correlação, no entanto, parece depender da espécie. Ela é significativa em algumas, mas é falha em outras.

A resistência à compressão da madeira do *Schyzolobium amazonicum*, por exemplo, pode ser estimada pela densidade básica, com coeficiente de determinação de 0,9187 e erro-padrão da estimativa de apenas 1,79 MPa. Se se utilizar um modelo polinomial, com densidade e densidade elevada ao quadrado, o coeficiente de determinação sobe para 0,976, com um erro-padrão associado de tão-somente 0,964 MPa. Situação semelhante ocorreu na madeira de *E. grandis*, em que o coeficiente de determinação atingiu 0,95. Na madeira de *Andira sp.*, no

entanto, o coeficiente de determinação atingiu 0,77. O ajuste falhou por completo nas madeiras de, por exemplo, *Pithecelobium* sp., *Trattinickia burserifolia* e *Curatella americana*, em cujo caso o coeficiente de determinação era não-significativo.

Talvez se possa adicionar ao modelo de ajuste, juntamente com a densidade, outra característica anatômica de determinação fácil, que permitiria a obtenção de um erro-padrão da estimativa suficientemente baixo para emprego prático.

A densidade explica apenas 31% da variação da resistência à compressão da madeira da *Pithecelobium* sp. Se o comprimento de fibra é adicionado ao modelo, o coeficiente de determinação sobe para 0,97, com um erro-padrão da estimativa tão pequeno como 0,746 MPa. A equação de regressão vem a seguir:

$$COMPS = -20,102 + 67,74 \times Db + 0,0223 \times CFb$$

A determinação do comprimento das fibras pode ser considerada difícil, por requerer maceração. Uma equação alternativa, para emprego na mesma espécie, é

$$COMPS = -19,42 + 127,00 \times Db - 1,607 \times NV + 0,573 \times PR$$

Também se ajustou um modelo contendo a densidade e outra característica aos dados individuais do grupo constituído pelas seis espécies de eucaliptos. Essa característica era a largura dos raios, e a equação resultante tinha o formato

$$COMPS = 15,39 + 129,82 \times Db - 1,89 \times LR$$

O coeficiente de determinação era de 0,94. Os valores de resistência à compressão podem ser estimados com um erro de 4,23 MPa, cerca de 10% da resistência média da madeira mais fraca. O ajuste pode ser visto na Figura 29.

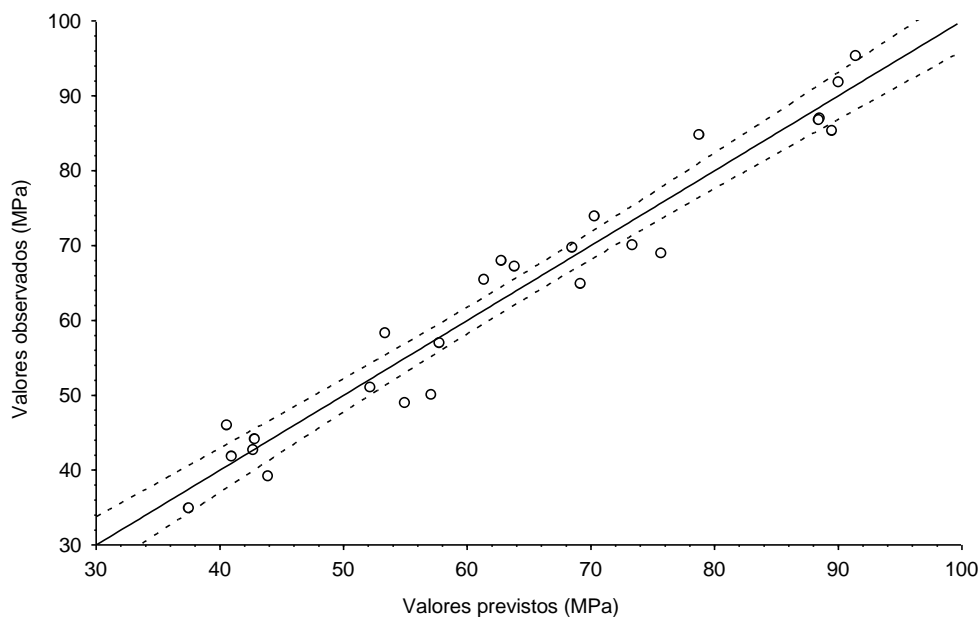


Figura 29 - Valores individuais da resistência à compressão paralela às fibras observados e previstos de seis espécies de eucaliptos.

Não foi, no entanto, possível ajustar um modelo contendo a densidade e alguma outra característica anatômica aos dados individuais das madeiras nativas. O ajuste aos valores médios das 23 espécies tampouco resultou em equação interessante. A de melhor coeficiente de determinação (0,764) era

$$COMPS = 24,98 + 96,32 \times Db - 19,34 \times LOGLR$$

O erro-padrão da estimativa era de 6,98 MPa, um pouco alto. Extraiu-se o logaritmo de base 10 da altura do raio para levar em consideração as espécies de raios excepcionalmente largos.

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, no plano radial, provou ser de predição difícil. Na madeira do *Schyzolobium amazonicum*, por exemplo, a densidade básica explicou 82,4% da variabilidade nos valores da resistência. No entanto, nenhuma outra característica pôde ser adicionada ao modelo para explicar os 17,4% restantes, pois todas elas tinham efeito não-significativo.

A situação era mais complexa na madeira de *E. grandis*. Embora a variabilidade da resistência ao cisalhamento pudesse ser explicada por até duas características, a densidade mostrou-se sempre de efeito não-significativo e não pôde ser incluída em nenhum modelo.

Quando se usaram os valores individuais das 23 espécies, a densidade passou a explicar 48,9% da variação da resistência, com erro-padrão de 2,35 MPa. Quando se adicionou ao modelo o comprimento das fibras, o coeficiente de determinação sofreu acréscimo pequeno, atingindo 0,571, com erro-padrão menor, de 2,16 MPa. Adicionado o comprimento das fibras, nenhuma outra variável pôde ser introduzida. A equação resultante tinha o formato

$$CISRAD = 5,92 + 18,72 \times Db - 0,00444 \times CF$$

Notou-se que o comprimento das fibras reduzia a resistência ao cisalhamento.

Os resultados indicaram ser ligeiramente melhores quando se empregaram as médias dos valores das 23 espécies. O melhor modelo gerou uma equação de formato

$$CISRAD = 47,3 + 197,29 \times Db - 0,0419 \times CFb$$

com coeficiente de determinação de 0,694 e erro-padrão de 1,50 MPa.

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, no plano tangencial, pôde ser correlacionada, de maneira satisfatória, com a densidade e outra característica, em certas espécies. Na madeira de *Schyzolobium amazonicum*, por exemplo, essa propriedade de resistência apresentou coeficiente de determinação de 0,60, com a densidade básica apenas. Adicionadas ao modelo a densidade básica elevada à segunda potência e a proporção de fibras, o coeficiente de determinação atingiu 0,93, com erro-padrão de 0,45 MPa. A equação resultante tinha o formato

$$CISTAN = -27,38 + 129,21 \times Db - 144,75 \times (Db)^2 + 0,118 \times PFb$$

De maneira semelhante, a densidade básica explicou 76,9% da variabilidade da resistência ao cisalhamento tangencial da madeira de *E. grandis*. Quando foram adicionadas as características de largura e altura dos raios, o coeficiente de determinação atingiu 0,98, com erro-padrão de apenas 0,227 MPa. A equação tinha o formato

$$CISTAN = 19,74 + 32,34 \times Db - 0,0212 \times ALTR - 1,46 \times LR$$

Nesta última equação, foram necessários os dois últimos termos, porque eles só se tornaram significativos quando um deles esteve na presença do outro.

A predição parece, portanto, viável nessas duas últimas espécies, além de outras. Na madeira de *Andira* sp., no entanto, não se pôde conseguir a entrada de nenhum outro termo no modelo, quando nele já se encontrava a densidade básica.

Quando os valores individuais de 19 espécies eram agrupados, a predição era ruim. A densidade básica explicou apenas 45,2% da variabilidade da resistência ao cisalhamento tangencial. Pequena melhora foi obtida quando se adicionou a proporção de fibras ao modelo. O coeficiente de determinação atingiu 0,56, com erro-padrão de 2,57 MPa, muito elevado e de pouco interesse prático. Nenhuma outra variável pôde ser adicionada.

Da mesma maneira, o comportamento dos valores médios não foi bom. A densidade básica explicou apenas 54,9% da variabilidade entre médias de espécies. Um modelo contendo a densidade básica elevada à segunda potência, mais a proporção de fibras, elevou esse coeficiente para 0,736, com um erro-padrão associado de 1,83 MPa. A equação tinha o formato

$$CISTAN = -2,66 + 22,53 \times (Db)^2 + 0,125 \times PFb$$

A predição da resistência à flexão, usando a densidade e outra variável, mostrou-se muito dependente da espécie botânica. A resistência das madeiras de *Andira* sp. e *Trattinickia burserifolia*, por exemplo, não apresentou correlação significativa com a densidade básica, mesmo quando outra variável foi introduzida em primeiro lugar. No entanto, a densidade básica explicou 84,2% da

variabilidade da resistência à flexão da madeira de *Schyzolobium amazonicum*. Quando se adicionou a proporção de vasos, o coeficiente de determinação cresceu para 0,92, com erro-padrão de 3,76 MPa. Se, além da proporção de vasos, fosse adicionada a altura dos raios, o coeficiente de determinação atingia 0,97, com erro-padrão de 2,28 MPa. A equação final tinha o formato

$$FLEX = 78,7 + 174,5 \times Db - 3,71 \times PV - 0,1815 \times ALTR$$

Tampouco a densidade previa de maneira significativa a resistência à flexão dos valores individuais do grupo constituído pelas 19 espécies. Quando, no entanto, se adicionaram variáveis representando dimensões e proporção dos raios lenhosos, ela passou a mostrar efeito significativo. O coeficiente de determinação era baixo (0,60), no entanto com erro-padrão de 21,75 MPa, muito elevado para a predição das espécies mais fracas. A equação final tinha o formato

$$FLEX = 74,13 + 166,25 \times Db - 1,274 \times PR - 6,63 \times ALT \times LR$$

A predição dos valores médios das 19 espécies era um pouco melhor. Uma equação que se podia derivar era

$$FLEX = 37,30 + 218,37 \times Db - 2,439 \times PR - 0,0269 \times CFb$$

com coeficiente de determinação de 0,77 e com erro de 14,28 MPa.

Da mesma maneira, a predição do valor do módulo de elasticidade a partir da densidade básica não foi possível nas espécies *Andira* sp. e *Trattinickia burserifolia*, porque essa densidade não apresentava efeito significativo na explicação da variabilidade de MOE. Na espécie *Schyzolobium amazonicum*, no entanto, ela sozinha explicava 85,6% da variação. O coeficiente de determinação atingiu 0,93, com erro-padrão da estimativa de 447 MPa, quando duas outras variáveis foram adicionadas, a que representa a altura dos raios lenhosos e a proporção de vasos. A equação resultante tinha o seguinte formato

$$MOE = 9.205 + 22.573 \times Db - 313,5 \times PV - 26,80 \times ALTR$$

A predição de MOE de grupos de espécies, como as nativas ou os eucaliptos, com base na densidade, também falhou. Quando se tomaram os resultados individuais das 19 espécies, no entanto, a densidade passou a apresentar correlação significativa, embora o coeficiente de determinação fosse baixo, de apenas 0,28. Quando ao efeito da densidade básica se adicionou a proporção de fibras, o coeficiente de determinação atingiu 0,52, com erro-padrão da estimativa de 2.533 MPa. Há, no entanto, muita redundância entre densidade e proporção de fibras. Uma expressão alternativa é

$$MOE = 7.724 + 15.431 \times Db - 3.370 \times LOGLR - 152,14 \times PR$$

com coeficiente de determinação de 0,58 e erro-padrão de 2.364. Essa foi a melhor equação de predição de MOE, tendo como variáveis características de mensuração mais fáceis; no entanto, o erro foi elevado.

Quando se usaram os valores médios das espécies, a densidade também apresentou relação significativa com MOE. Ela explicou, no entanto, apenas 27,9% da variabilidade. Uma expressão contendo, além da densidade, a proporção de raios elevou o coeficiente de determinação para 0,61, com erro-padrão de 2.101 MPa. A melhor equação que se pôde obter foi a seguinte:

$$MOE = 2.946 + 20.285 \times (Db)^2 - 337,10 \times PR$$

4.5.6. A predição de uma propriedade mecânica a partir de outra

Prever uma propriedade mecânica a partir do conhecimento de outra tem interesse prático. Mais interessante e investigada tem sido a predição da resistência à flexão, conhecendo-se o módulo de elasticidade, uma propriedade mecânica que se pode determinar de maneira não-destrutiva. De fato, esse já é procedimento industrial, empregado em várias grandes serrarias em todo o mundo. Entretanto, o resultado da predição a partir do módulo tem erro-padrão elevado, levando à necessidade de utilização de coeficientes de segurança muito conservadores, quando se empregam elementos submetidos à flexão. Talvez a

adição de outra propriedade anatômica ao modelo de predição baseado apenas na rigidez pudesse reduzir o erro-padrão, conduzindo-se, assim, a predições melhores e que economizassem madeira.

Na madeira de *Andira* sp., por exemplo, o MOE prediz a resistência à flexão com coeficiente de determinação de 0,83 e erro-padrão da estimativa de 10,41 MPa. Se o comprimento de fibra for adicionado, de maneiras linear e quadrática, o erro-padrão se reduz a 3,48 MPa, com coeficiente de determinação de 0,98. Se o modelo contiver, em lugar do comprimento de fibra, o índice de enfeltramento e o teor de extrativos em água quente, o erro-padrão ficará reduzido a 1,19 MPa, com coeficiente de determinação de 0,998. No entanto, a determinação dessas características não é rápida. Uma simples contagem do número de vasos por milímetro quadrado, no entanto, já melhora o poder de predição do módulo. Uma equação de formato

$$FLEX = 37,04 + 0,0171 \times MOE - 38,33 \times NV$$

prediz a resistência à flexão com erro-padrão de 7,47 MPa e coeficiente de determinação de 0,913.

Na madeira de *Schyzolobium amazonicum*, a rigidez sozinha já explica 95,7% da variação em resistência à flexão, com erro-padrão da estimativa de apenas 3,44 MPa. A equação final tinha o formato

$$FLEX = -2,963 + 0,00870 \times MOE$$

As espécies de eucaliptos apresentaram correlação razoável entre resistência à flexão e módulo de elasticidade. A adição de uma nova característica pouco ajudava a predição. O mesmo aconteceu quando as seis espécies foram agrupadas. A equação

$$FLEX = 20,27 + 0,00785 \times MOE$$

pôde ser obtida para o grupo, com coeficiente de determinação de 0,82 e erro-padrão de 13,69 MPa, um pouco elevado. A adição do teor de solúveis em água

quente elevou o coeficiente de determinação para 0,88 e reduziu o erro-padrão para 11,01 MPa. A equação tinha o formato

$$FLEX = 7,965 + 0,00702 \times MOE + 3,504 \times AQ$$

A obtenção desse teor é demorada. Infelizmente, outras características da madeira não puderam ser adicionadas à equação, a não ser quando AQ era também adicionada.

A estimativa do valor da resistência à flexão, a partir do módulo de elasticidade e utilizando os valores médios de 19 espécies (porque quatro das 23 não permitiram a obtenção de amostras para o teste de flexão), pôde ser feita com o uso da equação

$$FLEX = 12,03 + 0,00844 \times MOE$$

com erro-padrão de 11,50 MPa e coeficiente de determinação de 0,86. O erro pôde ser reduzido quando se introduziu a variável AQ para 9,65 MPa, com coeficiente de determinação de 0,90. A nova equação tinha o formato

$$FLEX = 0,0763 + 0,008321 \times MOE + 2,214 \times AQ$$

A resistência à flexão pôde também ser estimada a partir da resistência à compressão. O coeficiente de determinação era de 0,69, com um erro-padrão da estimativa muito elevado, de 17,07 MPa. A adição ao modelo da variável representando a resistência ao cisalhamento tangencial aos anéis de crescimento elevou o coeficiente de determinação para 0,75, com um novo erro-padrão de 15,39 MPa. Uma terceira variável foi acrescentada, o número de vasos por milímetro quadrado, e o coeficiente de determinação elevou-se. Na equação, no entanto, o número de vasos apresentava sinal positivo, difícil de aceitar. O número de vasos foi substituído pela proporção de raios, em cujo caso o coeficiente de determinação atingiu 0,81, com erro-padrão de 13,31 MPa. Ainda assim, esse erro parece inadmissível para efeitos práticos. A equação tinha o formato

$$FLEX = 14,99 + 0,864 \times COMPS + 3,966 \times CISTAN - 1,234 \times PR$$

Nenhuma outra variável de medição simples pôde ser adicionada a esse modelo.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo o estudo das propriedades físico-mecânicas e das características anatômicas e químicas de 23 espécies de madeira. Foram estudadas a variabilidade das propriedades e características no sentido medula-casca. Procurou-se, com o uso da análise de agrupamento, a identificação de grupos de espécies. Foram feitas, ainda, correlações entre as propriedades e características estudadas, com a intenção de verificar quais variáveis poderiam participar no desenvolvimento de modelos estatísticos de predição de valores.

Com base nos resultados obtidos para as propriedades e sua variabilidade na direção medula-casca, pôde-se concluir que:

1. A maioria das espécies apresentou madeiras que, na proximidade da medula (os primeiros 4,0 cm de diâmetro), tinham propriedades e características diferentes daquelas encontradas a maiores distâncias do centro da tora, sendo esse fenômeno mais freqüente nas características anatômicas, o que indicava a presença da madeira juvenil.

A presença dessa camada de tecido juvenil afetou o modelo utilizado para representar a tendência de valores, pois, com a retirada desses valores iniciais da análise, obtinha-se uma dispersão dos resultados que não indicava qualquer tendência significativa de acréscimo ou redução. Isso indicou que, nessas espécies, a madeira torna-se mais homogênea a partir de 2,0 cm da medula.

Algumas madeiras não apresentaram valores variáveis na região próxima à medula, como as duas espécies de *Vochysia* - duas dos eucaliptos - *Swietenia macrophylla*, *Schyzolobium amazonicum* e *Copaifera langsdorffii*.

A tendência geral da variabilidade observada nas espécies, quando se incluíam os resultados obtidos na madeira juvenil, foi de freqüente aumento nos valores das propriedades e características. Essa tendência foi mais notável nas propriedades mecânicas e, também, em várias das características anatômicas. A resistência à compressão paralela às fibras, por exemplo, aumentou em 16 espécies, decresceu em cinco e manteve-se constante em apenas duas. O comprimento da fibra mostrou-se crescente no sentido radial em 21 espécies. A densidade mostrou-se crescente em várias espécies e estável em muitas outras. Muitas espécies apresentaram coeficientes de contração que sofriam redução no sentido medula-casca. Quanto à composição química, em apenas uma espécie o teor de lignina se mostrou crescente. Nas demais espécies, ele foi estável (12 espécies) ou reduziu-se (10 espécies). O número de vasos/mm² mostrou-se crescente em uma espécie e decrescente em 12, mantendo-se estável em outras 10.

As espécies aqui estudadas parecem formar dois grupos distintos, naquilo que diz respeito à variabilidade. As madeiras de folhosas nativas e de cerrado mostraram-se mais homogêneas no sentido medula-casca e os eucaliptos, mais variáveis.

2. A análise de agrupamento permitiu verificar que as espécies provenientes do cerrado apresentam madeira distinta da que se obtém na mata e distinta, também, da madeira das exóticas, sendo essa distinção mais clara quando a análise foi feita com as características anatômicas. Essa distinção pode ser útil no que se diz respeito à seleção de espécies para plantio em determinada região.

3. As correlações entre as características anatômicas foram, também, fortemente influenciadas pela presença de madeira juvenil. A proporção de fibras estava relacionada de maneira negativa com as dimensões do parênquima axial. Puderam-se encontrar correlações significativas entre diâmetro do lúmen de fibras e diâmetro do lúmen de vaso e entre diâmetro do lúmen de vaso e proporção de vaso, sendo essas relações muito importantes para a densidade.

4. As propriedades mecânicas apresentaram correlações significativas com muitas das características anatômicas, em especial aquelas que dizem respeito à proporção de fibras e vasos, sendo também importantes as correlações com a proporção de tecidos, uma característica raramente determinada.

5. Com relação às equações de regressão desenvolvidas para estimar as propriedades físicas e mecânicas, com base nas características anatômicas e nos valores da composição química, concluiu-se que:

- A resistência à compressão paralela às fibras mostrou coeficiente de determinação elevado quando ajustada a propriedades como as dimensões das fibras e a composição química e quando se empregavam resultados de espécies individuais. Quando o ajuste foi feito com os dados de 23 espécies e com os valores médios, notou-se a necessidade de introdução, no modelo, de novas variáveis, para explicar o comportamento de espécies tão diferentes. As dimensões dos raios freqüentemente explicavam parte importante da variabilidade em resistência à compressão, indicando que eles, de certa forma, influenciavam a resistência a esse tipo de esforço.

- A resistência ao cisalhamento radial apresentou correlação significativa com muitas das características. Quando o ajuste era feito para as espécies individuais, o coeficiente de determinação podia atingir valores elevados. Quando se agrupavam as 23 espécies, os coeficientes de determinação eram bem inferiores. As equações encontradas indicaram que essa propriedade de resistência pode ser prevista a partir das dimensões de fibras, com a participação de número de vasos/mm², com o comprimento do parênquima axial e com a proporção do parênquima radial. Observou-se que ela não foi afetada pelas características químicas. A resistência ao cisalhamento tangencial apresentou relações significativas com as dimensões das fibras, de vasos e de raios. Quando o ajuste foi feito para os valores médios, a resistência ao cisalhamento foi afetada também pelo teor de extrativos em água quente.

- A resistência à flexão estática mostrou boas relações com as dimensões das fibras, dos vasos e dos raios. As equações obtidas com os dados das 23 espécies ou com os valores médios apresentaram a dependência dessa propriedade com o teor de extrativos em álcool/tolueno.

- O módulo de elasticidade à flexão estática ajustou-se bem às características anatômicas e químicas quando a regressão foi feita com as espécies individuais, indicando boas relações com fibras, raios e teor de lignina. Quando o ajuste foi feito para as madeiras de eucaliptos e espécies nativas (mata e cerrado), houve redução no coeficiente de determinação, podendo-se observar forte influência nessa propriedade das características relacionadas, principalmente, com os raios.

- As variações no coeficiente de contração radial de *Schyzolobium amazonicum* puderam ser explicadas com valor alto de determinação ($R^2 = 0,99$), mas apenas quando se empregou um modelo com cinco variáveis. Nessa equação, notou-se a forte influência das características relacionadas às fibras, aos vasos e aos raios. Quando o ajuste foi feito para o grupo de espécies de eucalipto, a equação obtida mostrou boa relação dessa propriedade com as dimensões de fibra e dos parênquimas axial e radial, apresentando coeficiente de determinação de 0,759. Nenhum ajuste satisfatório pôde ser obtido quando se empregaram os valores médios das 23 espécies.

- A contração volumétrica de espécies individuais pôde ser descrita por modelos simples. Nas espécies *Schyzolobium amazonicum* e *E. grandis*, essa propriedade mostrou ajuste elevado ($R^2 = 0,99$) com as dimensões de fibras, de vasos, do parênquima radial e com o teor de lignina. Quando o ajuste foi feito para o grupo de madeira de eucalipto, a relação continuou alta (0,80), mostrando também a forte influência das dimensões das fibras e do parênquima radial. Já no grupo de madeiras nativas, houve redução no coeficiente de determinação (0,62), mas o modelo continuou indicando a influência das dimensões das fibras, dos vasos e do parênquima radial nessa propriedade.

- A densidade mostrou-se de previsão fácil em várias espécies, sendo as variáveis mais importantes aquelas que dizem respeito à quantidade de material, isto é, de paredes dos diversos elementos. A composição química, especialmente o teor de extrativos em água quente e o teor de lignina, também contribuiu, sendo, portanto, importante sua presença no modelo.

6. A correlação da densidade com as propriedades de resistência de madeira parecia depender da espécie, pois ela foi significativa em algumas, mas se mostrou não-significativa em outras. A resistência à compressão do

Schyzolobium amazonicum, ao ser estimada pela densidade básica, apresentou coeficiente de determinação de 0,92. Em *E. grandis*, o valor de R^2 atingiu 0,95 e, na madeira de *Andira* sp., 0,78. Já em *Pithecelobium* sp., o ajuste não foi significativo. Com a adição no modelo de ajuste, juntamente com a densidade, de características anatômicas de fácil determinação, foi possível obter equações com erro de estimativa baixo. Na espécie *Pithecelobium* sp., o ajuste da resistência à compressão paralela às fibras com a densidade apresentou coeficiente de determinação de 0,97, com erro-padrão de estimativa de 0,746 MPa, quando foi adicionado ao modelo o comprimento das fibras. Quando o ajuste foi feito com os dados das seis espécies de eucaliptos, obteve-se uma equação que apresentou coeficiente de determinação de 0,94, com erro de estimativa de 4,23 MPa. Nesse caso, a largura dos raios mostrou-se mais importante que o comprimento das fibras, cujo efeito não era significativo. No caso das espécies nativas, não foi possível ajustar um modelo contendo a densidade e alguma outra característica anatômica. Já o ajuste dos valores médios das 23 espécies evidenciou a relação da resistência à compressão com a densidade e com o logaritmo da largura dos raios.

Também, foi possível ajustar a resistência ao cisalhamento no plano radial à densidade básica. Quando ao efeito da densidade se adicionava o do comprimento das fibras, nas 23 espécies o ajuste apresentou coeficiente de determinação de 0,57. No plano tangencial, a resistência ao cisalhamento pôde ser estimada com a densidade, em espécies individuais. Houve, no entanto, com a adição da densidade ao quadrado e a proporção de fibras, melhoria acentuada no ajuste do modelo. Quando os dados das 23 espécies foram agrupados, a previsão não foi boa, com a densidade explicando somente 45,0% da variabilidade da resistência ao cisalhamento. Pequena melhora foi obtida quando se adicionou a proporção de fibras ao modelo. Com os valores médios das 23 espécies, o ajuste também não foi bom. Entretanto, um modelo contendo a densidade ao quadrado mais a proporção de fibras conseguiu explicar 73,6% da variabilidade da resistência ao cisalhamento tangencial.

A predição da resistência à flexão também foi possível com a adição do efeito de outra variável ao efeito da densidade, mas se mostrou muito dependente da entidade botânica. Em *Schyzolobium amazonicum*, quando o ajuste foi feito somente com a densidade, o coeficiente de determinação explicou 84,2% da

variação dessa propriedade, mas quando se adicionou a proporção de vasos esse coeficiente aumentou para 0,920, com erro-padrão de 36,88 kgf/cm². Com a adição da altura dos raios, o coeficiente de determinação atingiu 0,971, com erro-padrão de 22,4 kgf/cm², melhorando sensivelmente o ajuste do modelo.

A previsão da resistência à flexão estática não era significativa quando se usavam os dados das 23 espécies e se a variável independente era somente a densidade. Quando foram adicionadas ao modelo as variáveis que representavam a proporção de raios e o produto da altura dos raios pela largura, foi possível obter um modelo com coeficiente de determinação de 0,60, mas com erro-padrão um tanto elevado para a predição das espécies mais fracas (21,75 MPa). Com os dados médios das 23 espécies, foi possível obter um modelo com a inclusão da proporção de raios e comprimento de fibras, com coeficiente de determinação de 0,78 e erro-padrão menor (14,28 MPa).

Da mesma maneira, a predição do módulo de elasticidade das espécies individuais a partir da densidade só foi possível em algumas espécies. Na espécie *Schyzolobium amazonicum*, a densidade sozinha explicou 85,6% da variação, mas quando duas outras variáveis foram adicionadas - a altura do raio e a proporção de vasos - o coeficiente de determinação alcançou 0,929, melhorando sensivelmente o ajuste do modelo. Para os dados das 23 espécies, o ajuste a partir da densidade apresentou baixo coeficiente de determinação, mas, com a adição do logaritmo da largura do raio e a proporção desses elementos, houve acréscimo no coeficiente de determinação. Quando a predição foi feita com os valores médios, o ajuste feito somente com a densidade apresentou relação significativa com o módulo de elasticidade, mas com coeficiente de determinação baixo, em torno de 0,28. Com a adição da proporção de raios, houve melhoria no ajuste do modelo, com a elevação do coeficiente de determinação para 0,594.

7. A predição da resistência à flexão com base no módulo de elasticidade foi possível para espécies individuais, alcançando coeficientes de determinação e erros-padrão de estimativa satisfatórios. O ajuste dos modelos, tanto para as espécies individuais como para os dados das 19 espécies e valores médios, foi aprimorado com a adição de outras variáveis, como o número de vasos/mm², o comprimento das fibras, o índice de enfiamento, o teor de extrativos em água

quente e a densidade básica, sendo algumas dessas variáveis de fácil determinação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **Annual book of ASTM Standarts**. Philadelphia: ASTM, 1994, 608p. Part.22

ANDRADE, M.C.D. Variação das características das fibras em função da densidade Básica de cavacos da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, Botocatu: UNESP, 1987, 43 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Ensaio físicos e mecânicos da madeira**. MB-26/40. Rio de Janeiro: ABNT, 1940. 16p.

ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL - ABTCP. **Normas Técnicas**, São Paulo: 1974.

BARRICHELO, L.E.G. **Estudos das características físicas, anatômicas e químicas da madeira de *Pinus caribaea* Mor. var. *hondurensis* Barr. e Golf. para produção de celulose Kraft**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1979, 167p. (Tese livre-docência).

BARRICHELO, L.E.G., BRITO, J.O. Variações das características da madeira de *E. grandis* e suas correlações com a produção de celulose. In: **Congresso anual da ABCP**, São Paulo: 1977. p.41 - 46.

BARRICHELHO, L.E.G., BRITO J.O. A madeira das espécies de eucalipto como matéria prima para a indústria de celulose e papel. Brasília, DF: **PRODEPEF**, 1976, 145p. (Série de divulgação n. 13).

BARRICHELO, L.E.G., BRITO, J.O. Variabilidade radial da madeira de *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*. **IPEF** n.18, p.181-102, 1979.

- BENDTSEN, B.A. Properties of wood from improved and intensively managed trees. *Forest Products Journal*, v.28, n.10, p.61-72, 1978.
- BERLYN, G., MIKSCHE, J.P. **Botanical microtechnique and cytochemistry**. Ames, Iowa: The Iowa State University Press, 1976. p.302-330.
- BODIG, J. The peculiarity of compression of conifers in radial direction. **Forest Products Journal**, v.13, n.10, p.438, 1963.
- BODIG, J. The effect of anatomy on the initial strain relation-ship in transverse compression. **Forest Products Journal**, v.15, n.5, p.197-202, 1965.
- BRASIL, M.A., VEIGA, R.A., FERREIRA, M. Variação da densidade básica nas seções transversais do caule e da base do tronco para a copa de Eucalipto. **IPEF**, v.15, p.73-82, 1977.
- BUIJTENEN, J.P. Anatomical factors influencing wood specific gravity old slash pines and the implications for the development for a high-quality pulpwood. **TAPPI**, v.47, n.7, p.401-404, 1964.
- CHAFE, S.C. Relationships between shrinkage and specific gravity in the wood of *Eucalyptus*. *Australian Forestry*, v.57, p.59-61, 1994.
- CHAFE, S.C. Collapse, volumetric shrinkage, specific gravity and extractives in eucalyptus and others especies. Part II: the influence of wood extractives, **Wood Science and Technology**, v.21, p.27-41, 1983.
- CHIMELO, J.P. **Development of a probability-based computerized characterization system for identification and for property prediction of selected tropical hardwoods**, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1980, 206p. (Tese de Ph.D).
- CHOONG, E.T. Effect of extractives on shrinkage and other higroscopic of ten southern pine woods, **Wood and Fiber Science**, v.1, n.2, p.124-133, 1969.
- CRUZ, C.D. **Aplicação de algumas técnicas multivariadas no melhoramento de plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1990, 188p. Tese (Doutorado em Melhoramento Genético) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1990.
- DAVIDSON, J. **Variation, association and inheritance of morfological and wood characters in an improvement programe for *Eucalyptus degluta***, Sidney: Australia University, 1972, 263p. (Tese de Ph.D).

- DIAS, R.L.V., CLÁUDIO-DA-SILVA JR., E. A influência da densidade básica da madeira de híbridos de *E. grandis* em suas características químicas, e propriedades de polpação e do papel. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP, 18, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1985. p.31-56.
- DO CARMO, T. P. **Avaliação de algumas propriedades da madeira de seis espécies de Eucalipto**. Viçosa: UFV, 1996. 74p. Dissertação (Mestrado em Ciência florestal) - Universidade Federal de Viçosa.
- FERREIRA, M.L., LIMA, O.M.B. Processo de classificação. In: FAISOLIS, S. (ed.). Tendência atuais na geografia urbano/regional: teorização e quantificação. RS: IBGE, 1978. p.113-130.
- FERREIRA, R.L.C., SOUZA, A.L. **Técnicas de análise multivariada aplicadas ao Manejo florestal no Brasil**, Viçosa, MG: SIF, 1997. 21p. (Boletim técnico, 14).
- FERRAND, J.C. Etude des contraintes de croissance. Première partie: méthode de mesure sur carottes de sondage. **Ann. Sci. Forest**, v.39, n.2, p.109-142, 1982.
- FINNEY, D.S. Multivariate analysis and agricultural experiments. **Biometrics**, v.12, p.64-71, 1956.
- FOELKEL, C.E.B. **Qualidade da madeira**. Viçosa, MG: CENIBRA/UFV, 1977, 60p.
- FOELKEL, C.E.B., MORA, E., MENOCELLIS, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de Eucalipto para produção de celulose. **O Papel**, v.5, p.36-38, 1992.
- FOELKEL, C.E.B. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para Coníferas e Folhosas, **IPEF**, v.23, p.65-74, 1971.
- FOELKEL, C.E.B. Variabilidade radial da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Silvicultura**, São Paulo, v.8, n.28, p.728-791, 1983.
- FUJIWARA, S., KAZUHIKO, S., KUKODA, K., TAKAMURA, N. Anatomy and properties of japonese hardwoods. I. Variation of fibre dimensions and tissue proportions and their relation to basic density. **IAWA Bulletin**, v.12, n.4, p.419-424, 1991.
- GAMA, M.P. **Bases da análise de agrupamento (“Cluster Analisis”)**. Brasília: UnB, 1980. 229p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Métodos Quantitativos) - Universidade de Brasília, 1980.

- GONÇALEZ, J.C. **Caracterization technologique de quatre especes peu connues de la Forest Amazonienne: Anatomie, Chimie, Couleur, Proprietes physiques e mecaniques.** 1 Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forests (ENGREF), Nancy, 1993. 444p. (These de Doctorat).
- GODDARD, J.G., COLE, D.E. Variation in wood production of six year old progenies of selected slash pines. **TAPPI**, v.49, n.8, p.359-362, 1966.
- HUMPHREYS, R.D. Propriedades estereológicas como estimadores de propriedades físicas e mecânicas de madeiras. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6, Campos do Jordão, 1990. **Anais...** p.740-745.
- HUMPHREYS, R.D., CHIMELO, J.P. Comparação entre propriedades físicas, mecânicas e estereológicas para agrupamento de madeiras. In: CONGRESSO NACIONAL SOBRE ESSÊNCIAS NATIVAS, 2, São Paulo. **Anais...** IPEF/IPT, 1990. p.480-490.
- HILLIS, W.E. **Wood extractives and their significance to the pulp and paper paper industries.** New York: Academic Press, 1962. 513p.
- HILLIS, W.E. Distribution, properties and formation of some wood extractives. **Wood Science and technology**, v.5, n.4, p.272-289, 1971.
- IFJU, G. Quantitative wood anatomy: Certain geometrical statistical relationships. **Wood and Fiber Science**, v.15, n.4, p.39-326, 1983.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. Normas de procedimentos em estudos da anatomia de madeira: Angiospermae, II Gimnospermae. Brasília. **LPF**, n. 15:1-19, 1991.
- INTERNACIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS - IAWA. List of microscopic features for Hardwood identification. **IAWA BULLETIN**, v.10, n.3, p.219-332, 1989.
- JANKOWSKI, I.P. **Influência da densidade básica e do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira.** Piracicaba: ESALQ/USP, 1979. 87p. Tese (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1979.
- KEISEY, K.E. A critical review of the relationship between the shrinkage and struture of wood, **Division of forest products, technological paper.** **CSIRO**, Australia, n.28, p.1-45 1963.

- KENNEDY, R.W. Wood in transverse compression, influence of some anatomical variables and density on behavior. **Forest Products Journal**, v.18, n.3, p.36-40, 1968.
- KELLER, R., THIERCELIN, F. Influence des gros rayons ligneux sur quelques propriétés du bois de hêtre, **Ann. Scien. Forest**, v.32, n.2, p.113-129, 1975.
- KELLOG, R.M., GONZALEZ, J.S. Relationships between anatomical and sheet properties in western hemlock kraft pulps. Part I. **Anatomical relationships**. **Western Forest Products Laboratory**. Vancouver, 1976. 4p.
- KIBBLEWRITE, R.P., LLOYD, A.J. Interrelations between the wood, fibre and Kraft properties of new -crop radiato pine corewood and slabwood. **FRI Bulletin**, v.45, p.1-26, 1983.
- KOCH, P. **Utilization of the Southern pines**. Washington, D.C., USDA, Forest Service, 1972. 734p.
- KOLLMANN, F.P.P., CÔTE, W.A. **Principles of wood science and technology**. New York: Springer-Verlag, 1968. 592p.
- LIMA, T.G. **Variações nos sentidos radial e longitudinal de algumas propriedades das madeiras de *Eucalyptus microcorys* F. Muell. e *Eucalyptus pilularis* Sm.** Viçosa, MG: UFV, 1996. 108p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 1996.
- McMILLIN, C.W. Chemical composition of loblolly Pine wood as related to specific gravity, growth rate, and distance from pith. **Wood Science and Technology**, v.2, p.233-240, 1968.
- MAEGLIN, R.R. Processing and products considerations critical in utilizing second-growth ponderosa pine. In: BAUMGARTNER, D.M., LOTAN, J.E. (eds.). *Ponderosa pine - The species and its management: Proceedings of Symposium, 1987 September 29-October 1; Spokane, WA. Pullman, WA: Washington State University, 1988. p.19-24.*
- MAEGLIN, R.P. Natural variation of tissue proportions and vessel and fiber length in mature northern red oak, **Silvae Genetica**, v.25, n.3-4, p.112-116, 1976.
- MALAN, F.S. Properties, processing and utilization of eucalypts: the South African experience. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA, 1, 1998. **Anais...** Belo Horizonte, MG, 7 a 11 de dezembro de 1998, Viçosa, MG: SIF, UFV e DEF, 1998. p.134-143.

- MALAN, F.S. *Eucalyptus* improvement for lumber production. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, São Paulo, 1995. **Anais...** São Paulo: **IPEF/IPT**, 1995. p.1-19.
- MARIAUX, A. La section transversale de fibre observée avant et après séchage sur bois massif. **CTFT**, n.221, p.65-76, 1989.
- MARRIOT, F.H.C. **The interpretation of multiple observation**. Londres: University Press, 1974. 117p.
- MASSERAN, C.H., MARIAUX, A. Anisotropie de retrait e structure du bois: recherche de l'influence des caractères morphologiques transverses des fibres. **CTFT**, n.209, p.35-47, 1985.
- MOREY, R.P. **O crescimento das árvores**. São Paulo: EDUSP, 1981. 72p.
- MORRISON, D.F. **Multivariate statical methods**, New York: McGraw-Hill, 1981, 338p.
- MUNIZ, G.T.B. **Descrição da estrutura e ultraestrutura da madeira de cinco espécies de *Prosopis* da Argentina e análise de metologia**. Curitiba: UFPr, 1986, 191p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal do Paraná, 1986.
- MUNIZ, G.T.B. **Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem de *Pinus elliotti* Engelm e *Pinus taeda* L.** Curitiba: UFPr, 1993. 123p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) Universidade Federal do Paraná, 1993.
- NEARN, W.J. Effect of water extractives on the volumetric shrinkage and equilibrium moisture content of eleven tropical and domestic woods **University Pennsylvania**, 1955. 37p. (Bulletin n. 598).
- NICHOLLS, J.W. Tracheid cell dimensions and density relationship for normal and abnormal wood of ***Pinus radiata* D.Don**. **Australian Forest Research**, v.14, n.2, p.85-98, 1984.
- NORMAN, D. **Manuel d'identification des bois commerciaux**. CTFT, 1972, 193p.
- OMI, P.N., WENSEL, L.C., MURRHY, J.L. Na applicatin of multivariate statics to Land use plannig; clasifying land units into homogeneous zones. **For. Sci.** Washington, v.25, n.3, p.399-414, 1979.

- PALMER, E.R., GIBBS, J.A. Pulping characteristics of trees of *Pinus caribaea* with different densities grown in Jamaica. **Tropical Products Institute Report**, v.30, p.1-224, 1973.
- PANSHIN, A.J., DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**, New York: Mc Graw-Hill, 1980, 722p.
- RAMALHO, R.S. **O uso de macerado no estudo anatômico de madeiras**. Viçosa, MG: UFV, Impr. Univ., 1987. 4p.
- RALPH, JR., M.N. A model for sorption of water vapor by cellulosic materials. **Wood and Fiber Science**, v.15, n.1, p.8-22, 1983.
- SANTOS, Z.M. **Avaliação da durabilidade natural da madeira de *Eucalyptus grandis* w. Hill ex. Maiden em ensaios de laboratório**. Viçosa, MG: UFV, 1992. 192p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 1992.
- SALLENAVE, P. **Propriétés physiques et mécaniques des bois**. Premier supplément, CTFT, Nogentsur merne, 1964. 79p.
- SCARAMUZZI, G. **The relationship of fibre wall thickness, fibre diameter and percentage of summer wood (late wood) to specific gravity**. Melbourne: CSIRO, 1965. 127-137.
- SHIMOYAMA, V.R. **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* sp.** Piracicaba: ESALQ-USP, 1990. 93p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1990.
- SHIMOYAMA, V.R.S., BARRICHELO, L.E.G. Influências de características anatômicas e químicas sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP, 24, São Paulo. 25-29, nov. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1991, 1074p. p.23-36.
- SJÖSTROM, E. **Wood chemistry: fundamental and applications**. 2. ed., New York: Academic Press, 1993. 293p.
- SKAAR, C. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1972. 218p.
- SKAAR, C. **Wood-water relations**. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 279p.
- SOBUE, N., HIRAI, N., ASANO, I. Studies on the structure of wood by X-ray variation of crystalline state in the stem of sugi (*Cryptomeria japonica* D.). **The Japan wood Research Society**, v.16, n.6, p.262-267, 1970.

- SOUZA, A.L., FERREIRA, R.L.C, XAVIER, A. Análise de agrupamento aplicado a área florestal. Viçosa, MG: SIF, 1997. 109p. (Documento SIF, n.16).
- STAMM, A.J. **Wood and cellulose science**. New York: Ronald Press, 1964. 549p.
- TAYLOR, F.W. The effect of ray tissue on the specific gravity of wood. **Wood and Fiber Science**, v.1, n.2, p.142-145, 1969.
- TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *E. saligna* e *E. grandis*. **IPEF**, v.29, p.37-45, 1985a.
- TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *E. gummifera*, *E. microcorys* e *E. pilularis*. **IPEF**, v.30, p.45-54, 1985b.
- TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: Structure, porperties, utilization**. NewYork: Van Nastrnd Reinold, 1991. 494p.
- SCARAMUZZI, G. The relationship of fibre wall thickness, fibre diameter and percentage of summer wood (late wood) to specific gravity. Melbourne: **CSIRO**, 1965. p.127-137.
- WAHLGREEN, H.E., SCHUMANN, D.R. Properties of major southern pines: Part I. Wood density survey. **USDA**, Forest sevice FPL Research Paper, v.176/177, p.1-57, 1972.
- WANGAARD, F.F., GRANDOS, L.A. The effetct of extratives on water sorption by wood. **Wood Science and Technology** , v.1, p.253-277, 1967.
- WENZEL, H.F.J. **The chemical technology of wood**. New York: Academic Press, 1970. 692p.
- WINANDY, E.J., ROWELL, M.R. The chemistry of wood strength In: ROWELL, M.R. The chemistry of solid wood. Seattle, Washington: **American Chemical Society**, p.212-255, 1984.
- WILKES, J. Variations in wood anatomy within of *Eucalyptus*. Australia. **IAWA BULLETIN**, v.9, n.1, p.13-23, 1988.
- ZHANG, S.Y. **Structure, property relationship of wood in East-Lioaning Oak**. Paper for IUFRO timber engineering meeting. Saint John: New Bruswick, 1990, 13p.

ZOBEL, J.B. Inheritance of wood properties in conifera. **Silvae Genetica**, v.10, n.3, p.65-70, 1961.

ZOBEL, J.B. Wood quality from fast-grown plantations. **TAPPI**, v.64, n.1, p.71-74, 1981.

ZOBEL, J.B., BUJTENEN, J.P. **Wood variation its causes and control**. New York: Springer-Verlag, 1989. 363p.