

EDUARDO LUIZ LONGUI

# **Potencial de madeiras nativas na fabricação de arcos para instrumentos de corda**

Tese apresentada ao Instituto de Botânica da Secretaria do Meio Ambiente, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de DOUTOR em BIODIVERSIDADE VEGETAL E MEIO AMBIENTE, na Área de Concentração de Plantas Vasculares em Análises Ambientais.

SÃO PAULO

2009

EDUARDO LUIZ LONGUI

# **Potencial de madeiras nativas na fabricação de arcos para instrumentos de corda**

Tese apresentada ao Instituto de Botânica da Secretaria do Meio Ambiente, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de DOUTOR em BIODIVERSIDADE VEGETAL E MEIO AMBIENTE, na Área de Concentração de Plantas Vasculares em Análises Ambientais.

ORIENTADORA: DRA. EDENISE SEGALA ALVES

Ficha Catalográfica elaborada pela Seção de Biblioteca do Instituto de Botânica

Longui, Eduardo Luiz  
L858p Potencial de madeiras nativas na fabricação de arcos para instrumentos de corda  
/ Eduardo Luiz Longui -- São Paulo, 2009  
144 p. il.

Tese (Doutorado) -- Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio  
Ambiente, 2009  
Bibliografia.

1. Anatomia da madeira. 2. Madeiras alternativas. 3. Arcos para violino.  
I. Título

CDU 634.0.811

Dedico este trabalho a minha esposa Luana e aos meus filhos Pietro e Luigi,  
pois em muitas noites e finais de semana, precisei dedicar meu tempo a  
produção dessa tese, ao invés de participar de momentos únicos da vida deles.

Dedico também aos meus pais, Alberto e Cleide simplesmente pelo apoio em  
todos os momentos de minha vida.

## **Agradecimentos**

Durante a elaboração desta tese tive o auxílio de diversas pessoas e instituições, para as quais quero mencionar meus agradecimentos:

À Dra. Edenise Segala Alves, pela orientação, compreensão, auxílio profissional e pela enorme contribuição por hoje eu também ser um Pesquisador Científico.

Ao Sr. Daniel Lombardi, meu amigo e parceiro nesse estudo. Pela dedicação em fabricar arcos com madeiras alternativas, dispondo do tempo de seu trabalho para a ciência, posso dizer que além de um excelente arquiteto, você também é um cientista!

Aos meus amigos pesquisadores Dr. Israel Luiz de Lima e a MS “quase doutora” Sandra Monteiro Borges Florsheim, da Seção de Madeira e Produtos Florestais, pela ótima convivência, facilitando muito a minha adaptação no Instituto Florestal e pelo grande auxílio na realização dessa tese.

À Pós-graduação do Instituto de Botânica, nas pessoas da Dra. Solange Mazzoni Viveiros, Marcinha e Antonio, pelo atendimento de todos esses anos de mestrado e doutorado.

Ao Instituto Florestal, nas pessoas dos Diretores Gerais, Cláudio H, B, Monteiro e Francisco J, N, Kronka, e dos Diretores da Divisão de Dasonomia Marco A. Nalon e João B. Baitello, por permitir que eu dedicasse parte de meu tempo na elaboração dessa tese, pelo auxílio na compra de materiais utilizados nas análises e impressão dos exemplares.

Ao Prof. Dr. José Nivaldo Garcia e ao técnico Luis Eduardo Facco do Laboratório de Ensaio Mecânicos de Madeira e Derivados no Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP – Piracicaba/SP. Pela grande colaboração nos ensaios mecânicos.

Ao Prof. Dr. Francides Gomes da Silva Júnior e a técnica Maria Regina Buch do Laboratório de Química, Celulose e Energia – LQCE, no Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP – Piracicaba/SP. Pela grande colaboração nas análises químicas.

Aos funcionários Sonia Godói Campião e Francisco Bianco da Seção de Madeira e Produtos Florestais do Instituto Florestal, pelo auxílio laboratorial e resolução de pequenos problemas diários.

Ao Dr. Takashi Yojo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), que sempre esteve disponível para solucionar minhas dúvidas quanto às propriedades da madeira.

À Antonio Carlos Franco Barbosa (amigão) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), o “pós doc” em cortar madeiras, por facilitar a minha vida com o ipê e o cumaru e pelas dicas de laboratório que só uma pessoa muito dedicada ao que faz e com tanto conhecimento pode passar.

À Dra. Maria José e Dr. Geraldo José Zenid também do IPT, por me receber em seu laboratório e permitir que o (amigão) usasse um pouco do seu tempo para me auxiliar.

Aos alunos da Seção de Madeira e Produtos Florestais, Itiberê, Luana, Gabriel, Rafael, Rafinha, pelo grande auxílio laboratorial.

Ao meu irmão, Dr. Carlos Alberto Longui, pela convivência destes últimos anos e pela paciência em solucionar minhas dúvidas de estatística.

Às amigas da Seção de Anatomia e Morfologia do Instituto de Botânica: Fernanda, Bárbara pela amizade e auxílio e, especialmente à Andrea, que além da amizade e auxílio sempre teve a paciência, para não dizer outra coisa, de me avisar das datas limites de entrega dos documentos da pós.

À Dra. Rita de Cassia L. F. Ribeiro da Seção de Fisiologia e Bioquímica de Plantas do Instituto de Botânica, que embora não tenha participado diretamente desta tese, foi muito importante durante minha formação profissional.

À Maria Manoel, funcionária da Seção de Anatomia e Morfologia que sempre me ajudou enquanto estive no Botânico.

À Dra. Veronica Angyalossy (IB-USP) por sua contribuição no mestrado que repercutiu também no doutorado.

Às Pesquisadoras Dra. Agnes Elisete Luchi da Seção de Anatomia e Morfologia e Dra. Marília Gaspar Mais da Seção de Fisiologia e Bioquímica de Plantas do Instituto de Botânica, pela participação em minha banca de qualificação e pelas dicas para a continuidade do trabalho.

À empresa Sangari Brasil, nas pessoas do grande amigo Vinicius Signorelli e Ana Rosa Abrel, que durante o primeiro ano de elaboração dessa tese concederam um dia da semana para que eu pudesse cursar as disciplinas.

À todos que contribuíram na elaboração dessa tese e por um lapso de memória não foram mencionados.

## Índice

<b>Apresentação</b> .....	1
1. Introdução geral.....	3
2. Justificativas .....	12
3. Objetivos do estudo .....	13
3.1. Objetivos gerais.....	13
3.2. Objetivos específicos.....	13
<b>Capítulo 1. Estrutura anatômica e sua influência na densidade aparente, velocidade de propagação do som e módulo de elasticidade dinâmico em madeiras potenciais para arcos de instrumentos de corda</b>	
1. Introdução .....	16
2. Material e métodos .....	17
2.1. Seleção das madeiras.....	17
2.2. Obtenção das madeiras .....	20
2.3. Preparação e seleção das amostras.....	20
2.4. Densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ).....	22
2.5. Velocidade de propagação do som ( $v$ ) .....	23
2.6. Módulo de elasticidade dinâmico ( $MOE_d$ ) .....	24
2.7. Análise anatômica da madeira .....	24
2.8. Análise estatística.....	27
3. Resultados .....	27
3.1. Correlação entre as características anatômicas, densidade aparente, velocidade de propagação do som e módulo de elasticidade dinâmico .....	27
3.2. Comparação entre as características anatômicas das madeiras analisadas.....	38
3.3. Comparação entre a densidade aparente, velocidade de propagação do som e módulo de elasticidade dinâmico das madeiras analisadas .....	38
4. Discussão .....	48
5. Conclusões .....	53
<b>Capítulo 2. Propriedades físicas, mecânicas e acústica de varetas para arcos de instrumentos de corda</b>	
1. Introdução .....	56
2. Material e métodos .....	59
2.1. Madeiras analisadas e preparação das amostras .....	59
2.2. Densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ).....	60
2.3. Velocidade de propagação do som ( $v$ ) .....	61
2.4. Módulo de elasticidade dinâmico ( $MOE_d$ ) .....	61
2.5. Módulo de elasticidade à flexão estática ( $MOE_e$ ) e Módulo de ruptura (MOR) ..	62
2.6. Resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ). .....	64
2.7. Resistência ao cisalhamento ( $f_v$ ). .....	65
2.8. Retração volumétrica ( $\epsilon_v$ ).....	66

2.9. Análise estatística.....	67
3. Resultados.....	68
3.1. Propriedades física, acústica e mecânicas das varetas longas .....	68
3.2. Propriedades física, acústica e mecânicas das varetas curtas .....	69
3.3. Propriedades físicas, acústica e mecânicas dos corpos-de-prova .....	72
4. Discussão .....	76
5. Conclusões .....	80
<b>Capítulo 3. Influência dos teores de extrativos totais, lignina e holocelulose na qualidade de madeiras para arcos de instrumentos de corda</b>	
1. Introdução .....	82
2. Material e métodos .....	84
2.1. Madeiras analisadas e preparação das amostras .....	84
2.2. Determinação do teor de extrativos, lignina e holocelulose .....	86
2.2.1. Extrativos totais .....	86
2.2.2. Lignina residual (insolúvel) .....	87
2.2.3. Lignina solúvel .....	89
2.2.4. Holocelulose.....	90
2.3. Análise estatística.....	90
3. Resultados .....	90
4. Discussão .....	97
5. Conclusões .....	100
<b>Capítulo 4. Trabalhabilidade, propriedades organolépticas e disponibilidade de mercado em madeiras potenciais para arcos de instrumentos de corda</b>	
1. Introdução .....	102
2. Material e métodos .....	105
2.1. Madeiras analisadas e critério de avaliação da trabalhabilidade .....	105
2.2. Desdobro das madeiras.....	105
2.3. Aplainamento.....	106
2.4. Curvatura com lamparina .....	107
2.5. Lixação .....	108
2.6. Avaliação das propriedades organolépticas.....	109
2.7. Avaliação da disponibilidade comercial das madeiras estudadas.....	109
3. Resultados e discussão.....	111
3.1. Avaliação da trabalhabilidade das madeiras potenciais para arco .....	111
3.2. Avaliação das propriedades organolépticas das madeiras potenciais para arco .....	119
3.3. Disponibilidade em madeiras.....	124
4. Conclusões .....	127
<b>Discussão geral.....</b>	<b>128</b>
<b>Conclusão geral .....</b>	<b>131</b>

<b>Referências bibliográficas</b> .....	132
<b>Resumo</b> .....	143
<b>Abstract</b> .....	144

## **Apresentação**

Esta tese foi dividida em quatro capítulos, sendo que em três deles foram abordados aspectos estruturais, propriedades físicas, mecânicas, acústica e teor dos constituintes químicos em seis madeiras brasileiras objetivando determinar seu potencial para a arquetaria. O quarto capítulo apresenta um conteúdo mais prático, baseado na experiência de um arquiteiro, o Sr. Daniel Romeu Lombardi, que vem confeccionando arcos com as madeiras estudadas. Para fins comparativos, considerou-se a madeira de pau-brasil (*Caesalpinia echinata*), mundialmente consagrada na confecção de arcos e já estudada pelo autor na Dissertação de Mestrado (Longui 2005).

Uma introdução geral, que informa ao leitor um pouco da história do arco, abre o trabalho que é finalizado com a discussão geral dos resultados e as principais conclusões. Completando os estudos científicos, buscou-se a colaboração do Sr. Daniel em todas as etapas do estudo, na tentativa de explicar o que representaria na prática os resultados encontrados nas análises científicas. Entende-se que a parceria entre a ciência e a arte é fundamental para se diversificar as opções de madeiras para arcos, diminuindo assim a pressão sobre o pau-brasil e contribuindo para sua preservação.

### **Apresenta-se a seguir uma breve explicação de cada capítulo:**

O capítulo 1 intitulado **“Estrutura anatômica e sua influência em propriedades física, acústica e mecânica em madeiras potenciais para arcos de instrumentos de corda”** trata das características anatômicas e suas correlações com a densidade aparente, velocidade de propagação do som e módulo de elasticidade dinâmico.

No capítulo 2 intitulado **“Propriedades físicas, mecânicas e acústica de madeiras para arcos de instrumentos de corda”** discutem-se algumas das propriedades físicas, mecânicas e acústica das madeiras, correlacionando-as entre si e avaliando a variação da densidade aparente e da velocidade de propagação do som ao longo das varetas.

**No capítulo 3 intitulado** “Influência dos teores de extrativos totais, lignina e holocelulose na qualidade de madeiras para arcos de instrumentos de corda” busca-se correlacionar os teores

de holocelulose, extrativos totais e lignina das diferentes madeiras com a qualidade das varetas para arcos.

No capítulo 4 intitulado **“Trabalhabilidade, propriedades organolépticas e disponibilidade de mercado em madeiras potenciais para arcos de instrumentos de corda”** avalia-se comparativamente com o pau-brasil, o grau de dificuldade apresentado por cada madeira estudada, durante as diferentes etapas do processo de produção dos arcos, além de suas propriedades organolépticas. Apresenta-se, também, uma pesquisa de mercado que informa a disponibilidade das madeiras potenciais em 30 madeiras do estado de São Paulo.

## 1. Introdução geral

Desde o início da civilização, o homem utiliza a madeira como matéria-prima para os mais diversos fins. Entre suas aplicações, podem ser citadas, a produção de móveis, a construção civil e naval, a produção de embalagens e a confecção de instrumentos musicais (Mainieri *et al.* 1983 e Cavalcante 1986). Historicamente a madeira tem sido o material mais importante empregado na construção de diferentes instrumentos musicais. Este fato deve-se a uma combinação única das propriedades de cada madeira que interagem para compor as suas qualidades (Dickison 2000).

Na produção de instrumentos musicais ou de acessórios para tocar alguns desses instrumentos, destacam-se os arcos para instrumentos de corda, que apesar de indispensáveis, até hoje tem uma história relativamente pouco conhecida (Askenfelt 1992). Historiadores musicais acreditam que os primeiros arcos para instrumentos de corda devam ter surgido em civilizações que tinham contato com cavalos. Imagina-se que o primeiro indivíduo, que por algum motivo passou um arco com crinas de seu cavalo sobre uma corda tensionada, tenha sido o criador de toda a geração de instrumentos de corda (Massmann & Ferrer 1993).

Há registros de arcos relacionados à música desde a Pré-história. Entre eles a cítara de solo e o arco de solo, ambos de Uganda (figuras 1a e 1b). Nesses instrumentos, os arcos eram fincados no chão e ligados a uma “caixa de ressonância” cavada no solo e coberta com peles de animais. Esses arcos representariam os instrumentos musicais que provavelmente eram tocados com outros arcos. Há também o violino chinês de bambu (figura 1c), com arco do mesmo material, usado até hoje na música tradicional chinesa e os violinos hindu e grego, cujos arcos não possuem curvatura (Baines 1961).

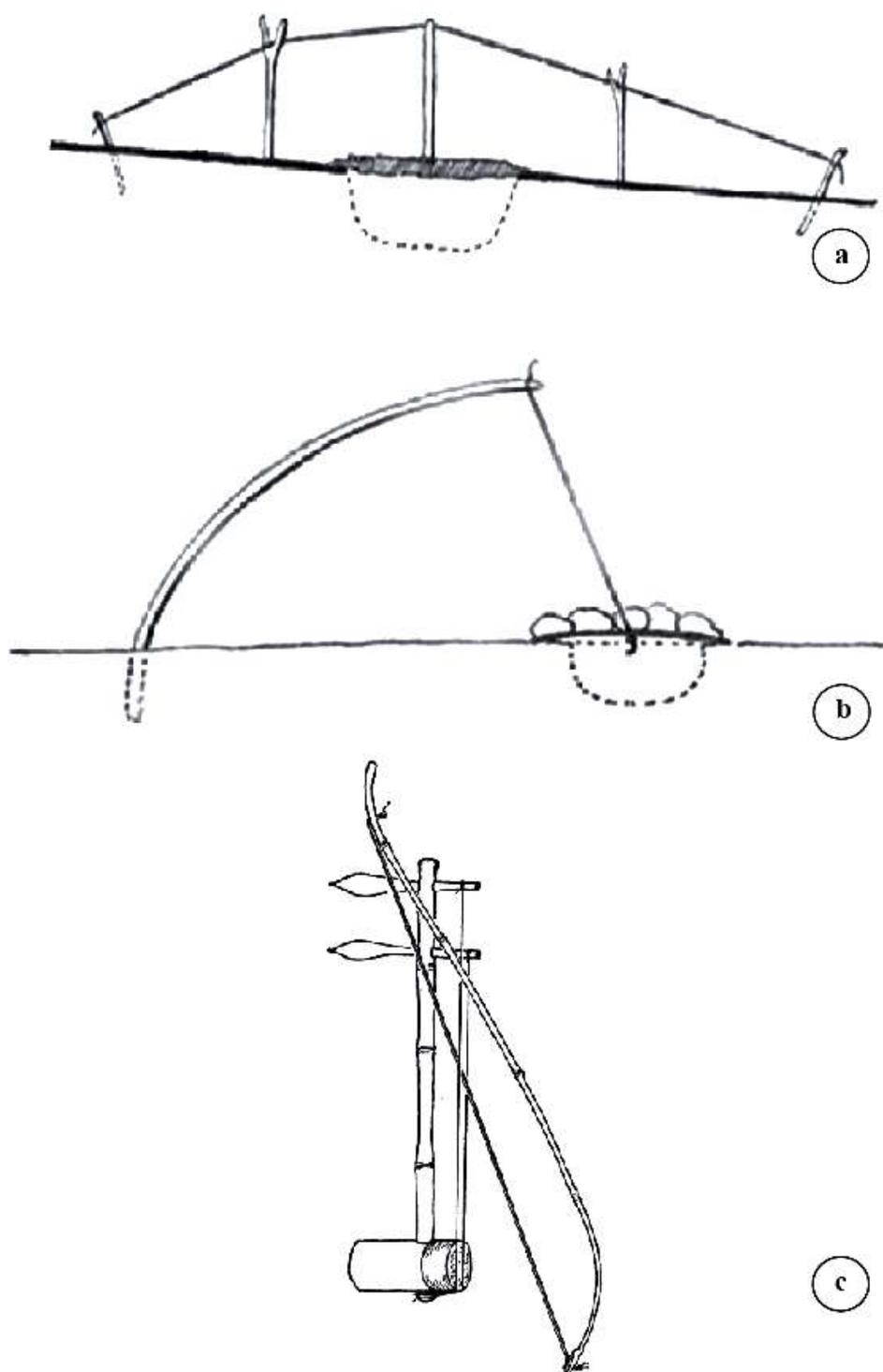


Figura 1. Diferentes tipos de arcos antigos. a. Cítara de solo. b. Arco de solo. c. Violino chinês de bambu. Fonte: Baines, A. 1961. *Musical Instruments Through the Ages*. Galpin Society Faber and Faber, London, Penguin Books.

Na Europa, os arcos da família dos violinos, de acordo com (Lucchi 2009) tiveram origem por volta do século X com as invasões árabes. Desde esse período até a Idade Média e começo do Renascimento, os instrumentos musicais e seus acessórios passaram por mudanças e aperfeiçoamentos graduais de acordo com as exigências musicais. Acompanhando o desenvolvimento dos arcos, nota-se que aqueles usados em instrumentos medievais recebiam curvatura semelhante ao arco de flechas e eram fabricados em madeira ou bambu.

No entanto, durante os séculos XVI e XVII, impulsionados pelas novas tendências musicais do período, os instrumentos e os arcos tiveram grande desenvolvimento e surgiram os protótipos dos instrumentos e arcos atuais, que apresentam mudança na curvatura, ou seja, em sentido convexo, além de alterações no mecanismo de tensionamento da crina (Baines 1961; Rymer 2004) (figuras 2 e 3). Com o desenvolvimento musical e a exigência em relação aos instrumentos, percebeu-se que os arcos eram de extrema importância na execução da música. Rymer (2004) menciona que para muitos músicos, o arco expressa mais a alma da música e é mais importante do que o próprio instrumento. Segundo o autor, até os músicos iniciantes sabem que é melhor possuir um ótimo arco e um violino ruim, do que o inverso.

Assim, os arcos que inicialmente eram fabricados com madeiras mais facilmente encontradas, passaram a receber maior atenção e iniciou-se a busca por madeiras ideais para sua fabricação (Lombardi, comunicação pessoal). O modelo de arco atual (figura 4) é resultado do aprimoramento dos trabalhos de uma série de arqueteiros franceses, iniciada por Tourte, seguido de Peccatte, Sartory, Voirin e Lamy (Askenfelt 1995 e Rymer 2004).

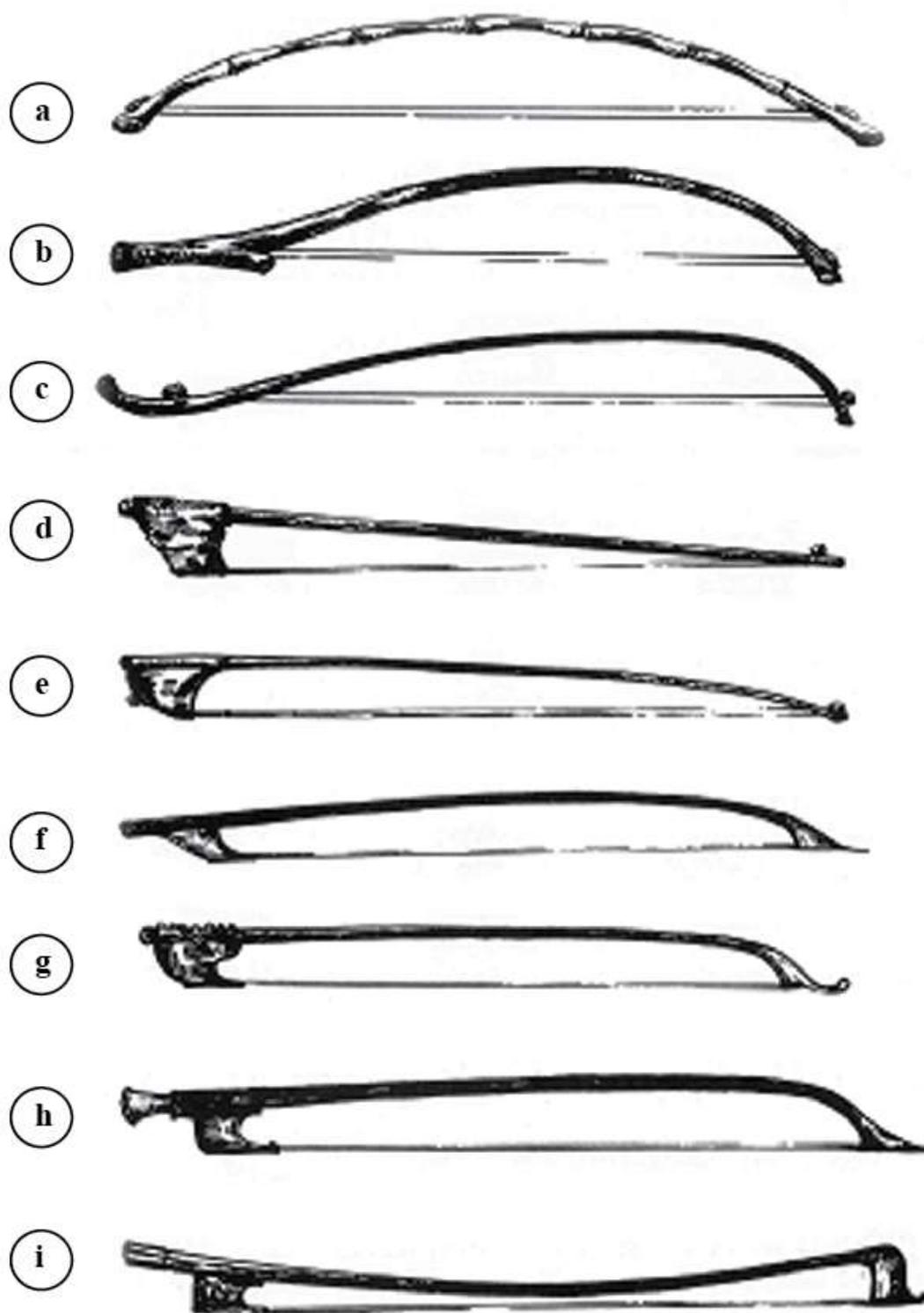


Figura 2. Aperfeiçoamento dos arcos ao longo dos anos. a. Oriente médio. b. Século XIV – Europa. c. Século XIV – Algéria. d. Século XIV – Normandia. e. Século XVI – Grécia. f. Primeira metade de 1600 – Mersenne. g. Final de 1600 – Bassani. h. Primeira metade de 1700 - Tartini e Cramer. i. Final de 1700 - Viotti e Tourte.

Fonte: Lehard, L. 1974. La Liuteria Classica e la Liuteria Moderna. G. Zanibon. Padova.

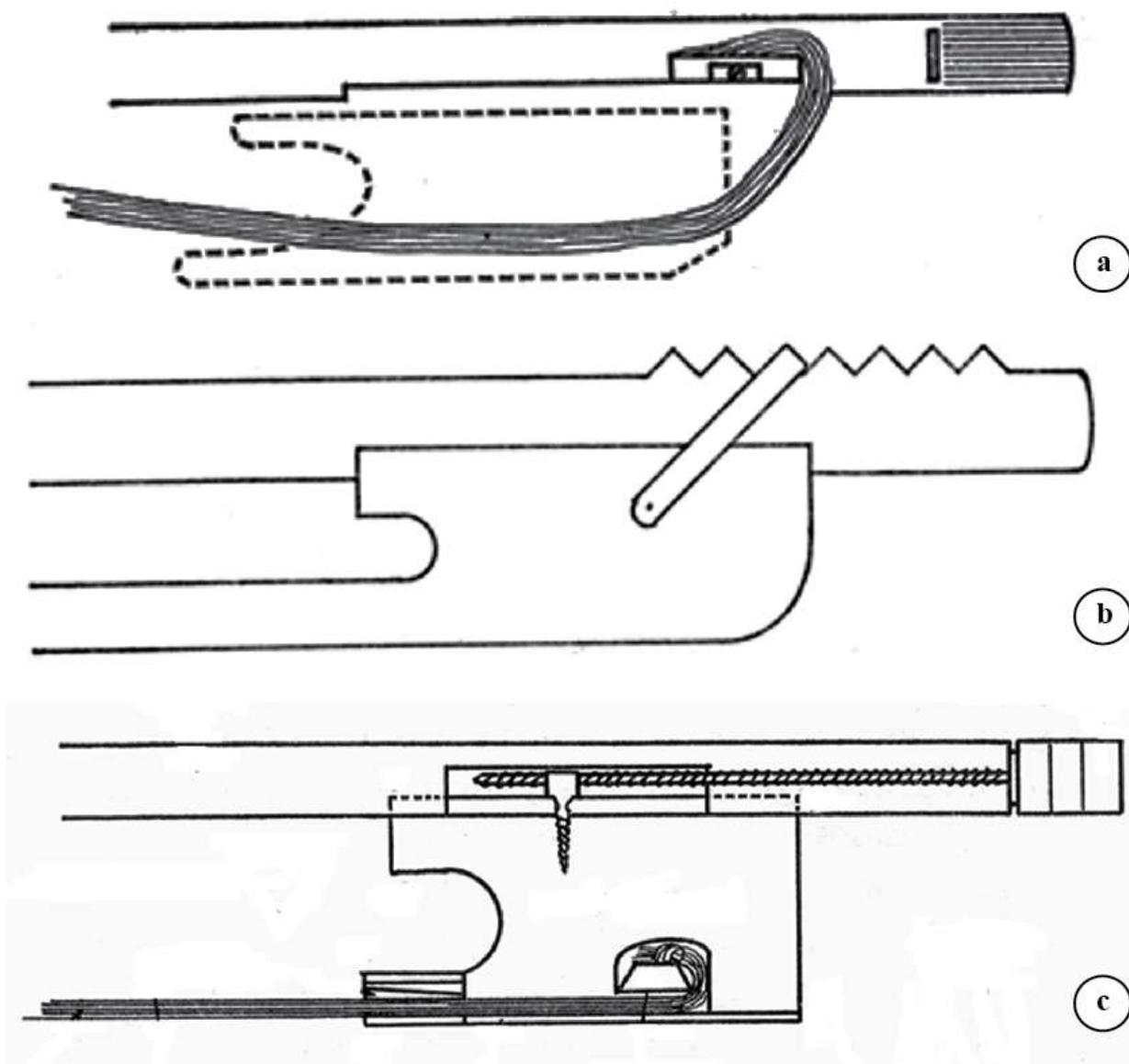


Figura 3. Aperfeiçoamento do encaixe do talão ao longo dos anos. Essas alterações permitiram maior tensionamento da vareta e um melhor ajuste da crina. a. Século XVI. b. Século XVII. c. Século XVIII.

Fonte: Lehard, L. 1974. La Liuteria Classica e la Liuteria Moderna. G. Zanibon. Padova.

O novo desenho dos arcos adotado a partir do final do século XVIII possibilitou que as crinas se dobrem ao serem pressionadas contra as cordas, dessa forma não há uma força no sentido de endireitar a vareta. Com isso, mantém-se a tensão das crinas relativamente inalterada, permitindo ao músico bom controle do arco independente da pressão exercida ao tocar (Massmann & Ferrer 1993).

De acordo com Planta (1980) os arcos para instrumentos de corda basicamente apresentam três partes principais: a vareta, um conjunto composto de talão e parafuso e a crina de cavalo. Na vareta do arco, podem ser notadas duas extremidades bem distintas, em uma delas há uma região mais saliente de madeira chamada de ponta, enquanto a outra apresenta um orifício para encaixe do talão. O conjunto de talão e parafuso forma um dispositivo com a função de tensionar a crina e, também de propiciar o equilíbrio do arco em relação à ponta. A crina ao ser friccionada contra as cordas do instrumento faz com que este produza o som. Normalmente a crina é retirada de cavalos, no entanto, dependendo da disponibilidade, fios sintéticos também podem ser empregados para esta finalidade (figura 4).

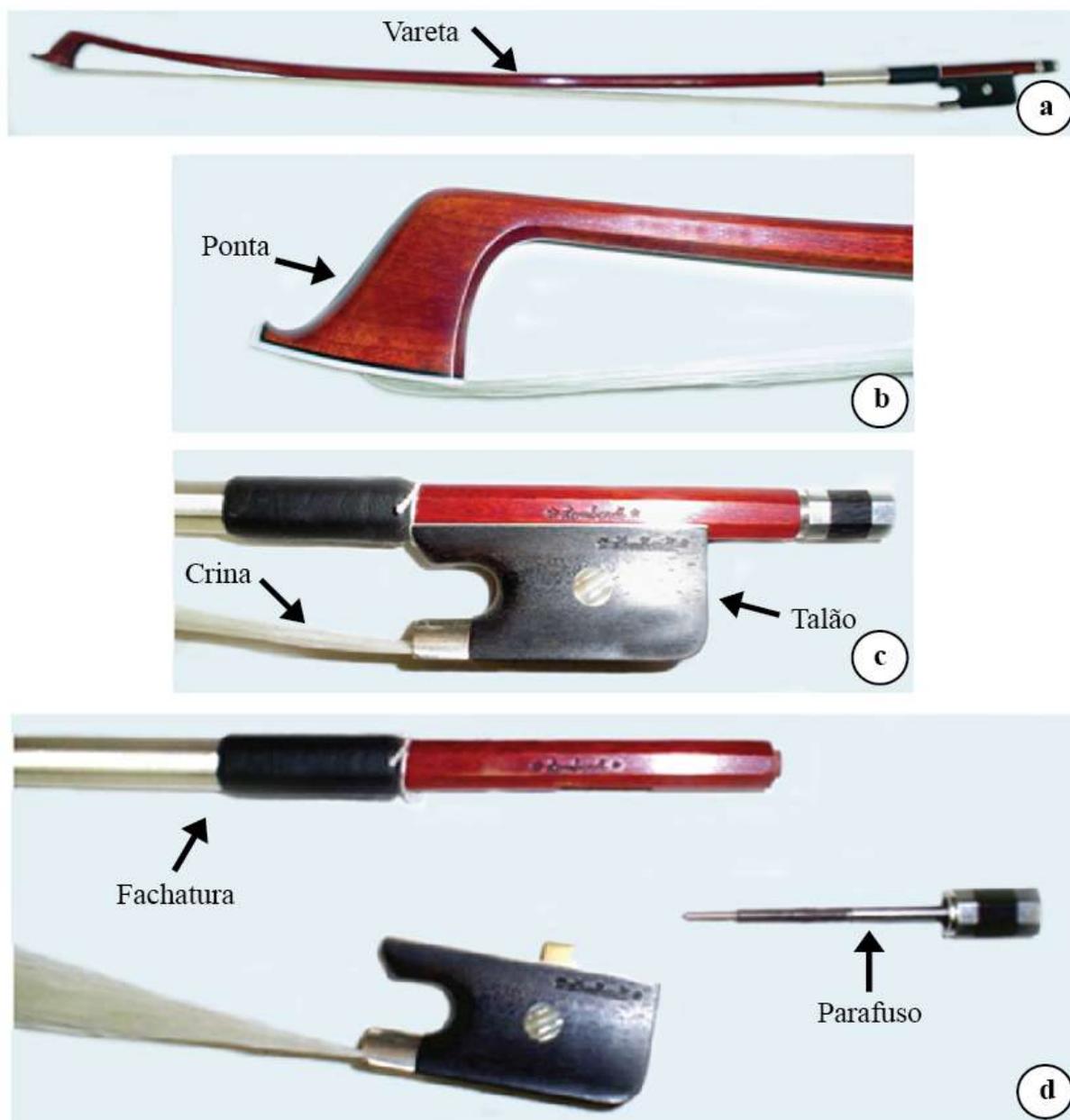


Figura 4. Principais partes de um arco moderno. a. Aspecto geral de um arco moderno pronto. b. Detalhe da ponta do arco. c. Detalhe do talão do arco, observar a fachatura (em couro preto) que protege a madeira do contato com as mão do músico. d. Talão separado do arco, notar o parafuso utilizado para tensionar a madeira e esticar a crina.

Fotos realizadas a partir de um arco da Lombardi arcos.

Na Europa, antes da metade do século XVIII, várias madeiras eram empregadas na produção de arcos. Entre elas sempre houve o predomínio de espécies provenientes das Américas do Sul e Central, como pau-cobra (*Brosimum guianense* (Aubl. Huber) e pau-santo (*Zollernia paraensis* Huber), durante o período Barroco, e pau-brasil (*Caesalpinia echinata* Lam.) durante os períodos Clássico-Romântico e Moderno. Francois Tourte (1747-1835) é reconhecido como um dos grandes fabricantes de arco, trabalhando em conjunto com o violinista G.B.Viotti, Tourte compilou uma série de alterações, a maioria de sua própria autoria, que propiciaram ao arco novos movimentos e permitiram aos músicos explorar o instrumento com novos arranjos e timbres, impossíveis de serem realizados com um arco barroco; algumas das alterações de Tourte foram: vergar a madeira em sentido convexo; confeccionar a ponta mais alta, o que permite o posicionamento das crinas mais distantes da vareta; desenvolver um mecanismo com parafuso para tensionar as crinas (figura 3c); estabelecer as dimensões e peso ideais do arco e qualificar a madeira do pau-brasil como a ideal para a fabricação dos arcos, estas inovações lhe renderam o apelido de Stradivarius do arco (Baines 1961, Rymer 2004 e Lucchi 2009). Desde o período de Tourte, a madeira do pau-brasil se adequou tão bem às exigências do formato de arco, que até hoje é a mais utilizada mundialmente para tal finalidade (Pierce 2002).



Figura 5. Ilustração dos irmãos Tourte, François Tourte em primeiro plano e Xavier ao fundo, arquiteiros franceses considerados os mais importantes no desenvolvimento dos arcos modernos.  
Fonte: [www.todafruta.com.br/todafruta/imgsis9623.jpg](http://www.todafruta.com.br/todafruta/imgsis9623.jpg)

A madeira do pau-brasil é a preferida entre os arquiteiros, pois apresenta de uma série de características únicas, como a densidade, resistência, manutenção da curvatura, além de sua beleza e durabilidade (Pierce 2002, Bueno 2002 e Rymer 2004). Alves *et al.* (2008) demonstraram que a qualidade da madeira de *Caesalpinia echinata* está relacionada às suas características anatômicas, como a frequência de vasos e raios, uma vez que estas influenciam a densidade da madeira, propriedade física importante para a qualidade dos arcos. Além disso, amostras de *C. echinata* que forneceram arcos de melhor qualidade apresentaram também maior porcentagem de fibras. Situação esta que, além de afetar a densidade, associada a um maior teor de lignina, confere maior rigidez à madeira, o que pode influenciar as propriedades físicas, mecânicas e acústicas das amostras.

De acordo com Woodhouse (1993a, b) a interação entre as cordas e o arco é altamente complexa e ainda não muito bem entendida. Geralmente o desempenho de um arco é avaliado pela facilidade com a qual um som de alta qualidade é produzido por um violinista experiente. Para o autor os fatores que influenciam a tocabilidade de um arco são em parte estruturais (formato e ponto de equilíbrio) e em parte dependentes do material utilizado (densidade, rigidez e o decaimento vibracional).

Além da avaliação das madeiras realizada pelos arquiteiros, deve-se levar em conta a avaliação dos músicos, uma vez que são eles que utilizam os arcos. No entanto, tal avaliação não é feita por meio de parâmetros objetivos, já que cada músico tem sua forma de qualificar um arco; as opiniões divergem e, em muitos casos o que pode ser inadequado para um músico pode ser perfeitamente compatível com a forma de tocar de outro. Os músicos ao adquirirem um arco levam em conta sua beleza, que compreende a cor e textura da madeira, bem como os tipos de materiais empregados para o acabamento final e também sua tocabilidade. Para avaliar a tocabilidade o músico precisa sentir o arco, portanto sua classificação é essencialmente subjetiva.

## 2. Justificativas

O pau-brasil (*Caesalpinia echinata* Lam.) é a árvore símbolo do Brasil e, de acordo com a portaria IBAMA n.37 – N, de abril de 1992, encontra-se em perigo de extinção. Dentre os motivos que contribuem para essa situação estão a retirada e a exportação ilegal de sua madeira para fabricação de arcos de instrumentos de corda.

Para que outras espécies sejam consideradas adequadas para a fabricação dos arcos, são necessários estudos que avaliem suas características anatômicas e propriedades físicas, mecânicas, acústicas e químicas, além da fabricação de arcos testes com essas madeiras. Uma vez selecionadas outras madeiras com potencial para arquetaria, estes arcos podem ser oferecidos aos músicos que poderão testá-los para avaliar sua qualidade.

Não se propõem a substituição da madeira de *C. echinata* na fabricação dos arcos, uma vez que essa madeira é reconhecidamente usada há séculos com grande sucesso e teve recentemente sua qualidade comprovada cientificamente (Alves *et al.* 2008b). A intenção é propor alternativas, se possível para arcos de músicos solistas, ou para músicos amadores e principiantes, a preços mais acessíveis quando comparados aos arcos de *C. echinata*. Além disso, esse conhecimento pode contribuir para a exploração racional e sustentada de nossas florestas, pois permitiria um rodízio na exploração de algumas espécies para fins mais nobres e diminuiria a pressão sobre o pau-brasil.

Assim, propõe-se o presente estudo, cujos objetivos são:

## 3. Objetivos do estudo

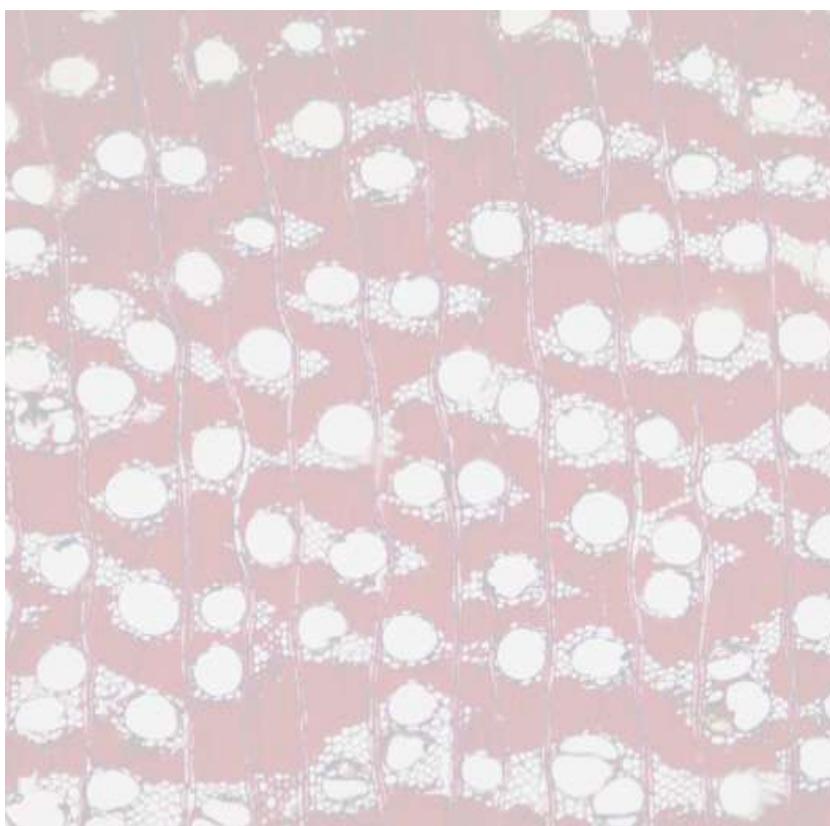
### 3.1. Objetivos gerais

- Investigar o potencial de algumas madeiras nativas na produção de arcos para instrumentos de corda, por meio da comparação de suas características com as encontradas na madeira de *C. echinata*, estabelecida como modelo.
- Estabelecer indicações em madeiras para arcos, com base em suas características anatômicas, físicas, mecânicas, químicas e acústica;
- Propor madeiras alternativas à *C. echinata* na fabricação dos arcos para instrumentos de corda.

Com base na estrutura anatômica e nas propriedades físicas, mecânicas, acústica e químicas, além da avaliação da trabalhabilidade e propriedades organolépticas testa-se a hipótese que podem ser selecionadas madeiras para arcos de instrumentos de corda.

# Capítulo 1

**Estrutura anatômica e sua influência na densidade aparente, velocidade de propagação do som e módulo de elasticidade dinâmico em madeiras potenciais para arcos de instrumentos de corda**



## 1. Introdução

Ao longo de muitos anos, várias madeiras tropicais foram utilizadas para a fabricação de diversos instrumentos musicais ou parte deles, este fato deve-se às suas propriedades como alta densidade e rigidez (Holz 1996). Especialmente no caso dos arcos para instrumentos de corda, desde antes da metade do século XVIII, arquiteiros europeus empregavam diferentes espécies de madeira, até que Francois Tourte no final desse mesmo século estabeleceu à madeira de *C. echinata* como a ideal para a fabricação dos arcos (Baines 1961, Lucchi 2009). Desde aquela época e até hoje, é a madeira mais utilizada e aceita pelos músicos para tal finalidade. Essa escolha se deve às suas características únicas de ressonância, densidade, manutenção da curvatura, durabilidade e beleza (Pierce 2002 e Bueno 2002).

Atualmente existe grande dificuldade na aquisição da madeira de *C. echinata*, uma vez que essa espécie foi incluída na lista da CITES - Convenção sobre o Comércio Internacional das Espécies da Flora e Fauna Selvagens em Perigo de Extinção (Rocha & Simabukuro 2008), o que restringe sua exploração comercial de forma legal. Assim, trabalhos que visam à utilização de outras madeiras e que podem contribuir para reduzir os efeitos do corte ilegal de *C. echinata* são indispensáveis.

Segundo Bueno (2002), na França, Inglaterra e Itália diversos materiais vêm sendo testados na fabricação de arcos com a finalidade de substituir a madeira de *C. echinata*. Recentemente bons resultados foram obtidos com fibra de carbono (Codabow 2009).

A escolha de outras madeiras para arcos deve ter como base características específicas, como densidade acima de  $950 \text{ kg m}^{-3}$  e velocidade de propagação do som igual ou superior a  $5000 \text{ m s}^{-1}$  (Longui 2005, Wegst 2006 e Alves *et al.* 2008a). Vários autores entre eles Kollmann & Côté Jr. (1968), Panshin & De Zeeuw (1980) e Hoadley (2000) mencionam que a densidade é uma das propriedades mais importantes da madeira por determinar variações em outras propriedades. Slooten & Souza (1993) descrevem que durante séculos os princípios de ressonância e propriedades de propagação do som na madeira foram aplicados na construção de instrumentos musicais de madeira, antes mesmo de serem comprovados cientificamente.

No Brasil, de acordo com Lombardi (comunicação pessoal) outras madeiras são utilizadas em pequena escala na confecção de arcos, entre elas podem ser citadas a maçaranduba (*Manilkara* spp.) e ipê (*Handroanthus* spp.). A partir de estudos realizados com essas duas madeiras, Longui (2005) sugere a possibilidade da madeira de *Handroanthus* spp. fazer parte do mercado para arcos, uma vez que apresenta propriedades físicas, mecânicas e acústicas similares ou superiores às de *C. echinata*, além de mostrar uma homogeneidade na sua estrutura anatômica apresentando pequena variação nas dimensões e frequência das células e conseqüentemente em propriedades como a densidade e a velocidade de propagação

do som, o que permite um grande aproveitamento da árvore abatida. Segundo esse autor, o maior empecilho na utilização de *Handroanthus* spp. está na sua cor; os tons amarelados dessa madeira representam uma novidade em um mercado conservador, em contraposição com os tons avermelhados de *C. echinata*, já consagrados há séculos no mercado para arcos.

Cabe salientar que, de acordo com Lombardi (comunicação pessoal), muitos músicos brasileiros desconhecem qual é a madeira empregada na confecção de seus arcos; contudo, sabem que muitos arcos de renome são de *C. echinata*, daí a preferência pela espécie. No entanto, não têm consciência da situação atual da mesma e que podem existir outras madeiras com potencial para a fabricação dos arcos. Os músicos se mostram muitas vezes relutantes, mesmo quanto a testar arcos que apresentam coloração mais clara ou tons amarelados ou já os testam com certa desconfiança quanto à sua qualidade.

Sem dúvida, trabalhar com a madeira e transforma-la em um instrumento musical ou em um arco constitui uma arte que exige muita sensibilidade e conhecimento dessa matéria-prima. No entanto, se o luthier ou o arquiteiro não tiverem em mãos material adequado, mesmo com muita habilidade, o resultado final não terá a qualidade esperada.

Diante da diversidade de espécies fornecedoras de madeira, espera-se que, pelo menos, algumas possam fornecer matéria-prima de qualidade para os arcos. Assim, o sucesso na utilização de outras madeiras depende da investigação de suas características, da disposição dos arquiteiros em fabricar arcos testes com essas madeiras e dos músicos em testá-los. Tal fato pode enriquecer o mercado de arcos, possibilitando novas cores e texturas ainda não exploradas.

Nesse contexto, os objetivos desta etapa foram: analisar quantitativamente a estrutura anatômica macroscópica e microscópica de diferentes amostras de *Handroanthus* spp., *Hymenaea* spp., *Mezilaurus itauba*, *Dipteryx* spp., *Diploptropis* spp. e *Astronium lecointei*; determinar a densidade aparente, a velocidade de propagação do som e o módulo de elasticidade dinâmico; investigar as correlações existentes entre as características anatômicas, determinar sua influência nas demais características e comparar os resultados com aqueles determinados para *C. echinata*, madeira consagrada na fabricação de arcos para instrumentos de corda, visando à sugestão de madeiras alternativas para a arquetaria.

## **2. Material e métodos**

### **2.1. Seleção das madeiras**

Selecionou-se a madeira de ipê (*Handroanthus* spp.), uma vez que já havia sido apontada em estudo anterior como promissora na fabricação dos arcos (Longui 2005). Para a seleção das demais amostras, buscaram-se madeiras no comércio local com densidade superior a  $950 \text{ kg m}^{-3}$ , com base em valores apresentados em literatura (Mainieri *et al.* 1989), este valor de densidade foi considerado a partir de trabalhos anteriores (Longui 2005 e Alves *et al.* 2008). Assim foram escolhidas: itaúba (*Mezilaurus itauba*); jatobá (*Hymenaea* spp.); cumaru (*Dipteryx* spp.); sucupira (*Diploptropis* spp.) e muiracatiara (*Astronium lecointei*).

Algumas informações sobre as madeiras estudadas são apresentadas a seguir.

### ***Ipê - Handroanthus* spp. (Bignoniaceae)**

Recentemente Grose & Olmstead (2007) com base em diversos estudos com espécies do gênero *Tabebuia*, estabeleceram entre outras características que àquelas que apresentam madeiras muito densas e com grandes quantidades de lapachol devem ser classificadas no gênero *Handroanthus*. Como as madeiras investigadas no presente estudo possuem tais características, segundo os critérios mencionados pelos autores, todas pertencem ao gênero *Handroanthus*, sendo, portanto tratadas como tal, neste trabalho.

Espécies de *Handroanthus* estão distribuídas desde o México até a Argentina, sendo que a maioria ocorre em território brasileiro. Apresentam madeira escura, pesada, extremamente dura e muito resistente ao apodrecimento (Rizzini 1986, Jankowsky *et al.* 1990). Popularmente, algumas dessas espécies são conhecidas como pau-d'arco (Paula & Alves 2007), uma vez que, desde o passado até a atualidade, são utilizadas por indígenas como matéria-prima para a confecção de arcos para caça, o que evidencia sua grande rigidez e resistência à ruptura.

A madeira de *Handroanthus* spp. é utilizada como matéria prima em uma série de atividades, como na construção civil e naval e na fabricação de móveis, artigos esportivos e embalagens. Além de apresentar características similares às de *C. echinata*, que possibilitam a sua aplicação na confecção dos arcos (Longui 2005) a madeira de *Handroanthus* spp. é encontrada facilmente no comércio madeireiro e pode ser comprada legalmente por um preço acessível.

### **Itaúba - *Mezilaurus itauba* Meissn. Taub. (Lauraceae)**

*Mezilaurus itauba* ocorre na floresta amazônica de terra firme e pode atingir até 40 m de altura e 90 cm de diâmetro (Paula & Alves 2007). Sua madeira apresenta aspecto fibroso, é muito dura e pesada, de cerne amarelo-oliváceo quando recém cortado, tornando-se pardo-

havana-claro ou escuro após algum tempo de exposição ao ar. Por suas características é conhecida entre os índios tupi como árvore pedra. É utilizada, por exemplo, em construção civil e naval, móveis e cabos de ferramentas (Mainieri *et al.* 1983, Rizzini 1986).

#### **Jatobá - *Hymenaea* spp. (Fabaceae)**

O gênero *Hymenaea* compreende cerca de 15 espécies que ocorrem do México às Américas Central e do Sul; dessas, 13 ocorrem no Brasil (Rizzini 1986, Carvalho 2003). Uma das espécies mais conhecidas é *H. Courbaril*, que pode atingir até 35 m de altura e 120 cm de diâmetro. A espécie ocorre desde o sul do México até a Bahia; na Amazônia, ocorre nas matas de terra firme e várzeas altas (Rizzini 1986). Possui madeira muito pesada, com cerne de castanho-claro-rosado a castanho-avermelhado (Carvalho 2003). Por apresentar propriedades mecânicas altas a madeira de *Hymenaea* spp. é usada na construção civil pesada, artigos esportivos, móveis de luxo, embarcações, cabos de ferramenta e instrumentos musicais (Mainieri *et al.* 1983, Brunelli *et al.* 1997).

#### **Cumaru - *Dipteryx* spp. (Fabaceae)**

O gênero *Dipteryx* tem distribuição na América do Sul Tropical, no Brasil ocorre na Amazônia, desde o Acre até o Maranhão, tanto em terra firme como em várzeas. Sua madeira é muito pesada, dura ao corte, de aspecto fibroso atenuado e cerne de cor castanho-claro-amarelado a cinzento marrom. É muito utilizada na construção civil, movelaria, embalagens, construção naval, além de outras aplicações (Mainieri *et al.* 1983, Mainieri *et al.* 1989).

#### **Sucupira - *Diplotropis* spp. (Fabaceae)**

O gênero *Diplotropis* possui mais de 20 espécies, de ocorrência nos estados do Amazonas, Pará, Roraima, Rondônia, Mato-Grosso, Amapá e Maranhão. Sua madeira assemelha-se muito às das espécies do gênero *Bowdichia*, sendo que no comércio madeiras dos dois gêneros são vendidas sem distinção como sucupira, a ausência de raios estratificados em *Diplotropis* é uma característica para separação. A madeira é pesada de cor castanha avermelhada, textura grossa, aspecto fibroso acentuado e grã reversa. Devido às suas características físico-mecânicas serem classificadas entre alta e média serve para a construção civil, mobiliário de alta qualidade e em peças decorativas (Rizzini 1986, Heywood 1993; Brunelli *et al.* 1997).

### **Muiracatiara - *Astronium lecointei* Ducke (Anacardiaceae)**

De acordo com Rizzini (1986), o gênero *Astronium* possui cerca de 10 espécies distribuídas do México até a Argentina, sendo muito importante no Brasil. A muiracatiara ou Gonçalo-Alves é árvore de grande porte que ocorre na região amazônica e nos estados do Mato Grosso e Maranhão. A madeira é muita pesada, de cor amarela avermelhada com listras longitudinais escuras. Possui propriedades físico-mecânicas altas e médias, sendo empregada na construção civil, assoalhos domésticos, móveis e cabos de ferramentas (Brunelli 1997).

### **2.2. Obtenção das madeiras**

As amostras de madeira foram adquiridas de diversos fornecedores na cidade de São Paulo, em forma de pranchas, caibros ou ripas, conforme a disponibilidade. Devido à impossibilidade de se determinar o local exato de origem dessas madeiras, para assegurar que as amostras fossem oriundas de indivíduos diferentes, adquiriu-se apenas uma peça de cada fornecedor. Foram avaliadas cinco peças (=indivíduos) de *Handroanthus* e três de cada uma das outras madeiras.

No ato da compra, para comprovar a identificação das madeiras, as mesmas foram polidas e observadas com auxílio de lupa conta-fios (10 aumentos). Posteriormente, foram comparadas com amostras padrão do acervo da Xiloteca do Instituto Florestal (SPSFw).

### **2.3. Preparação e seleção das amostras**

As amostras foram cortadas com auxílio de serra de fita na forma de varetas utilizadas na confecção de arcos para instrumentos de corda e que apresentam cerca de 740 mm × 15 mm × 15 mm (figura 1). Foram confeccionadas no total cerca de 80 varetas e para todas foram determinadas a densidade aparente e a velocidade de propagação do som (itens 2.4 e 2.5). Com base na experiência do arqueteiro Sr. Daniel Lombardi e segundo os critérios estabelecidos em Longui (2005) Alves *et al.* (2008a), selecionaram-se 45 varetas considerando os maiores valores de densidade aparente e velocidade de propagação do som, além do aspecto geral e ausência de defeitos na madeira, dentre elas, 15 foram de *Handroanthus* (três varetas por peça) e 30 das demais madeiras, sendo duas por peça.



Figura 1. Preparação do material de estudo. a. Corte das peças para obtenção das varetas. b. Marcação das varetas nas peças. c. Corte das varetas. d. Aspecto geral de algumas das varetas empregadas no estudo. Fotos (b e c) de Erika Amano.

## 2.4. Densidade aparente ( $\rho_{ap}$ )

Para a determinação da densidade aparente todas as varetas tiveram sua massa determinada em balança digital. Em seguida, foram imersas em tubo de PVC com água, que foi recolhida por meio de mangueira em uma proveta, determinando-se, assim, o volume de água deslocado pela vareta (figura 2).

A partir dos valores obtidos foi empregada a expressão:

$$\rho_{ap} = \frac{P_u}{V_u}$$

Em que:

$\rho_{ap}$  : densidade aparente,  $\text{kg m}^{-3}$ ;

$P_u$  : massa do corpo-de-prova, kg;

$V_u$  : volume deslocado pelo corpo-de-prova,  $\text{m}^3$ .



Figura 2. Determinação da densidade aparente. a. Obtenção da massa das varetas. b. Verificação do volume deslocado pelas varetas quando imersas em água.

## 2.5. Velocidade de propagação do som (v)

A velocidade de propagação do som ( $v$ ) através das varetas foi determinada com auxílio do aparelho G. Lucchi Elasticity Tester. Este aparelho é produzido e comercializado pelo músico e arquiteiro italiano Giovanni Lucchi, sendo amplamente utilizado por produtores de instrumentos musicais e arcos no mundo todo (Daniel Lombardi, comunicação pessoal). O equipamento produz um impulso ultra-sônico e possui duas sondas, uma geradora do sinal e outra receptora. As sondas foram posicionadas junto às extremidades de cada vareta e o tempo que o impulso levou para percorrer a amostra foi anotado (figura 3a). Em seguida, o comprimento das varetas foi determinado com auxílio de trena (figura 3b). Com o conhecimento desses dois valores calculou-se a velocidade de propagação do som, sendo os valores expressos em:  $v = \text{metros/segundo}$  (Lucchi 1986).

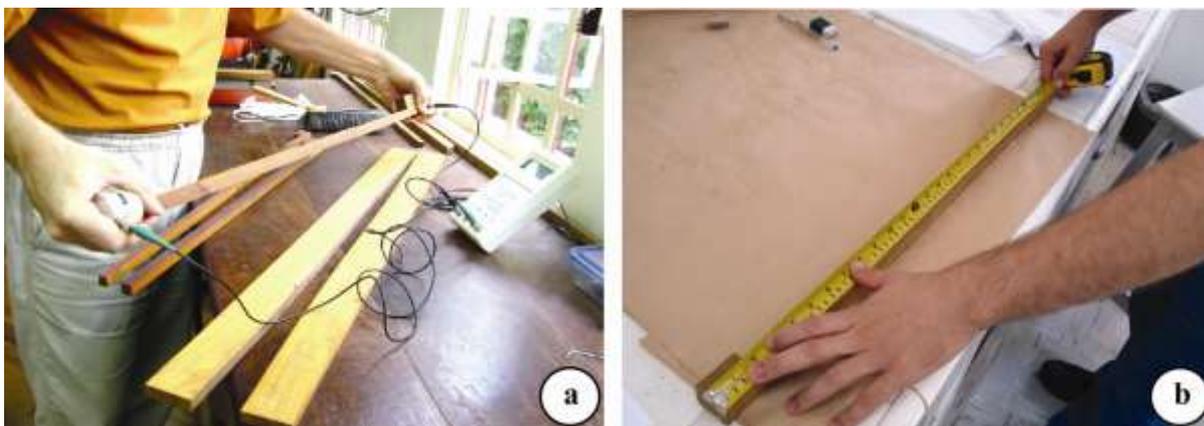


Figura 3. Determinação da velocidade de propagação do som nas varetas. a. Estabelecimento do tempo que o impulso levou para percorrer a vareta. b. Mensuração do comprimento da vareta. Foto (a) de Erika Amano.

## 2.6. Módulo de elasticidade dinâmico ( $MOE_d$ )

A partir dos valores de densidade e velocidade de propagação do som através da madeira, foi calculado o módulo de elasticidade dinâmico conforme Lucchi (1986), empregando-se a seguinte expressão:

$$E = \frac{\text{velocidade}^2}{100} \times \text{densidade}$$

Cabe destacar que para esse estudo foi empregado o módulo de elasticidade dinâmico, pois se trata de um método não destrutivo, o que permitirá que as varetas estudadas sejam transformadas em arcos, como vem ocorrendo, uma vez que se estabeleceu parceria com o arqueteiro Daniel Lombardi ([www.lombardiarcos.com.br](http://www.lombardiarcos.com.br)). Assim é possível avaliar nas varetas, as características mecânicas, bem como a existência de defeitos, o que inviabilizaria seu uso.

A validade dos métodos não destrutivos foi comprovada em Alves *et al.* (2008a), que encontraram equivalência entre os valores de algumas propriedades mecânicas obtidas por meio de métodos destrutivos e com os métodos não destrutivos, que não inviabilizam o uso posterior da vareta.

## 2.7. Análise anatômica da madeira

Corpos de prova, com cerca de 2 cm<sup>3</sup>, foram retirados da região da vareta subsequente à ponta do futuro arco, como se vê na figura 4. Desses, foram obtidas secções nos planos transversal e longitudinal tangencial, além de material dissociado.

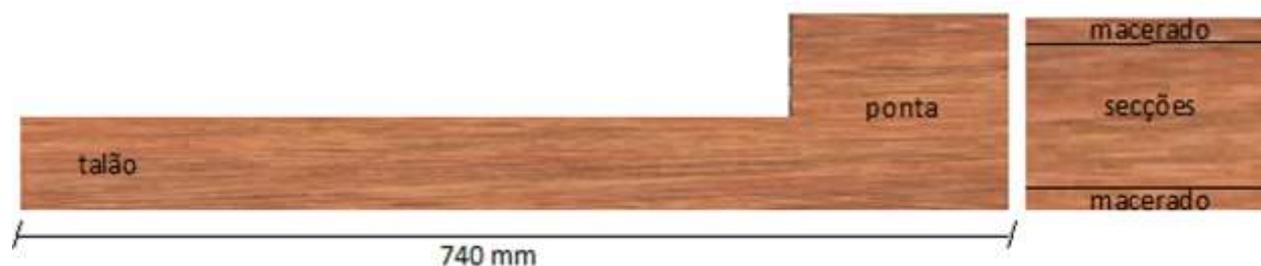


Figura 4. Representação esquemática dos corpos de prova para as análises anatômicas.

Os corpos de prova foram amolecidos por meio do cozimento em água e glicerina na proporção de (4:1) até apresentarem condições ideais para o seccionamento (figura 5a). As secções histológicas foram obtidas em micrótomos de deslize marca Leitz 1208 e Zeiss-Hyrax S50, com espessura entre 14 e 30  $\mu\text{m}$  (figura 5b). As secções foram clarificadas por meio da lavagem em hipoclorito de sódio a 60% para retirada de conteúdos celulares (figura 5c); submetidas à dupla coloração (figura 5d) com safranina e azul de astra 1% (9:1); lâminas provisórias foram montadas em glicerina a 60% para as mensurações (Johansen 1940, Sass 1951).

Além das secções histológicas, foi preparado o lenho dissociado segundo o método de Franklin modificado (Berlyn & Miksche 1976). Palitos finos foram cortados (figura 5e) e colocados em vidros tipo “wheaton”, contendo solução de peróxido de hidrogênio 100 volumes e ácido acético glacial (1:1) (figura 5f). Os vidros foram vedados com fita adesiva e permaneceram 48 horas em estufa a 60<sup>o</sup>C. Posteriormente, o material foi lavado com água corrente e corado com safranina 1% alcoólica (figura 5g).

Foram avaliadas as características anatômicas sugeridas pelo IAWA Committee (1989). Todas as mensurações foram realizadas em microscópios equipados para captura de imagens e sistema semi-automático de medições - Marca Olympus modelo BX 50 e CX 31 com software de análise de imagens Image – Pro Express versão 6.3 (figura 5h).

Também foi realizado o cálculo do coeficiente de flexibilidade das fibras (CF), um indicativo do grau de colapso e resistência à ruptura dessa célula, que é utilizado na produção de papel (Milanez & Foelkel 1981) e recentemente empregado na avaliação acústica de madeiras (Brancheriau *et al.* 2006a e b).

O cálculo foi realizado empregando-se a seguinte expressão:

$$CF = \frac{DL}{DF} \times 100$$

Em que:

CF: coeficiente de flexibilidade das fibras;

DL: diâmetro do lume da fibra ( $\mu\text{m}$ );

DF: diâmetro da fibra ( $\mu\text{m}$ ).



Figura 5. Preparação das madeiras para as análises anatômicas e avaliação ao microscópio. a. Cozimento dos corpos-de-prova. b. Seccionamento ao micrótomo de deslize. c. Clarificação das secções. d. Coloração das secções. e. Palitos retirados das extremidades do corpo-de-prova para preparação do lenho dissociado. f. Palitos acondicionados em vidro. g. Lenho dissociado pronto. h. Conjunto de equipamentos para captura, análise das imagens e mensuração das células.

## 2.8. Análise estatística

A análise estatística dos resultados foi realizada com auxílio do programa *SigmaStat 3.5* da *SPSS Incorporation*. Inicialmente realizou-se análise estatística descritiva e a comparação entre as médias e desvios-padrão para testar as diferenças entre os grupos. Com os resultados iniciais, empregou-se o "t-test sample size" que comprovou ser suficiente o n adotado de acordo com Eckblad (1991). Para cada característica foi adotado n=25. Em seguida, para as características anatômicas, considerando a distribuição dos dados, foi aplicado o Dunn's teste. Para densidade aparente, velocidade de propagação do som e módulo de elasticidade dinâmico foi aplicado o teste de Tukey. Além disso, para cada madeira realizaram-se análises de regressão linear para investigar a correlação entre as características anatômicas e as propriedades supracitadas.

## 3. Resultados

### 3.1. Correlação entre as características anatômicas, densidade aparente, velocidade de propagação do som e módulo de elasticidade dinâmico

Quanto à correlação entre as características anatômicas de cada madeira e propriedades físico, acústica e mecânica, obtiveram-se resultados diferentes nas madeiras analisadas. Na tabela 1 são apresentados os valores do coeficiente de correlação de Pearson e o grau de significância entre as características anatômicas e a densidade aparente, velocidade de propagação do som e módulo de elasticidade dinâmico nas diferentes madeiras.

De maneira geral, as análises de regressão revelaram que as características das fibras, foram as que mais contribuíram para as variações de densidade aparente, seguidas das características dos raios. Já as dimensões dos raios são determinantes para os valores de velocidade de propagação do som, que também é influenciada pelo lume e espessura da parede das fibras. Para o módulo de elasticidade dinâmico, que é um indicativo da rigidez das madeiras, características das fibras como o lume e o diâmetro, associadas às dimensões dos raios contribuíram para os diferentes valores observados. O comprimento dos elementos de vaso, em menor número, também mostrou correlação com as propriedades analisadas (tabela 1 e figuras 2 – 9).

Em nenhuma das madeiras estudadas observou-se correlação significativa entre a densidade aparente e a velocidade de propagação do som.



Tabela 1 (continuação)

<i>Diploptropis spp.</i>		DV	CV	FV	AR	LR	FR	CF	DF	LF	PF
$\rho_{ap}$	r	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	p	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
V	r	--	<b>-0,891</b>	--	<b>-0,949</b>	<b>-0,863</b>	--	--	--	<b>-0,956</b>	--
	p	--	<b>0,017</b>	--	<b>0,004</b>	<b>0,027</b>	--	--	--	<b>0,003</b>	--
MOE <sub>d</sub>	r	--	<b>-0,884</b>	--	<b>-0,938</b>	<b>-0,864</b>	--	--	<b>-0,814</b>	<b>-0,899</b>	--
	p	--	<b>0,019</b>	--	<b>0,006</b>	<b>0,026</b>	--	--	<b>0,049</b>	<b>0,015</b>	--
<i>Astronium lecointei</i>											
$\rho_{ap}$	r	--	--	--	--	--	--	<b>0,856</b>	--	<b>0,832</b>	--
	p	--	--	--	--	--	--	<b>0,030</b>	--	<b>0,040</b>	--
V	r	--	--	--	--	--	--	--	--	--	<b>0,812</b>
	p	--	--	--	--	--	--	--	--	--	<b>0,050</b>
MOE <sub>d</sub>	r	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	p	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

DV = diâmetro dos vasos; CV = comprimento dos elementos de vaso; FV = frequência de vasos; AR = altura dos raios; LR = largura dos raios; FR = frequência dos raios; CF = comprimento das fibras; DF = diâmetro das fibras; LF = lume das fibras; PF = espessura da parede das fibras.

-- Não significativo

Para *Handroanthus* spp., foi encontrada correlação positiva significativa entre a média do diâmetro das fibras e a densidade aparente (figura 6a) e negativa entre velocidade de propagação do som e a largura dos raios (figura 6b). Não se observou correlação significativa entre o módulo de elasticidade dinâmico e as características anatômicas e entre a densidade aparente e a velocidade de propagação do som.

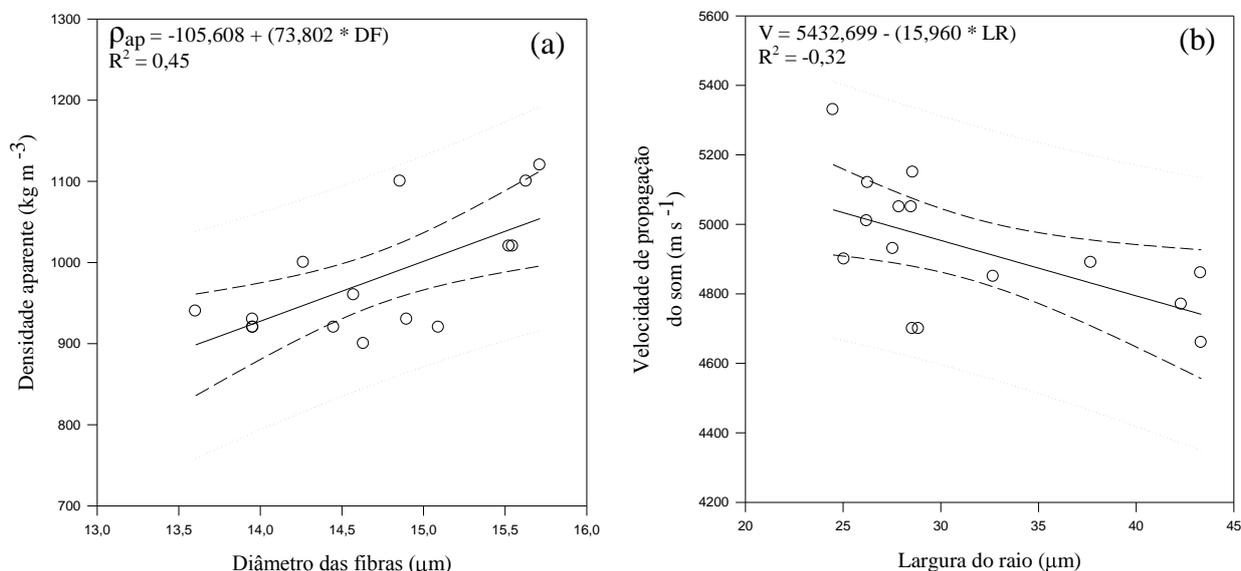


Figura 6. Correlação entre a média do diâmetro das fibras e a densidade aparente (a) e entre a média da largura dos raios e a velocidade de propagação do som (b) em *Handroanthus* spp. Nos gráficos são mostradas as linhas que representam os percentis (10, 25, 50, 75 e 90%).

Como se vê na tabela 1, para *Hymenaea* spp., não foram encontradas correlações significativas entre as características anatômicas e as propriedades analisadas.

Em *Mezilaurus itauba*, as médias da frequência de raios e lume das fibras apresentaram correlações negativas significantes com a densidade aparente (figuras 7a e 7b). Não foram observadas correlações significativas entre a velocidade de propagação do som e as características anatômicas, enquanto correlação negativa significativa foi obtida entre o diâmetro e lume das fibras e o módulo de elasticidade dinâmico (figuras 7c e 7d).

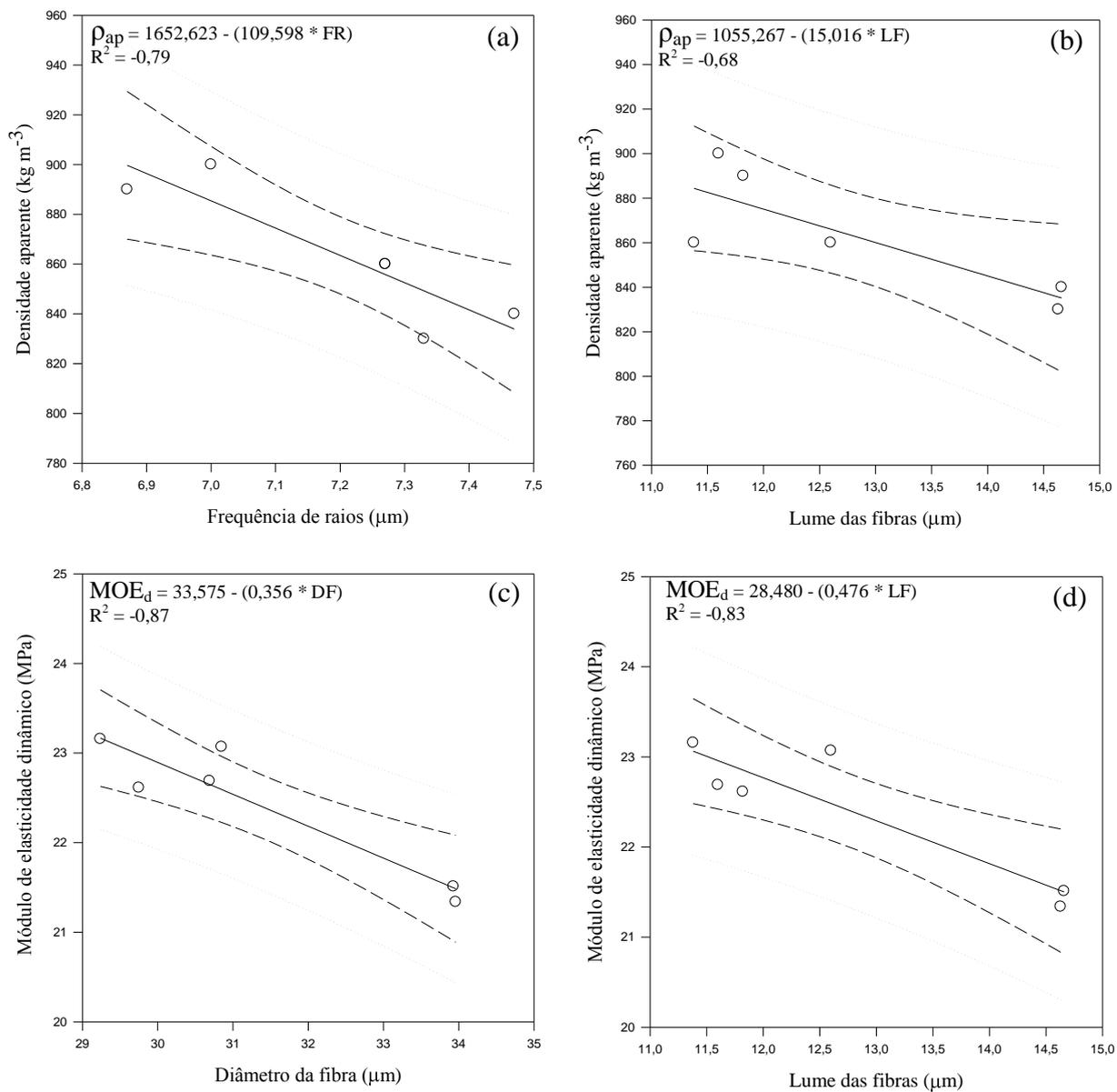


Figura 7. Correlação entre a frequência dos raios e a densidade aparente (a), entre o lume das fibras e a densidade aparente (b), entre o módulo de elasticidade dinâmico e o diâmetro das fibras (c) e entre o módulo de elasticidade dinâmico e o lume das fibras (d) em *Mezilaurus itauba*.

Em *Dipteryx* spp., as médias de várias características anatômicas mostraram correlação positiva significativa com a densidade aparente, são elas: comprimento dos elementos de vaso; altura e largura dos raios (figuras 8a-8c), além do comprimento, diâmetro e espessura da parede das fibras (figuras 9a-9c), sendo que as correlações mais altas ocorreram para a altura e largura dos raios. A frequência de raios apresentou correlação negativa significativa com a velocidade de propagação do som (figura 9d).

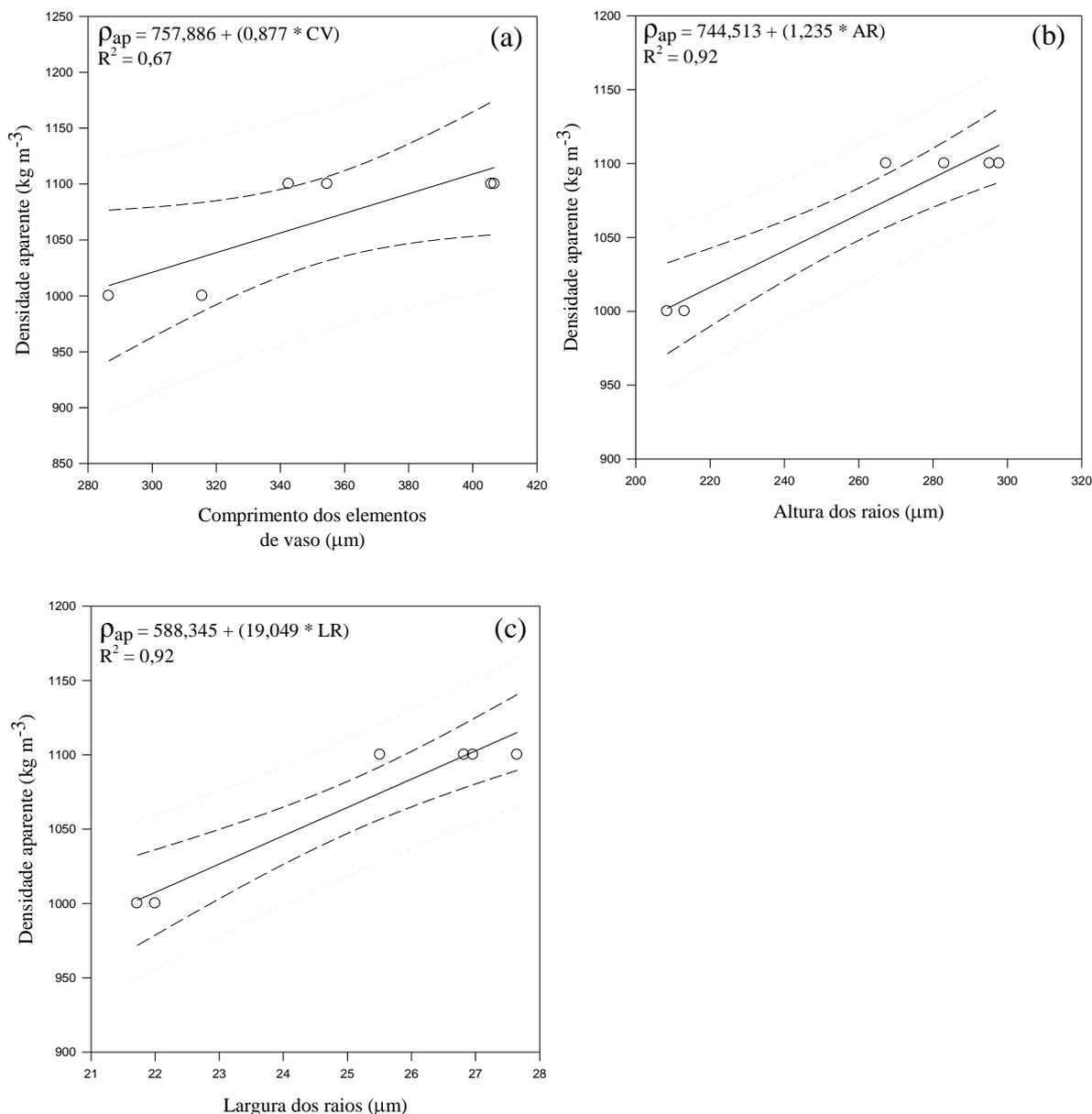


Figura 8. Correlação entre o comprimento dos elementos de vaso e a densidade aparente (a), entre a altura dos raios e a densidade aparente (b) e entre a largura dos raios e a densidade aparente (c) em *Dipteryx* spp.

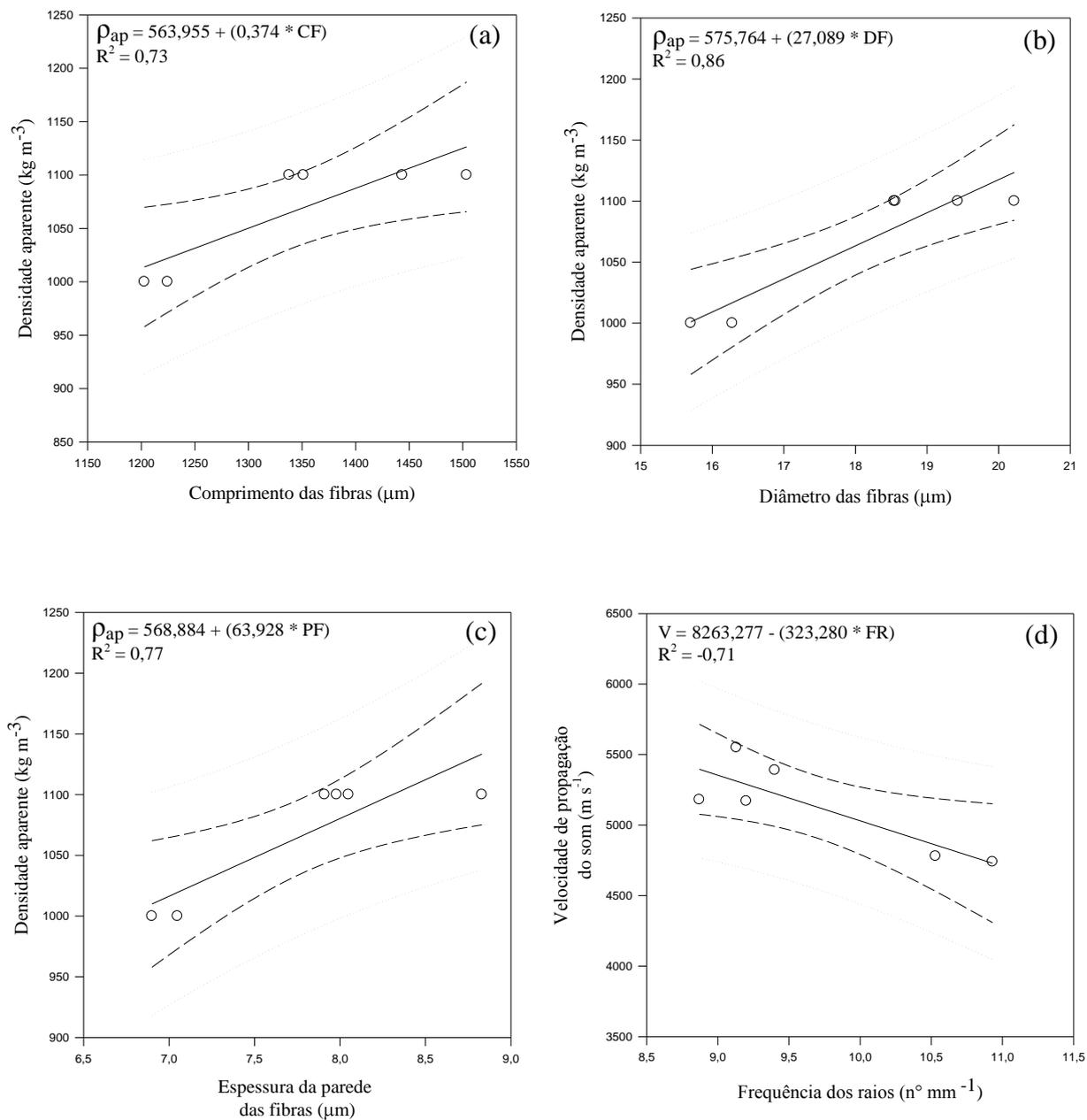


Figura 9. Correlação entre o comprimento das fibras e a densidade aparente (a), entre o diâmetro das fibras e a densidade aparente (b), entre a espessura da parede das fibras e a densidade aparente (c) e entre a frequência dos raios e a velocidade de propagação do som (d) em *Dipteryx* spp.

Em *Diptotropis* spp. não foram notadas correlações significativas entre as características anatômicas e a densidade aparente. No entanto, a velocidade de propagação do som mostrou correlações negativas significantes com o comprimento dos elementos de vaso, altura e largura dos raios e lume das fibras (figuras 10a - 10d). Correlações negativas significantes também ocorreram entre o módulo de elasticidade dinâmico e entre algumas características anatômicas: comprimento dos elementos de vaso, altura e largura dos raios (figuras 11a – 11c) e diâmetro e lume das fibras (figuras 12a – 12b).

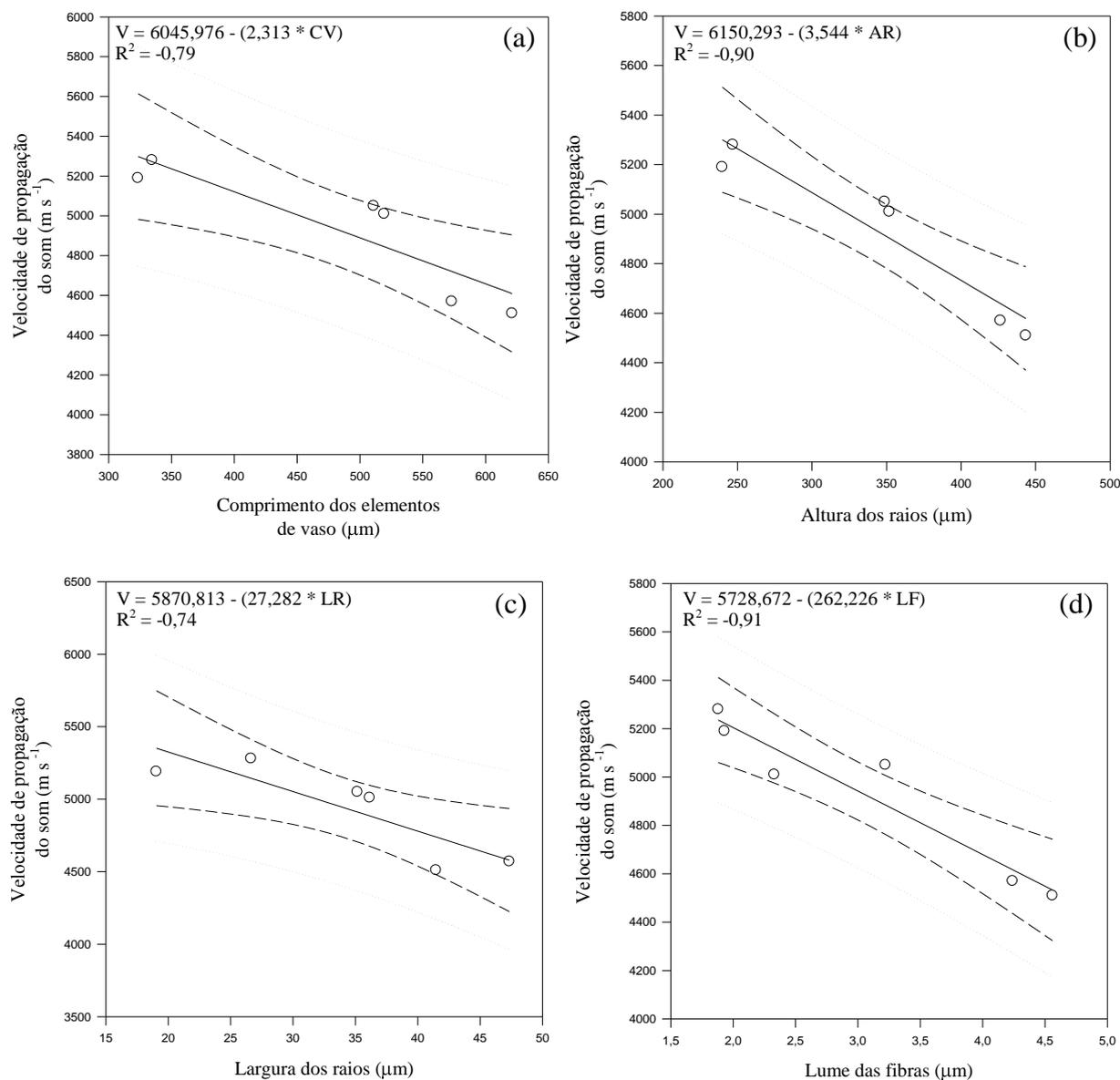


Figura 10. Correlação entre o comprimento dos elementos de vaso e a velocidade de propagação do som (a), entre a altura dos raios e a velocidade de propagação do som (b), entre a largura dos raios e a velocidade de propagação do som (c) e entre o lume das fibras e a velocidade de propagação do som (d) em *Diptotropis* spp.

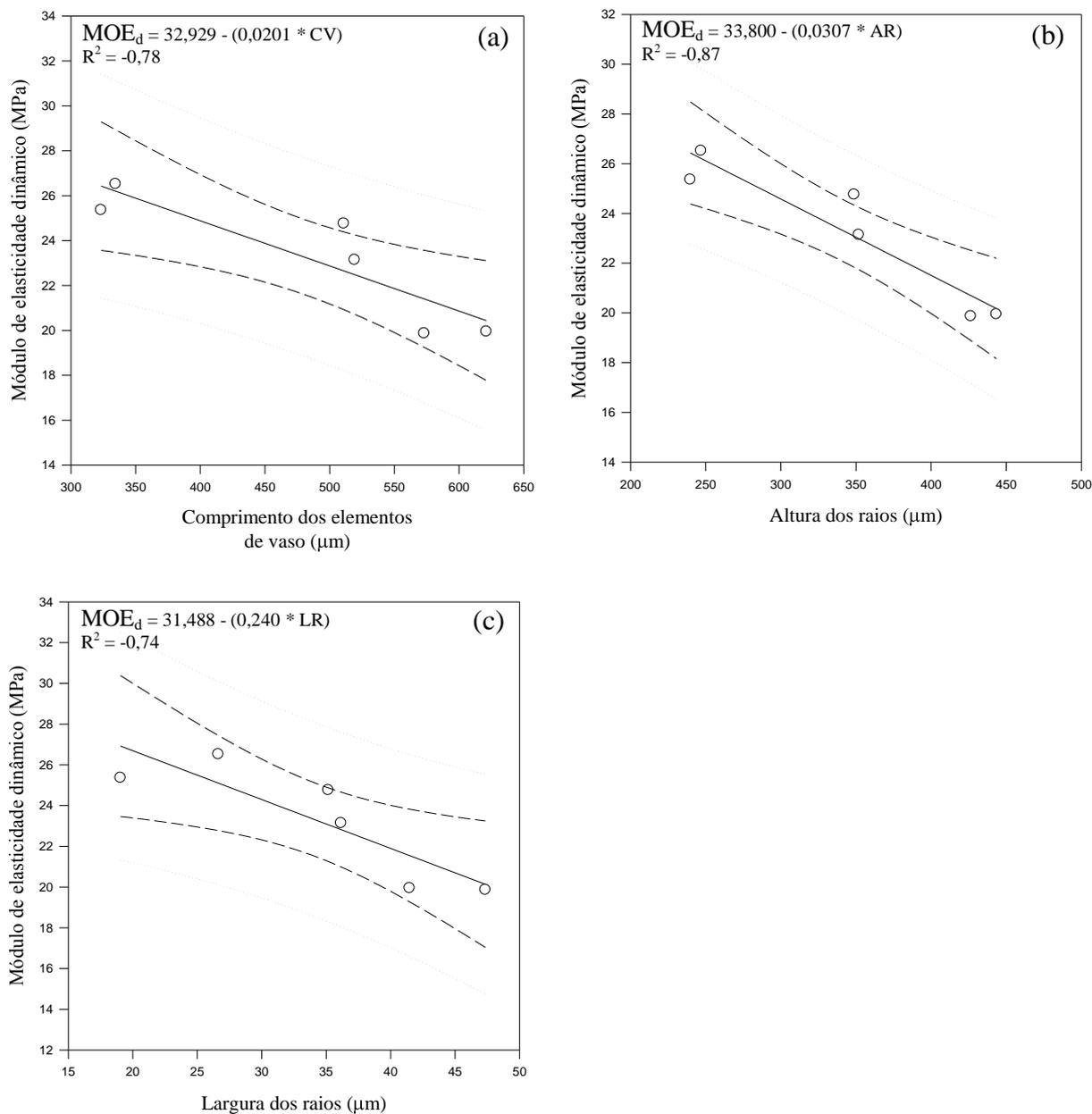


Figura 11. Correlação entre o comprimento dos elementos de vaso e o módulo de elasticidade dinâmico (a), entre a altura dos raios e o módulo de elasticidade dinâmico (b) e entre a largura dos raios e o módulo de elasticidade dinâmico (c) em *Diplotropis* spp.

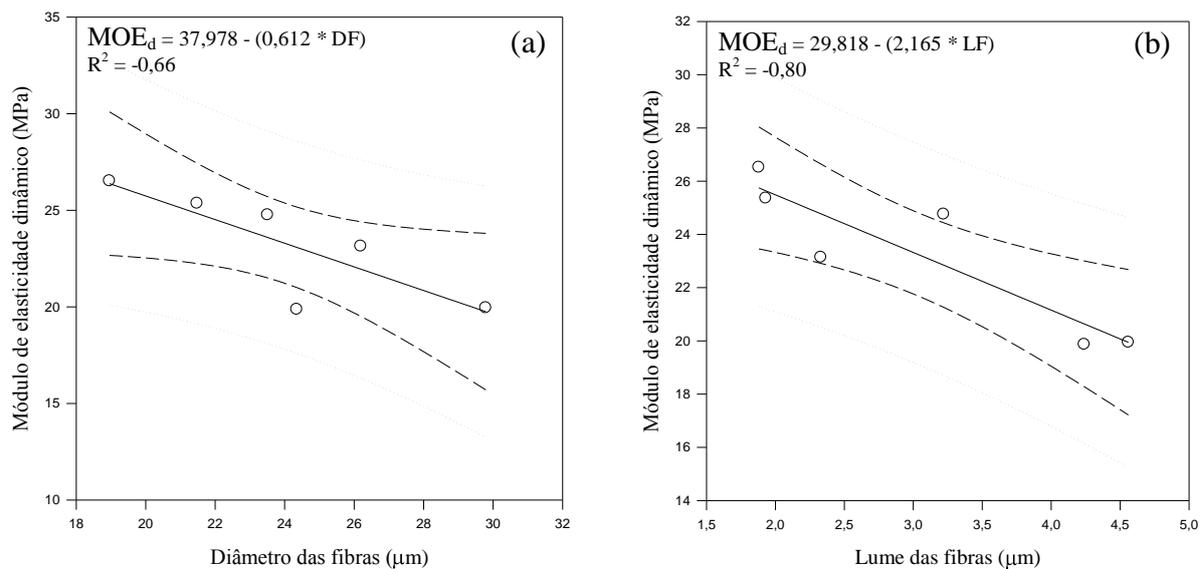


Figura 12. Correlação entre o diâmetro das fibras e o módulo de elasticidade dinâmico (a) e entre o lume das fibras e o módulo de elasticidade dinâmico (b) em *Diplotropis* spp.

Em *Astronium lecointei* foram observadas correlações positivas significantes entre as médias do comprimento e lume das fibras com a densidade aparente (figura 13a – 13b). Correlação positiva significante também foi obtida entre a média da espessura da parede da fibra e a velocidade de propagação do som (figura 13c). Não foram observadas correlações significantes entre as características anatômicas e o módulo de elasticidade dinâmico.

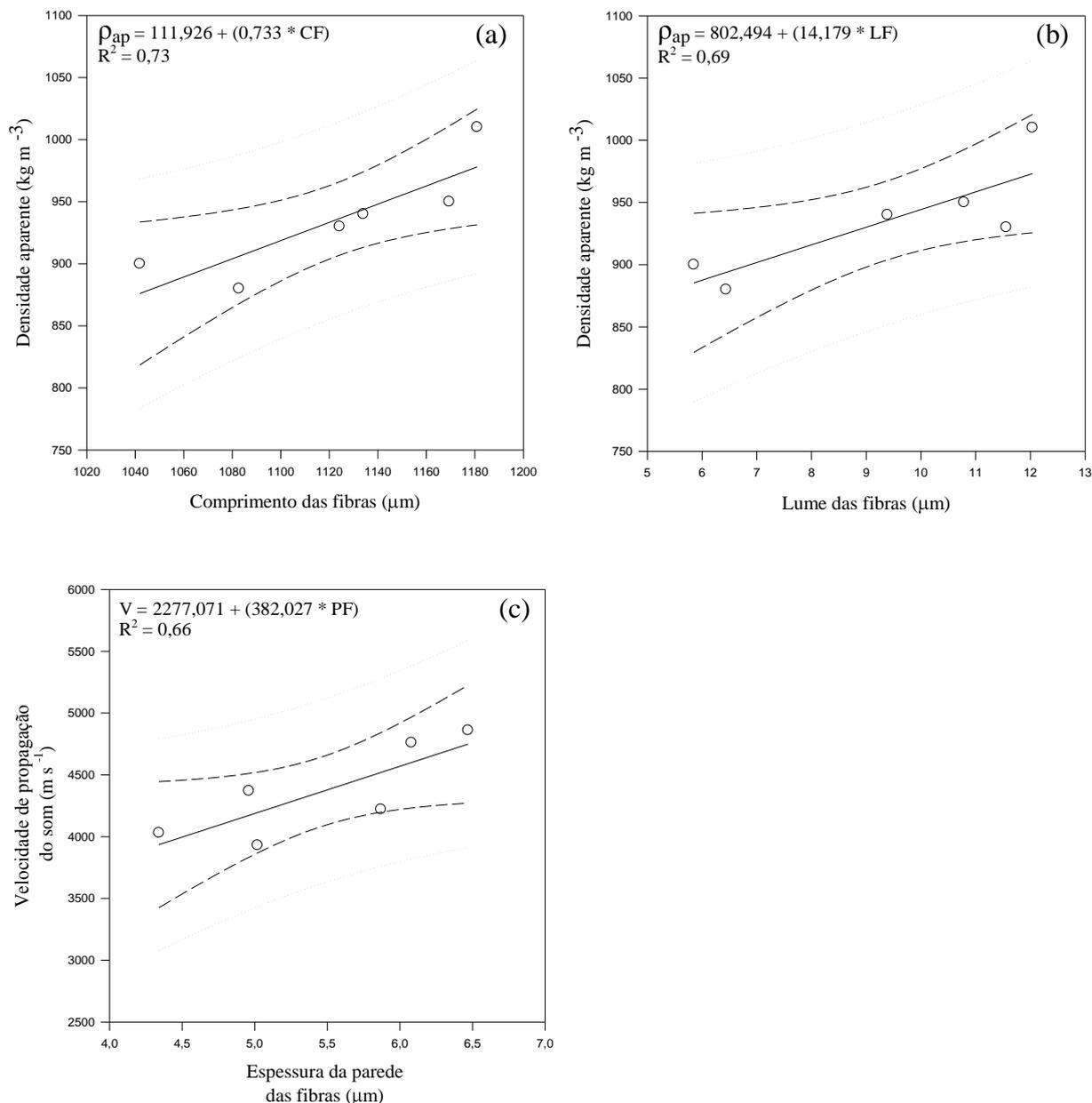


Figura 13. Correlação entre o comprimento das fibras e a densidade aparente (a), entre o lume das fibras e a densidade aparente (b) e entre a espessura da parede das fibras e a velocidade de propagação do som (c) em *Astronium lecointei*.

### 3.2. Comparação entre as características anatômicas das madeiras analisadas

Ao se comparar as seis madeiras estudadas, observou-se que o diâmetro dos vasos foi maior em *Hymenaea* spp. e *Diploptropis* spp. e menor em *Handroanthus* spp.; elementos de vaso mais longos foram vistos em *Mezilaurus itauba* e *Astronium lecointei*, vasos mais curtos ocorreram em *Handroanthus* spp.; a frequência de vasos foi maior em *Handroanthus* spp. e *Mezilaurus itauba* e menor em *Hymenaea* spp. e *Diploptropis* spp. (tabela 2).

Para os raios, as maiores alturas ocorreram em *Hymenaea* spp., *Mezilaurus itauba* e *Astronium lecointei* e as menores em *Handroanthus* spp.; em *Hymenaea* spp. também foram notados raios mais largos, já os menores valores ocorreram em *Handroanthus* spp.; a frequência de raios foi maior em *Dipteryx* spp. e menor em *Hymenaea* spp. (tabela 2).

Fibras mais longas ocorreram em *Mezilaurus itauba* e *Diploptropis* spp. e mais curtas em *Astronium lecointei* e *Handroanthus* spp.; fibras com maiores diâmetros foram vistas em *Mezilaurus itauba* e menores em *Handroanthus* spp.; lume maior ocorreu em *Mezilaurus itauba*, *Hymenaea* spp. e *Astronium lecointei* e menor em *Handroanthus* spp.; a espessura da parede foi maior em *Diploptropis* spp. e *Mezilaurus itauba* e menor em *Astronium lecointei* e *Hymenaea* spp. (tabela 2).

Quanto ao parênquima axial, as madeiras de *Handroanthus* spp., *Diploptropis* spp., *Dipteryx* spp. e *Hymenaea* spp. possuem parênquima axial paratraqueal aliforme, com extensão losangular em *Dipteryx* spp. e parênquima marginal em *Hymenaea* spp. Já as madeiras de *Mezilaurus itauba* e *Astronium lecointei* possuem parênquima axial paratraqueal escasso.

### 3.3. Comparação entre a densidade aparente, velocidade de propagação do som e módulo de elasticidade dinâmico das madeiras analisadas

Para a densidade aparente, maiores valores ocorreram em *Dipteryx* spp., embora não foram diferentes daqueles apresentados por *Hymenaea* spp., *Handroanthus* spp., e *Diploptropis* spp.; a madeira com menor densidade aparente foi *Mezilaurus itauba*. A velocidade de propagação do som foi menor em *Astronium lecointei*, as demais madeiras apresentaram valores mais altos e não variaram estatisticamente. Resultados semelhantes foram obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico, mas com valores intermediários em *Mezilaurus itauba* (tabela 3).

Tabela 2. Comparação entre as características anatômicas quantitativas das madeiras estudadas.

Características anatômicas	Madeiras estudadas					
	<i>Handroanthus spp.</i>	<i>Hymenaea spp.</i>	<i>Mezilaurus itauba</i>	<i>Dipteryx spp.</i>	<i>Diploptropis spp.</i>	<i>Astronium lecointei</i>
<b>DV</b> (µm)	116,2 <b>d</b> (102 - 126,7)	188,8 <b>a</b> (155 - 213)	126 <b>c</b> (111,3 - 140,4)	150,1 <b>b</b> (135,5 - 159,8)	181,6 <b>a</b> (160,4 - 198,5)	131,6 <b>c</b> (121 - 145,2)
<b>CV</b> (µm)	284,1 <b>e</b> (264,6 - 302,3)	404 <b>c,d</b> (345,1 - 447,4)	537,1 <b>a</b> (480,4 - 630,7)	355,3 <b>d</b> (326,4 - 393,9)	470,6 <b>b,c</b> (350 - 595)	505,8 <b>a,b</b> (424,1 - 576,8)
<b>FV</b> (n°/mm <sup>2</sup> )	10 <b>a</b> (8 - 11)	3 <b>c</b> (2 - 4)	10 <b>a</b> (9 - 11)	7 <b>b</b> (6 - 9)	5 <b>c</b> (4 - 5)	7 <b>b</b> (6 - 9)
<b>AR</b> (µm)	188,2 <b>d</b> (167,5 - 212,1)	473,4 <b>a</b> (399 - 616,2)	419,9 <b>a</b> (359,6 - 477,9)	267,8 <b>c</b> (221,7 - 291)	335 <b>b</b> (256,2 - 422,2)	389,1 <b>a,b</b> (335,1 - 429,2)
<b>LR</b> (µm)	29,7 <b>d</b> (25,7 - 36,7)	59,1 <b>a</b> (49,2 - 74)	35,8 <b>b,c</b> (29,9 - 44,3)	24,6 <b>e</b> (20,3 - 29,5)	34,4 <b>c,d</b> (24,6 - 44,1)	39,4 <b>b</b> (34,4 - 49,2)
<b>FR</b> (n°/mm)	7 <b>b</b> (6 - 7)	4 <b>d</b> (4 - 5)	7 <b>b</b> (7 - 8)	10 <b>a</b> (9 - 10)	6 <b>c</b> (5 - 7)	6 <b>c</b> (5 - 7)
<b>CF</b> (µm)	1183,4 <b>c</b> (1068,9 - 1291,6)	1460 <b>b</b> (1294,9 - 1595,9)	1630,4 <b>a</b> (1519,1 - 1798)	1352,4 <b>b</b> (1213,7 - 1472,2)	1561,4 <b>a</b> (1391,8 - 1707,7)	1106,7 <b>c</b> (1012 - 1228,1)
<b>DF</b> (µm)	14,1 <b>e</b> (13,1 - 15,9)	21,9 <b>b,c</b> (19,4 - 24,2)	30,7 <b>a</b> (28,2 - 35,2)	18,3 <b>d</b> (15,9 - 20,7)	23,7 <b>b</b> (20,7 - 27,5)	20 <b>c,d</b> (17,4 - 22,6)
<b>LF</b> (µm)	1,9 <b>c</b> (1,5 - 2,4)	9,6 <b>a</b> (7,2 - 11,5)	11,6 <b>a</b> (9,3 - 16)	2,4 <b>b</b> (1,9 - 2,8)	2,4 <b>b</b> (1,7 - 3,5)	9,1 <b>a</b> (5,8 - 11,8)
<b>PF</b> (µm)	6,1 <b>c</b> (5,6 - 6,9)	6,1 <b>c,d</b> (5,5 - 6,9)	9,3 <b>a</b> (8,4 - 10,3)	7,9 <b>b</b> (6,7 - 8,8)	10,6 <b>a</b> (9,1 - 12,3)	5,2 <b>d</b> (4,7 - 6,3)

Os valores são apresentados em mediana (p25 – p75). Na mesma linha, valores seguidos de letras distintas diferem estatisticamente em (p<0,05) pelo teste de Dunn's. DV = diâmetro dos vasos; CV = comprimentos dos elementos de vaso; FV = frequência de vasos; AR = altura dos raios; LR = largura dos raios; FR = frequência dos raios; CF = comprimento das fibras; DF = diâmetro das fibras; LF = lume das fibras; PF = espessura da parede das fibras.

Tabela 3. Comparação entre densidade aparente, velocidade de propagação do som e módulo de elasticidade dinâmico.

Madeiras estudadas	Propriedades		
	$\rho_{ap}$ (kg m <sup>-3</sup> )	v (m s <sup>-1</sup> )	MOE <sub>d</sub> (MPa)
<i>Handroanthus</i> spp.	980 ± 80 <b>a,b</b>	4930 ± 190 <b>a</b>	23374 ± 2200 <b>a,b</b>
<i>Hymenaea</i> spp.	1000 ± 50 <b>a,b</b>	4950 ± 190 <b>a</b>	24064 ± 3027 <b>a,b</b>
<i>Mezilaurus itauba</i>	860 ± 30 <b>c</b>	5140 ± 70 <b>a</b>	22395 ± 783 <b>b</b>
<i>Dipteryx</i> spp.	1070 ± 50 <b>a</b>	5140 ± 320 <b>a</b>	27663 ± 3721 <b>a</b>
<i>Diplotropis</i> spp.	970 ± 20 <b>a,b</b>	4940 ± 320 <b>a</b>	23265 ± 2821 <b>a</b>
<i>Astronium lecointei</i>	940 ± 50 <b>b,c</b>	4360 ± 380 <b>b</b>	17487 ± 2655 <b>c</b>

São apresentados os valores médios e o desvio-padrão. Na mesma coluna, valores seguidos de letras distintas diferem estatisticamente em ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey.  $\rho_{ap}$  = densidade aparente; v = velocidade de propagação do som; MOE<sub>d</sub> = módulo de elasticidade dinâmico.

Tabela 4. Coeficiente de flexibilidade das fibras das madeiras estudadas e de amostras de *C. echinata*, dados para cálculo obtidos de Alves *et al.* (2008a)\*.

Madeiras	Coeficiente de flexibilidade (%)
<i>*Caesalpinia echinata</i> (estudante)	25
<i>*Caesalpinia echinata</i> (top)	29
<i>Handroanthus</i> spp.	13
<i>Hymenaea</i> spp.	43
<i>Mezilaurus itauba</i>	37
<i>Dipteryx</i> spp.	13
<i>Diplotropis</i> spp.	10
<i>Astronium lecointei</i>	45

Coeficiente de flexibilidade = diâmetro do lume/diâmetro da fibra  $\times$  100.

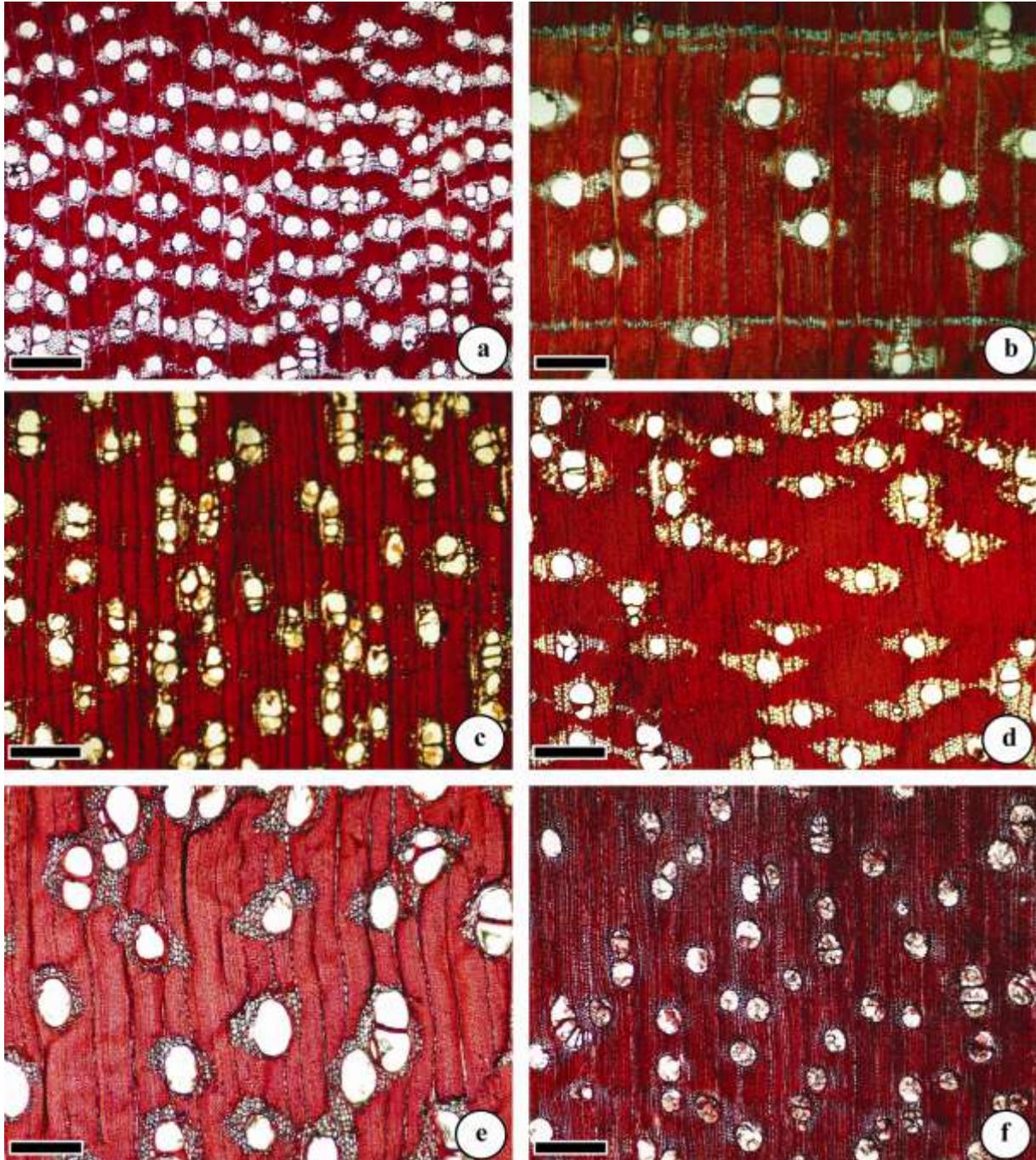


Figura 14. Fotomicrografias das secções transversais das madeiras estudadas. a. *Handroanthus* spp. b. *Hymenaea* spp. c. *Mezilaurus itauba* d. *Dipteryx* spp. e. *Diploptropis* spp. f. *Astronium lecointei*. Notar a diferença na frequência de vasos. Barra = 500µm

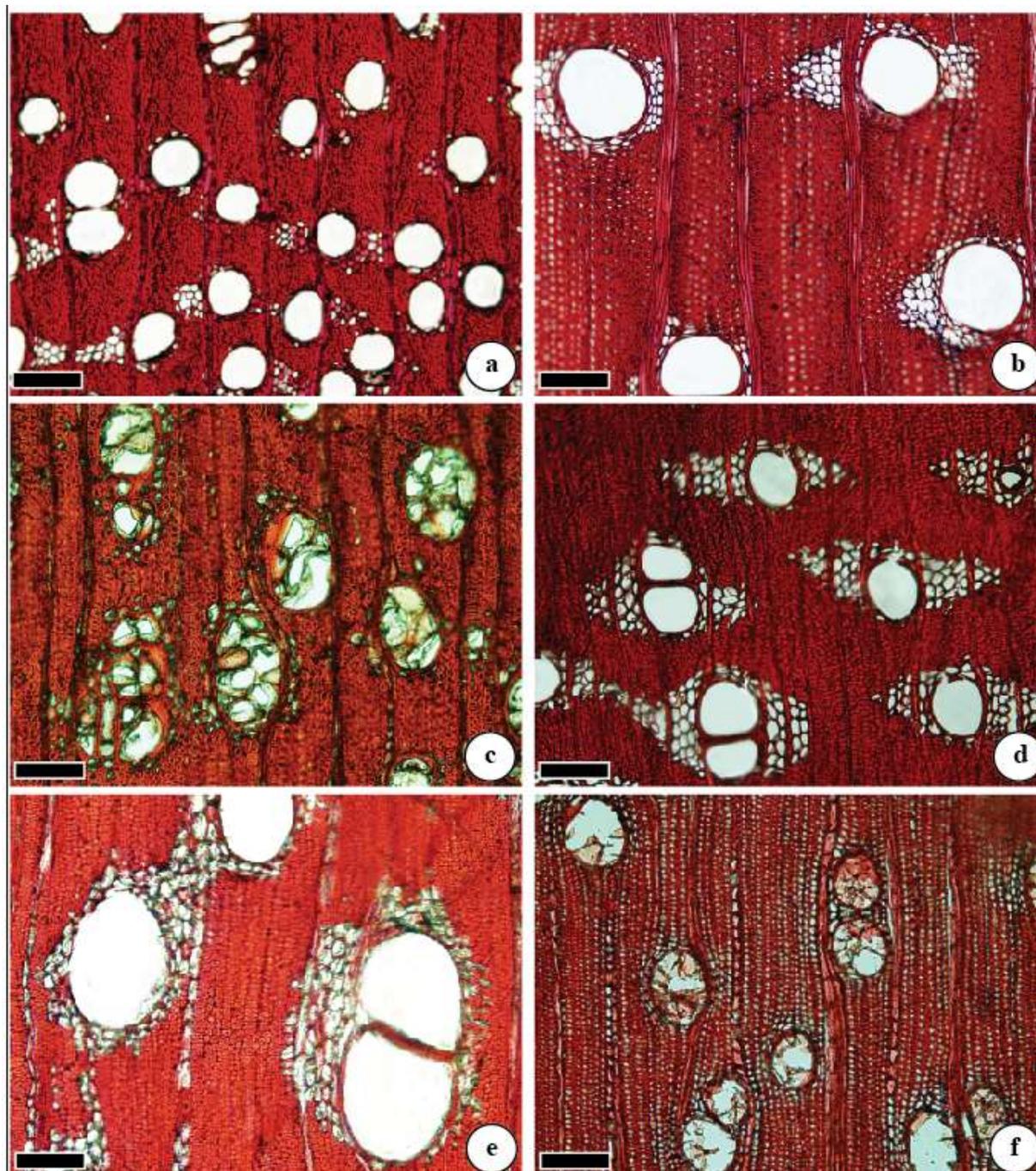


Figura 15. Fotomicrografias das secções transversais das madeiras estudadas. a. *Handroanthus* spp. b. *Hymenaea* spp. c. *Mezilaurus itauba* d. *Dipteryx* spp. e. *Diploptropis* spp. f. *Astronium lecointei*. Observar a diferença no diâmetro de vasos entre as madeiras. Barra = 200 $\mu$ m

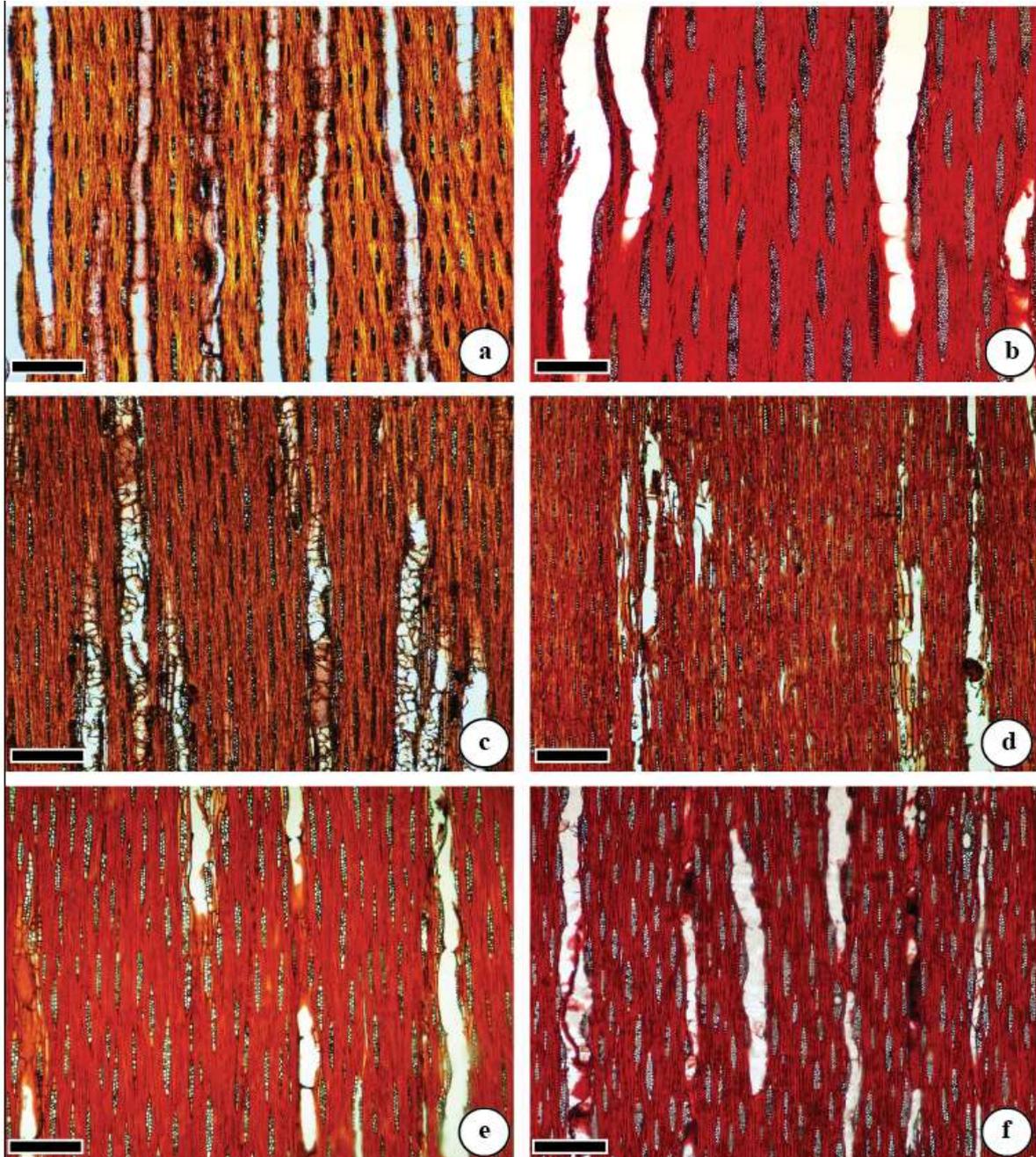


Figura 16. Fotomicrografias das secções longitudinais tangenciais das madeiras estudadas. a. *Handroanthus* spp. b. *Hymenaea* spp. c. *Mezilaurus itauba* d. *Dipteryx* spp. e. *Diplotropis* spp. f. *Astronium lecointei*. Observar a variação na frequência dos raios. Barra = 500 $\mu$ m

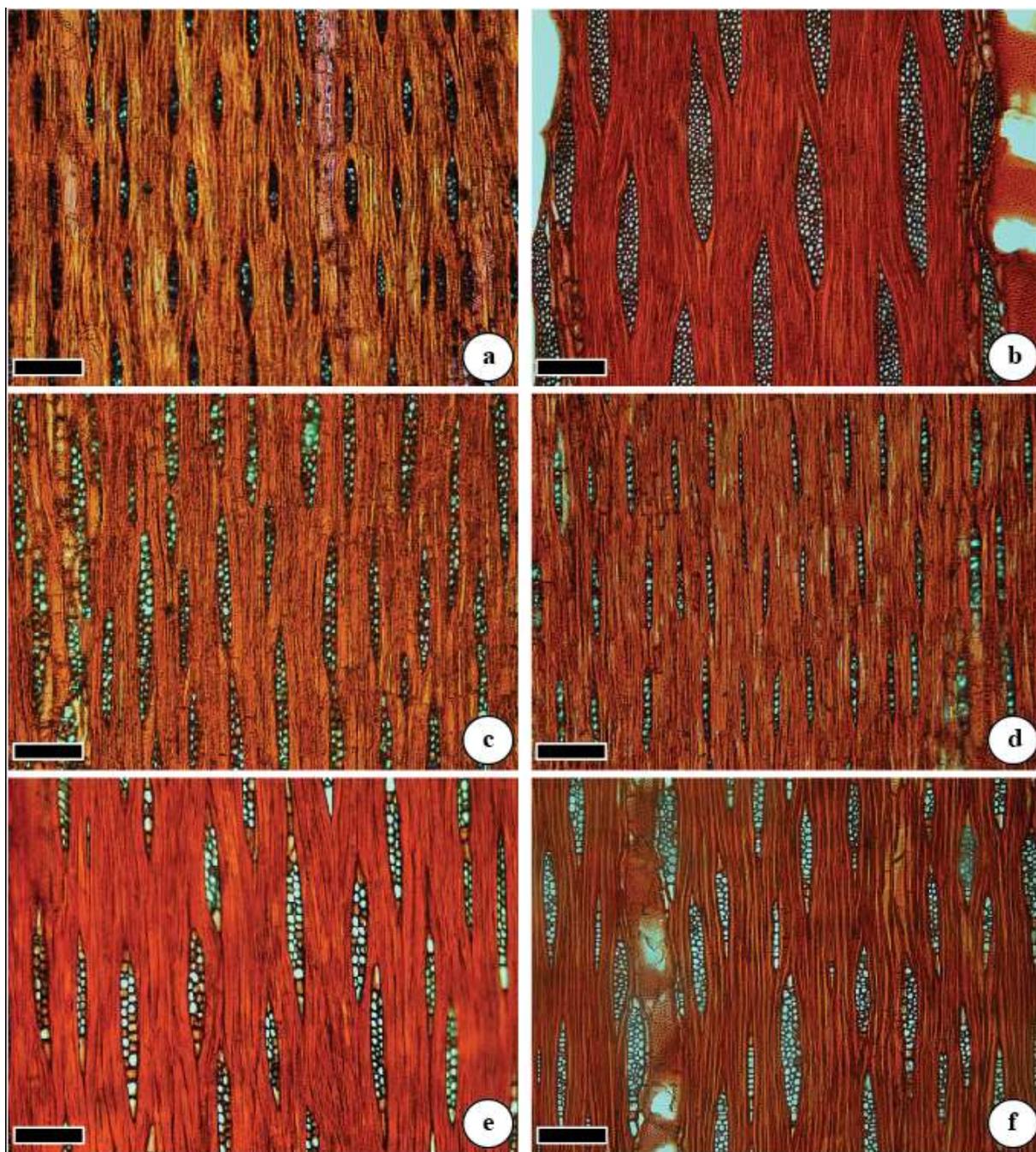


Figura 17. Fotomicrografias das secções longitudinais tangenciais das madeiras estudadas. a. *Handroanthus* spp. b. *Hymenaea* spp. c. *Mezilaurus itauba* d. *Dipteryx* spp. e. *Diplotropis* spp. f. *Astronium lecointei*. Notar a variação entre as dimensões dos raios. Barra = 200 $\mu$ m

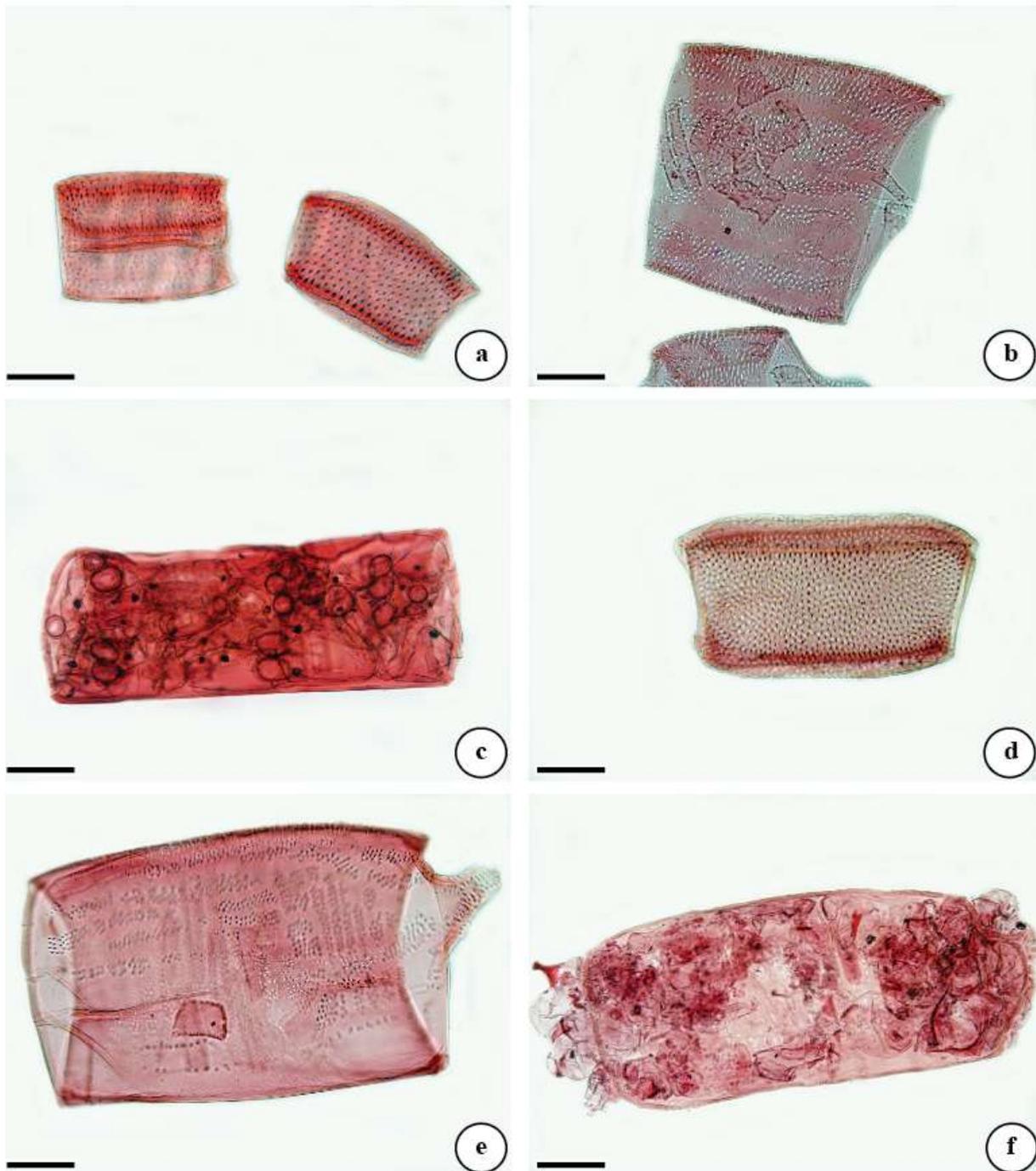


Figura 18. Elementos de vaso das madeiras estudadas. a. *Handroanthus* spp. b. *Hymenaea* spp. c. *Mezilaurus itauba* d. *Dipteryx* spp. e. *Diploptropis* spp. f. *Astronium lecointei*. Notar a diferença entre o comprimento e diâmetro e a presença de conteúdo em (c) e (f). Barra = 100 $\mu$ m

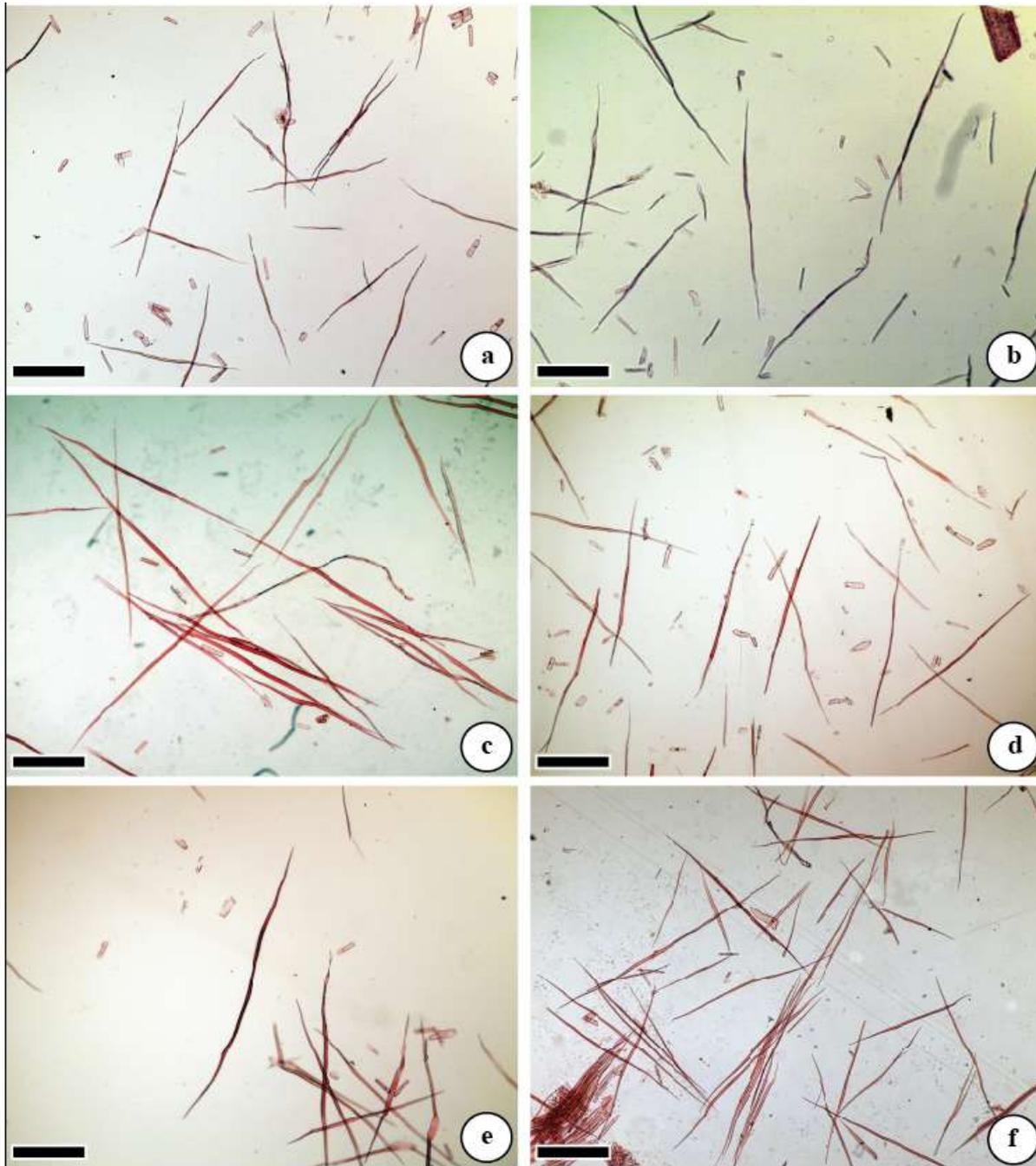


Figura 19. Fibras das madeiras estudadas. a. *Handroanthus* spp. b. *Hymenaea* spp. c. *Mezilaurus itauba* d. *Dipteryx* spp. e. *Diplotropis* spp. f. *Astronium lecointei*. Notar diferença no comprimento das fibras entre as diferentes madeiras. Barra = 500µm

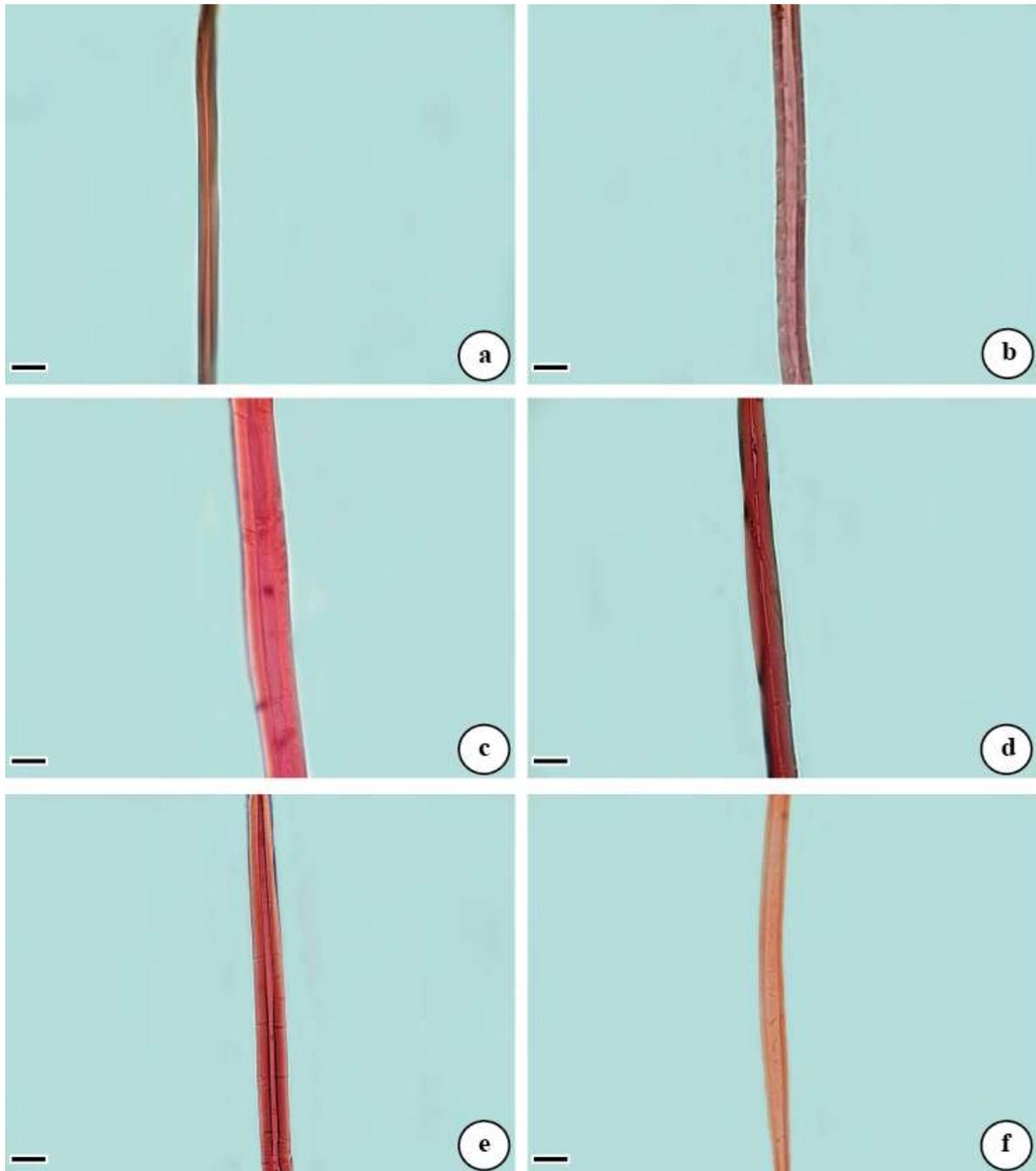


Figura 20. Fibras das madeiras estudadas. a. *Handroanthus* spp. b. *Hymenaea* spp. c. *Mezilaurus itauba* d. *Dipteryx* spp. e. *Diploptropis* spp. f. *Astronium lecointei*. Observar as variações no diâmetro, lume e espessura da parede das fibras entre as diferentes madeiras. Barra = 25 $\mu$ m

#### 4. Discussão

O estudo das correlações entre a anatomia e propriedades da madeira é fundamental para se estabelecer a aplicabilidade das espécies fornecedoras dessa matéria-prima, uma vez que tais propriedades são decorrentes, principalmente, da sua estrutura anatômica (Walker *et al.* 1993). Especificamente, para a fabricação de instrumentos musicais, Bucur (1995) descreve que os principais parâmetros a serem considerados na seleção de amostras são: a densidade, a velocidade de propagação do som e o decaimento vibracional.

Esta última propriedade pode ser explicada da seguinte forma: quando forças agem sobre um pedaço de madeira, ele vibra. Ao cessar a força, as sucessivas amplitudes de vibração decrescem, isto é chamado decaimento. A energia é dissipada parcialmente por radiação de som e parcialmente em forma de calor por fricção interna. O decaimento devido à radiação do som depende principalmente da razão entre a velocidade do som e a densidade. Em instrumentos musicais a situação desejada é que a madeira possua baixo decaimento devido à fricção interna e alto decaimento devido à radiação do som (Society of Wood Science and Technology 2009).

A densidade aparente é mencionada por muitos autores, como uma das propriedades mais importantes da madeira por determinar variações em outras propriedades, como a resistência à flexão. A densidade varia entre espécies diferentes, indivíduos da mesma espécie ou, ainda, na mesma árvore, nas direções radial e axial (Castro *et al.* 1993, Woodcock & Shier 2002). Essas variações podem ser explicadas pelas diferenças nas dimensões e frequências das células e características da parede, além da presença e teor de extrativos (Kollmann & Côté Jr 1968; Panshin & De Zeeuw 1980, Rao *et al.*, 1997 e Hoadley 2000).

No presente trabalho, notou-se que as características das fibras foram as que mais contribuíram para as variações de densidade aparente, o que está em conformidade com resultados de diversos autores. As fibras constituem a maior parte da madeira, portanto têm grande influência nas suas propriedades, especialmente na densidade. Fibras com paredes mais espessas implicam em maior densidade da madeira (Fujiwawa *et al.* 1991, Denne & Hale 1999, Longui 2005, Quilhó *et al.* 2006). A densidade também está relacionada com o comprimento das fibras, sendo que maiores densidades são observadas em madeiras com fibras mais longas (Shimoyama 1990, Butterfield *et al.* 1993 e Longui 2005).

Alguns autores já apontaram que a densidade é de fundamental importância na seleção de madeiras para a produção de instrumentos musicais (Wegst 2006) e para arcos (Longui 2005, Alves *et al.* 2008a). Esses últimos autores constataram que arcos de *Caesalpinia echinata* de maior qualidade foram manufaturados com varetas de densidade igual ou próxima

de  $1000 \text{ kg m}^{-3}$ . De acordo com Longui (2005), varetas com densidades muito altas, acima de  $1050 \text{ kg m}^{-3}$ , podem originar arcos mais finos, menos estáveis e mais suscetíveis a quebra.

No presente estudo, as varetas de *M. itauba* e *A. lecointei* apresentaram valores de densidade muito abaixo dos determinados como ideais para a fabricação dos arcos. Já algumas amostras de *Dipteryx* spp. mostraram densidade acima desse valor.

Além da densidade, a composição celular determina outras propriedades da madeira, como a velocidade de propagação do som. Embora o arco não produza som, a qualidade acústica das madeiras pode ser considerada como parâmetro para classificar varetas para a fabricação dos arcos (Matsunaga *et al.* 1996). De acordo com Brancheriau *et al.* (2006a e b), que estudaram 58 madeiras para xilofone, uma avaliação acústica de madeiras pode ser realizada com base na anatomia. Os autores informam que o parênquima axial é a principal característica a ser considerada, sendo que madeiras com melhor qualidade acústica apresentam parênquima axial do tipo paratraqueal, com algumas variações: escasso, aliforme losangular, confluyente ou formando faixas não muito largas e frequentes associadas aos vasos. O mesmo resultado é mencionado por Pourtahmasi & Golpayegani (2009) que investigaram *Morus alba*, usada na fabricação do “Tar” um instrumento de corda iraniano.

No presente estudo, todas as madeiras possuem parênquima paratraqueal com suas variações, contudo não foi possível estabelecer qual delas teria maior contribuição para a velocidade de propagação do som, uma vez que *Mezilaurus itauba* e *Astronium lecointei* possuem parênquima axial paratraqueal escasso, sendo que a primeira junto com *Dipteryx* spp., com parênquima aliforme com extensão losangular, apresentaram as maiores velocidades de propagação do som, enquanto que *Astronium lecointei* mostrou a menor.

Brancheriau *et al.* (2006a e b) mencionam que os raios são também importantes na determinação da qualidade acústica das madeiras, sendo que os melhores resultados são encontrados em madeiras com raios baixos, homogêneos e pouco frequentes. Longui (2005) observou que amostras de *C. echinata* com maior densidade, mas com raios de maiores dimensões, apresentaram menor velocidade na propagação do som. Brancheriau *et al.* (2006a e b), constataram que aquelas com raios baixos, homogêneos e em baixa frequência propiciaram material de melhor qualidade acústica em madeiras para xilofone.

Os resultados obtidos no presente trabalho mostram que, em *Handroanthus* spp., *Dipteryx* spp. e *Diploptropis* spp., quanto maior as dimensões e frequência dos raios, menor a velocidade de propagação do som. Ao contrário das demais células da madeira, os raios não estão orientados longitudinalmente; supõe-se então que eles possam retardar o deslocamento da onda sonora, portanto quanto mais frequentes, altos e largos forem os raios, mais lenta será a propagação dessa onda. Além disso, raios muito largos podem fazer com que as fibras

adjacentes inclinem-se de forma acentuada, o que representa uma leve alteração na orientação da grã nesses trechos, isso pode contribuir para a diminuição na velocidade de propagação do som. Reforçando tal suposição considera-se a informação de Reiterer *et al.* (2002) que afirmam que os raios impedem a propagação de rachaduras, portanto podem também representar barreiras que dificultam a propagação das ondas.

Brancheriau *et al.* (2006a e b) descrevem que além do parênquima axial e raios, outras características anatômicas podem ter alguma influência positiva na qualidade acústica das madeiras, como baixa frequência de vasos (com maior diâmetro), fibras com maiores lumes ou alto coeficiente de flexibilidade (diâmetro do lume/diâmetro da fibra  $\times 100$ ) e madeira com lenho estratificado.

Quanto aos vasos, Alves *et al.* (2008a) estudando varetas de *C. echinata* para arcos, encontraram relação entre menor frequência dessas células e maior velocidade de propagação do som. No presente estudo, madeiras com vasos de diâmetro reduzido, como *Handroanthus* spp. mostraram velocidade de propagação do som inferior àquela encontrada em madeiras com vasos de maior diâmetro mas menor frequência como *Hymenaea* spp., o que indica que a frequência dos vasos tem uma influência maior do que o diâmetro dessas células na propagação do som.

As fibras também influenciam a velocidade de propagação do som. De acordo com alguns autores, madeiras com fibras mais longas, com paredes mais espessas e em alta proporção apresentam maior velocidade de propagação do som (Bucur 1988, Oliveira e Sales 2000, Bucur *et al.* 2002, Huang *et al.* 2003; Pourtahmasi & Golpayegani 2009). No presente estudo, a relação entre as dimensões das fibras e a velocidade de propagação do som foi observada apenas em *Diplotropis* spp. e *A. lecointei*, sendo que na primeira, a relação foi negativa com relação à largura da fibra e na segunda positiva com relação à espessura da parede.

Embora Brancheriau *et al.* (2006a e b), tenham mencionado a contribuição do coeficiente de flexibilidade das fibras na qualidade acústica da madeira, descrevendo que valores acima de (40%) ou mais indicariam boa qualidade, no presente estudo, esses valores não indicaram uma clara influência, uma vez que o valor mais alto para essa característica ocorreu nas amostras de *A. lecointei* (45%), que apresentou a menor velocidade de propagação do som ( $4360 \text{ m s}^{-1}$ ). Além disso, cálculos do coeficiente de flexibilidade das fibras, com base nos dados de Alves *et al.* (2008a), para amostras de *C. echinata* de qualidades reconhecidamente distintas apontaram valores de 25% para amostras de baixa qualidade e 29% para amostras de alta qualidade, o que indica que esse parâmetro não influencia na qualidade acústica das varetas para arco.

Brancheriau *et al.* (2006b) observaram que as madeiras com melhores resultados nos testes acústicos apresentavam estrutura estratificada. Longui (2005) e Alves *et al.* (2008a), não observaram essa relação, embora *Handroanthus* sp. e algumas amostras de *C. echinata* por eles analisadas, apresentassem estrutura estratificada. Dentre as madeiras analisadas no presente estudo, *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp. possuem lenho estratificado, mas outras madeiras sem essa característica mostraram maiores valores de velocidade de propagação do som. No entanto, as duas madeiras mencionadas estão apresentando bons resultados na fabricação dos arcos, o que mostra que essa característica deve ser mais bem investigada para se ter maior clareza sobre sua influência na qualidade da madeira para os arcos.

Alguns autores relacionaram positivamente a velocidade de propagação do som à densidade (Feeney *et al.* 1998) enquanto outros estabeleceram relação negativa (Lucchi 1986, Fernandes 2004, Calegari *et al.* 2007). No presente estudo não se observou relação direta entre a densidade e a velocidade de propagação do som, O mesmo foi observado por Wang *et al.* (2003) para a madeira de *Taiwania cryptomerioides*. Estes resultados estão em conformidade com o observado por Wegst (2006) que encontrou grandes velocidades relacionadas tanto a madeiras com alta densidade como *C. echinata* e *Manilkara* sp., quanto madeiras com baixa densidade como *Pinus sylvestris* e muito baixa como *Ochroma* sp.

Estabelecer relações diretas entre as diferentes propriedades nem sempre é possível, uma vez que há muitos fatores que atuam em conjunto. Exemplificando: madeiras com maior densidade possuem menor proporção de espaços vazios e tais espaços provocam a redução da velocidade de propagação do som, que se propaga melhor em sólidos (as paredes celulares) do que no ar (Shimoyama 2005). Assim os vasos também atuam na determinação da velocidade de propagação do som, já que, madeiras mais porosas, ou seja, com vasos de maior diâmetro e mais frequentes, apresentam menor velocidade de propagação das ondas. Alves *et al.* (2008a), encontraram relação entre maior densidade e menor frequência de vasos e maior velocidade de propagação do som.

Considerando a interdependência das propriedades da madeira, Calegari *et al.* (2007) informam que quando a razão entre a densidade e o módulo de elasticidade, que indica sua rigidez, é alta, a velocidade de propagação longitudinal também é alta, os autores citam Smith (1932) para descrever que este é o motivo pelo qual a velocidade de propagação é maior no aço do que no ar, apesar da densidade do aço ser maior. Esse comportamento pode explicar os efeitos distintos da densidade sobre a velocidade de propagação do som. A velocidade de propagação do som na direção longitudinal é diretamente proporcional a elasticidade da madeira e inversamente proporcional a densidade (Society of Wood Science and Technology 2009). No presente estudo, as madeiras de *M. itauba* e *Dipteryx* spp. com a mesma velocidade

de propagação do som ( $5140 \text{ m s}^{-1}$ ), apresentaram densidades significativamente diferentes ( $860$  e  $1070 \text{ kg m}^{-3}$ ) respectivamente. No entanto, a rigidez em *Dipteryx* spp foi mais alta ( $27663 \text{ MPa}$ ) que em *M. itauba* ( $22395 \text{ MPa}$ ). Dessa forma, pode-se dizer que a rigidez, mais do que a densidade é uma propriedade importante na determinação da qualidade da vareta para arcos.

Esta afirmação é reforçada por Carrasco & Azevedo Júnior (2003), que mencionam não ser propriamente o aumento na densidade o que acarreta aumento na velocidade de propagação do som. Ao contrário, o aumento da densidade deveria provocar a diminuição da velocidade de propagação, visto que a velocidade é inversamente proporcional à raiz quadrada da densidade. Entretanto, considerando-se um valor de umidade constante ao longo da amostra, o aumento da densidade pode estar relacionado ao maior teor de celulose, o que implica mais no aumento da rigidez do que na densidade. Dessa forma, mesmo que haja aumento da densidade, a velocidade não diminui, pois é compensada pelo aumento da rigidez.

A partir de métodos não destrutivos, Alves *et al.* (2008a) estabeleceram para o pau-brasil valores de densidade ( $\sim 1000 \text{ kg m}^{-3}$ ) e velocidade de propagação do som ( $> 5000 \text{ m s}^{-1}$ ) ideais em varetas para arcos. Dentre as madeiras avaliadas no presente estudo, as varetas de *Dipteryx* spp. e *M. itauba* apresentaram velocidades acima do valor supracitado, ( $5140 \text{ m s}^{-1}$  para ambas), no entanto, *M. itauba* mostrou densidade muito abaixo do desejável ( $860 \text{ kg m}^{-3}$ ) e *Dipteryx* spp. um pouco acima ( $1070 \text{ kg m}^{-3}$ ). Considerando apenas essas duas propriedades, as varetas de *Hymenaea* spp. foram as que mais se aproximaram dos valores considerados ideais.

Para o módulo de elasticidade dinâmico, que indica a rigidez da madeira, ocorreram correlações significativas com características das fibras, como diâmetro e lume, nas varetas de *M. itauba* e *Diploptropis* spp., e também com as dimensões dos raios e vasos em *Diploptropis* spp., sendo que menores dimensões correlacionaram-se com menores valores do módulo de elasticidade. Rao *et al.* (1997) afirmam que a proporção dos diferentes tipos celulares é importante para a determinação da rigidez das madeiras. Longui (2005) encontrou maiores valores de módulo de elasticidade associado a maiores porcentagens de fibras e teor de lignina, polímero que confere maior rigidez e resistência à parede celular, influenciando nas propriedades dinâmicas da madeira (Obataya *et al.* 1998, Bergander & Salmén 2002, Carpita & McCann 2000, Jordão & Andrade 2000).

De acordo com Lucchi (1986) e Follmann (1995), a rigidez de uma vareta para arco é importante para qualificá-la, o que é confirmado por Wegst (2006). Segundo este autor, se a vareta de um arco for muito flexível, a crina será estendida apenas quando a vareta estiver quase reta; além disso, se a rigidez ao arqueamento do sistema vareta-crina for baixa, o

controle da dinâmica do arco é reduzido, dificultando técnicas como “spiccato” na qual o arco salta sobre as cordas e, finalmente baixa rigidez na direção lateral dificulta o controle do arco.

Assim, uma vareta com baixa rigidez e, conseqüentemente, maior flexibilidade, dificulta o tensionamento da crina, o que afeta a dinâmica e tocabilidade do arco, que perderá energia em forma de vibração. Por sua vez, uma vareta com alta rigidez possibilita um melhor aproveitamento da energia imposta pelo músico, garantindo menos esforço físico para obtenção do mesmo resultado, o que facilita a tocabilidade (Alves *et al.* 2008a).

Para determinar o potencial para arco das madeiras estudadas, suas características foram comparadas com os valores descritos por Alves *et al.* (2008a), que estabeleceram os parâmetros ideais de *C. echinata* como sendo o modelo de qualidade das varetas para arco. De maneira geral, *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp. foram as madeiras que apresentaram características anatômicas quantitativas e demais propriedades mais próximas daquelas descritas para *C. echinata*. Vale destacar que tanto *Handroanthus* spp., quanto *Dipteryx* spp. possuem células com menores dimensões quando comparadas às demais madeiras estudadas, além de apresentarem lenho mais homogêneo e raios estratificados.

Esses resultados confirmam o que vem sendo observado na prática no processo de fabricação dos arcos (Daniel Lombardi, comunicação pessoal), que informa serem *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp. as madeiras que estão mostrando os melhores desempenhos, embora nem todas as varetas estudadas já tenham sido manufaturadas, uma vez que o processo artesanal de confecção dos arcos é longo e demorado como mostrado em Alves *et al.* (2008b).

## 5. Conclusões

As características das fibras foram as que mais contribuíram para as variações de densidade aparente, seguidas das características dos raios.

As dimensões dos raios são determinantes da velocidade de propagação do som, que também é influenciada pelo tamanho do lume e espessura da parede das fibras.

Os valores do módulo de elasticidade dinâmico estão correlacionados com características das fibras, como o lume e o diâmetro, e também com as dimensões dos raios.

As madeiras de *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp. mostraram maior potencial na fabricação dos arcos do que as demais aqui estudadas, quando comparadas a *Caesalpinia echinata*, aqui considerada como a madeira modelo. Igualmente comparadas ao modelo, *Hymenaea* spp. e *Diplotropis* spp. merecem atenção e devem ser mais exploradas para confirmar seu potencial, enquanto que *Mezilaurus itauba* e *Astronium lecointei* não

apresentaram potencial para a fabricação de arcos de instrumentos de corda com base nas características analisadas e discutidas no presente capítulo.

# Capítulo 2

## Propriedades físicas, mecânicas e acústica de madeiras para arcos de instrumentos de corda



## 1. Introdução

As propriedades da madeira são estabelecidas durante a sua formação e são determinadas por fatores genéticos e ambientais. A associação desses dois fatores faz com que cada espécie apresente características únicas quanto à resistência, densidade, odor, cor, textura, teor de extrativos, propriedades acústicas, entre outras. Essa grande variação entre espécies permite a utilização das madeiras para os mais diversos fins (Franco & Yojo 2008).

A madeira é desuniforme quanto a sua composição, além de apresentar propriedades diferentes em seus três planos, sendo por isso considerada um material heterogêneo e anisotrópico (Hoadley 2000). Assim, para a utilização adequada de uma madeira, são necessários estudos que levem em conta suas propriedades físicas, mecânicas e acústicas, bem como resistência à degradação, trabalhabilidade, disponibilidade de mercado e valor estético (Araújo 2007, Franco & Yojo 2008).

Existem diversas técnicas para determinar as propriedades da madeira, sendo que a maioria delas é destrutiva e necessita ser desenvolvida em laboratórios, muitas vezes com máquinas pesadas incapazes de serem transportadas ao local de estudo. No entanto, segundo Feio (2004) é crescente o uso de técnicas não destrutivas que podem tornar mais rápida e fácil a determinação de propriedades da madeira. Nogueira & Ballarin (2003) descrevem que os métodos não destrutivos são empregados na avaliação de descontinuidades, irregularidades e vazios que ocorrem naturalmente, como característica intrínseca da árvore ou de sua interação com o meio, e que afetam as propriedades mecânicas da madeira. Para que essas técnicas sejam aceitas, é preciso desenvolver estudos que busquem correlacionar os resultados encontrados por meio de técnicas não destrutivas com aqueles determinados pelas técnicas destrutivas já consagradas.

De acordo com Alves *et al.* (2008a), densidade, velocidade de propagação do som e rigidez da madeira são empregadas na seleção de amostras para a fabricação de arcos. Franco & Yojo (2008) descrevem que baixa contração na direção radial, alto valor de módulo de elasticidade, alta resistência ao cisalhamento e dureza são características importantes em madeiras para arcos.

O conhecimento dessas e de outras propriedades da madeira, acompanhado da produção e teste do arco dela resultante, representa a situação ideal para a seleção de madeiras para a arquetaria, pois permitem estabelecer quais são as características que conferem qualidade ao arco. A seguir são apresentadas algumas das propriedades que devem ser consideradas quando se pretende selecionar madeiras para arco.

O cisalhamento pode ser considerado um fenômeno de deformação, no qual forças agem em sentidos diferentes e provocam um deslocamento no material. De acordo com Green

*et al.* (1999), o cisalhamento é a habilidade das células da madeira de resistirem a um escorregamento que force a sua separação. Segundo Hoadley (2000) esta propriedade recebe grande influência das características anatômicas, como a largura dos raios ou a variação entre os lenhos tardio e juvenil e é crítica quando uma peça sofre curvatura.

A compressão é definida como duas forças ou cargas agindo ao longo de um mesmo eixo, tentando encurtar a dimensão ou reduzir o volume da amostra de madeira (Society of Wood Science and Technology 2009). Anatomicamente, quando a compressão ocorre paralelamente às fibras, essas células recebem cargas nas extremidades que forçam seu achatamento longitudinal (Hoadley 2000).

A madeira retrai quando perde água e incha quando ganha água, que está presente tanto no lume das células, como em suas paredes. Isso implica em alterações nas dimensões, que podem resultar em empenamentos, rachaduras e problemas em peças com encaixes. Assim, é importante estudar esse fenômeno para conhecer como ele pode influenciar a fabricação e uso de um produto (Miller 1999). Especialmente no caso de instrumentos musicais, deve-se considerar que esses geralmente são produzidos sob condições diferentes dos locais em que serão utilizados. Assim, empenamentos ou contrações são temidos pelos fabricantes, uma vez que podem alterar encaixes e ocasionar falhas durante o uso. Há casos em que os músicos guardam seus instrumentos em ambiente climatizado até o momento da apresentação, a fim de evitar alterações em suas dimensões e conseqüentemente em seu desempenho (Slooten & Souza 1993).

Segundo Green *et al.* (1999) a elasticidade é a propriedade dos corpos de armazenar, sob a forma de energia potencial interna, o trabalho mecânico de deformação provocado por uma força externa, devolvendo esta energia total ou parcialmente quando desaparece a causa da deformação. O módulo de elasticidade é o quociente entre a tensão aplicada a um corpo e a deformação que ela provoca, podendo ser utilizado para explicar a correlação entre a rigidez e a flexibilidade da madeira, desde que se comparem peças com dimensões iguais. Quanto maior for o módulo de elasticidade mais rígida é a madeira, apresentando menor deformação, por outro lado quanto menor o módulo de elasticidade mais flexível é a madeira (Panshin & Zeeuw 1964, Desch 1968, Kollmann & Côté Jr. 1968, Green *et al.* 1999).

A determinação da rigidez a partir do módulo de elasticidade é importante, porém tal cálculo implica em processo destrutivo. O cálculo da rigidez e de outras propriedades elásticas e acústicas da madeira, a partir de processos não destrutivos, como o ultra-som, é importante, uma vez que tais processos permitem não apenas estimar a qualidade do produto final antes do início da manufatura do arco como também avaliar tais características em arcos prontos (Lucchi 1986). De acordo com Slooten & Souza (1993) as características acústicas

das madeiras para instrumentos vêm sendo aplicadas há séculos intuitivamente. Atualmente, as propriedades acústicas são conhecidas e podem ser devidamente investigadas.

O ultra-som é caracterizado por frequências acima de 20.000 Hz, sendo que o entendimento de como estas ondas se propagam nos materiais permitiu a utilização de equipamentos que avaliem diferentes propriedades da madeira, como a rigidez. Além disso, os equipamentos de ultra-som apresentam custo mais baixo quando comparados às máquinas empregadas em ensaios destrutivos, são fáceis de utilizar e podem ser transportados para diferentes locais (Oliveira 2001; Gonzalez *et al.* 2001; Tsehaye *et al.* 2002; Miná *et al.* 2004).

De acordo com Green *et al.* (1999) o módulo de ruptura à flexão reflete a carga máxima que um corpo-de-prova pode resistir até que ocorram deformações plásticas. Follmann (1995) acredita que para se obter maior resistência à ruptura em madeiras para arcos, deva-se considerar a posição dos anéis de crescimento, sendo a situação ideal aquela onde as varetas são retiradas radialmente, tipo de corte também chamado de *quartier*. Segundo Takashi Yoyo (comunicação pessoal) a resistência de uma peça de madeira à ruptura é influenciada pelo ângulo dos anéis de crescimento e pela posição dos raios; estes podem proporcionar uma situação de “travamento”, permitindo o aumento da resistência. Além disso, o maior contato entre as superfícies das células que compõe a madeira pode proporcionar melhor “ancoragem” entre as mesmas, promovendo um aumento na resistência à ruptura. Jeronimidis (1976) descreve que a ruptura da madeira depende da direção de falhas iniciais, sendo que a madeira apresenta maior facilidade em se romper na direção da grã, ou seja, por tensão de cisalhamento, do que de forma transversal. Burger & Richter (1991) afirmam que as dimensões, frequência e distribuição dos vasos influenciam na resistência mecânica da madeira. Reiterer *et al.* (2002) afirmam que os raios têm papel importante na estrutura da madeira, influenciando as propriedades mecânicas e, também impedindo a propagação de rachaduras.

Entre as centenas de madeiras bem conhecidas no mundo, poucas são utilizadas pelos fabricantes de instrumentos, que há séculos vêm empregando as mesmas espécies. Este fato deve-se ao forte tradicionalismo, contrário às iniciativas científicas que tentam propor madeiras alternativas e, principalmente, às excelentes propriedades físico-mecânicas e acústicas das madeiras tradicionalmente empregadas (Souza 1983; Slooten & Souza 1993). Situação semelhante acontece na fabricação dos arcos para instrumentos de corda, na qual o pau-brasil é a madeira escolhida para tal finalidade.

Esta etapa teve como objetivos: avaliar propriedades físicas, mecânicas e acústica em madeiras de *Handroanthus* spp., *Mezilaurus itauba*, *Hymenaea* spp., *Dipteryx* spp., *Diplotropis* spp. e *Astronium lecointei*; investigar se há variações significativas da densidade

aparente e velocidade de propagação do som ao longo das varetas. Por meio dessas análises, pretende-se determinar o potencial dessas madeiras para a fabricação de arcos para instrumentos de corda.

## **2. Material e métodos**

### **2.1. Madeiras analisadas e preparação das amostras**

As espécies analisadas no presente estudo foram: ipê - *Handroanthus* spp. (Bignoniaceae); itaúba - *Mezilaurus itauba* (Lauraceae); jatobá - *Hymenaea* spp. (Fabaceae); cumaru - *Dipteryx* spp. (Fabaceae); sucupira - *Diploptropis* spp. (Fabaceae) e muiracatiara - *Astronium lecointei* (Anarcadiaceae). Informações sobre as mesmas foram apresentadas no capítulo 1.

Para a realização dos ensaios, foram executadas três etapas de preparação. Na primeira, pranchas, caibros e ripas das madeiras estudadas foram desdobradas em varetas com dimensões de 70 cm x 1,5 cm x 1,5 cm, nomeadas como varetas longas (figura 1). Selecionaram-se três varetas longas de cada madeira, totalizando 18 varetas. Para cada vareta longa foi determinada a densidade aparente, a velocidade de propagação do som e o módulo de elasticidade dinâmico; a metodologia para cada ensaio está detalhada nos itens 2.2 a 2.4.

Numa segunda etapa, cada vareta foi cortada ao meio, fornecendo duas varetas curtas (com 35 cm de comprimento). Das 36 varetas curtas, a metade foi avaliada novamente quanto às propriedades descritas anteriormente, além do módulo de elasticidade estático e o módulo de ruptura (figura 1).

Na terceira etapa, as outras 18 varetas curtas foram cortadas em sete corpos-de-prova com 5 cm de comprimento cada. Calculou-se para todos os corpos-de-prova, a densidade aparente, a velocidade de propagação do som e o módulo de elasticidade dinâmico. Posteriormente, em três corpos-de-prova de cada vareta curta foram feitos ensaios de cisalhamento, outros três serviram para a determinação da retração volumétrica e um corpo-de-prova de cada vareta curta foi empregado para os ensaios de compressão paralela às fibras (figura 1). Os ensaios para obtenção de módulo de elasticidade estático, tensão de ruptura, cisalhamento e compressão foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos de Madeira e Derivados no Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP – Piracicaba/SP.

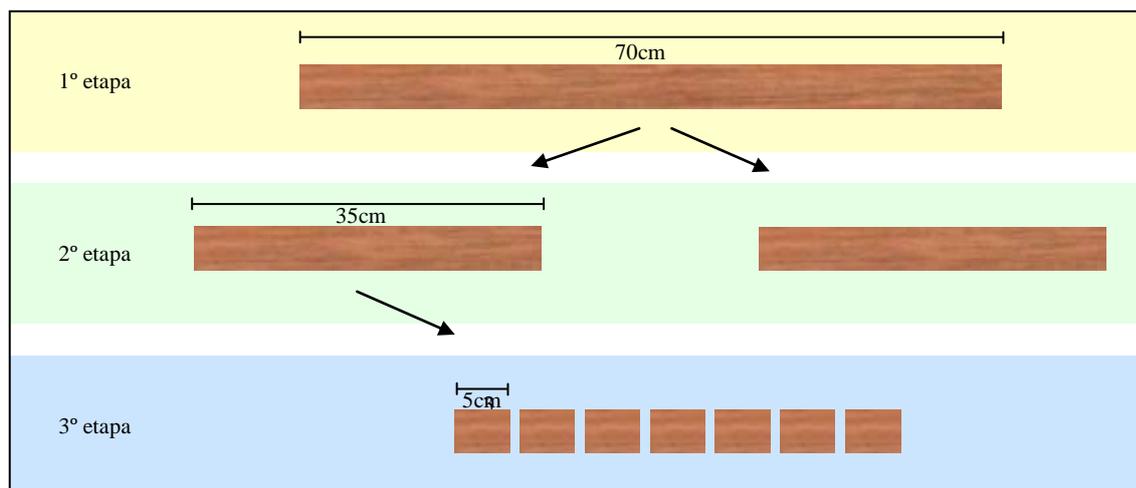


Figura 1. Representação esquemática da preparação das amostras em cada etapa do estudo.

## 2.2. Densidade aparente ( $\rho_{ap}$ )

A determinação dessa propriedade variou em função das dimensões das amostras. Na primeira etapa, a metodologia foi a mesma descrita no capítulo 1: determinou-se a massa das 18 varetas longas em balança digital, em seguida essas foram imersas em um tubo de PVC com água, que foi recolhida por meio de mangueira em uma proveta, determinando-se, assim, o volume de água deslocado pela amostra (figura 2, capítulo 1).

Nas duas etapas posteriores, a massa das amostras também foi determinada em balança digital. Em seguida, utilizando-se do princípio de Arquímedes e com auxílio de um aparato que forçou as amostras a ficarem submersas (figura 2), as mesmas foram colocadas em uma proveta com água (36 varetas curtas) e em um béquer com água (186 corpos-de-prova com 5 cm), posicionados na balança. Assumindo-se que a densidade da água é de  $1000 \text{ kg m}^{-3}$ , a diferença de massa indicada na balança forneceu o volume deslocado, que corresponde ao volume da amostra (Silveira *et al.* 1999).

A partir dos valores obtidos foi empregada a expressão:

$$\rho_{ap} = \frac{P_u}{V_u}$$

Em que:

$\rho_{ap}$ : densidade aparente,  $\text{kg m}^{-3}$ ;

$P_u$ : massa do corpo-de-prova, kg;

$V_u$ : volume deslocado pelo corpo-de-prova,  $\text{m}^3$ .

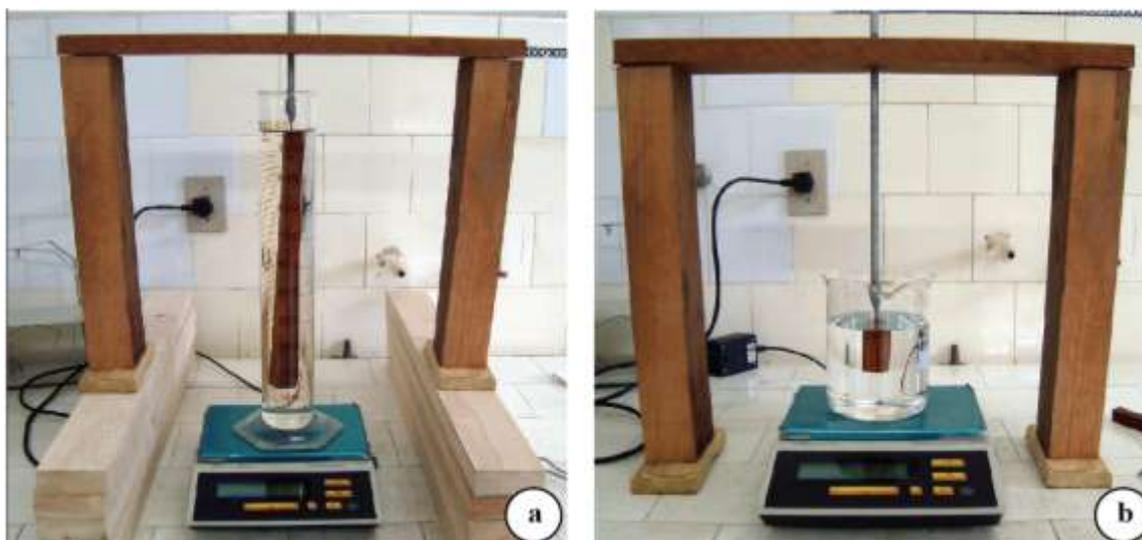


Figura 2. Determinação do volume das amostras na segunda e terceira etapas. a. Varetas curtas. b. Corpos-de-prova.

### 2.3. Velocidade de propagação do som ( $v$ )

Para a determinação da velocidade de propagação do som ( $v$ ) empregou-se a mesma metodologia descrita no capítulo 1 (figura 3), para a qual se utilizou o aparelho G. Lucchi Elasticity Tester. Conhecendo-se o tempo que o impulso levou para percorrer a amostra e o comprimento da mesma, foi calculada a velocidade de propagação do som expressa em  $\text{m s}^{-1}$  (Lucchi 1986). Esse ensaio foi realizado em amostras de comprimentos variados conforme descrito no item 2.1.

### 2.4. Módulo de elasticidade dinâmico ( $\text{MOE}_d$ )

A partir dos valores de densidade e velocidade de propagação do som através da madeira, foi calculado o módulo de elasticidade dinâmico conforme Lucchi (1986), empregando-se a seguinte expressão:

$$E = \frac{\textit{velocidade}^2}{100} \times \textit{densidade}$$

Em que:

$E$ : módulo de elasticidade dinâmico, MPa;

$\textit{velocidade}$ : s;

$\textit{densidade}$ :  $\text{kg m}^{-3}$ .

## 2.5. Módulo de elasticidade à flexão estática (MOE<sub>e</sub>) e Módulo de ruptura (MOR)

Para este ensaio foram empregadas 18 varetas curtas (com 35 x 1,5 x 1,5 cm) e utilizou-se máquina universal de ensaios Contenco UMC-300. As varetas foram posicionadas entre dois apoios, em seguida aplicou-se uma carga no centro das mesmas. A carga foi aplicada em incrementos, medindo-se concomitantemente a força aplicada e a deformação apresentada pela vareta amostrada estabelecendo-se o ponto onde o material deixou de apresentar um comportamento elástico e passou a apresentar um comportamento plástico (limite de proporcionalidade). A aplicação da carga continuou até a ruptura, obtendo-se assim, a resistência do material (ABNT 1997, modificada). Os módulos de elasticidade e ruptura foram calculados empregando-se as equações:

### Módulo de elasticidade

$$f_m = \frac{L^3 P}{4 f b h}$$

Em que:

$f_m$ : módulo de elasticidade à flexão (MPa);

L: vão livre, 300 mm;

P: carga correspondente ao limite da proporcionalidade, N;

f: valor da deformação (mm);

b: dimensão do corpo-de-prova perpendicular à força aplicada, mm;

h: dimensão do corpo-de-prova paralelo à força aplicada, mm;

### Módulo de ruptura

$$f_f = \frac{3 P_r L}{2 b h^2}$$

Em que:

$f_f$ : resistência à flexão estática, MPa;

$P_r$ : carga de ruptura, N;

L: vão livre, 300 mm;

b: dimensão do corpo-de-prova perpendicular à força aplicada, mm;

h: dimensão do corpo-de-prova paralelo à força aplicada, mm;



Figura 3. Vareta curta em ensaio destrutivo para a determinação do módulo de elasticidade estático e do módulo de ruptura. Foto de Israel Luiz de Lima.

## 2.6. Resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ )

Para obter-se a resistência à compressão paralela às fibras, também foi utilizada máquina universal de ensaios Contenco UMC-300. Foram ensaiados 18 corpos-de-prova com dimensões de 3 x 1,5 x 1,5 cm, obtidos conforme indicado na figura 1. O ensaio consistiu na aplicação de cargas em incremento no qual se mediu a deformação do corpo-de-prova (ABNT 1997, modificada).

Para a obtenção dos valores dessa variável foi utilizada a expressão:

$$f_{c0} = \frac{P_r}{A}$$

Em que:

$f_{c0}$ : resistência à compressão paralela às fibras, MPa;

$P_r$ : carga de ruptura, N, e

$A$ : área da seção transversal,  $\text{mm}^2$ .



Figura 4. Corpo-de-prova em ensaio de compressão paralela às fibras. Foto de Israel Luiz de Lima.

## 2.7. Resistência ao cisalhamento ( $f_v$ )

Na obtenção da resistência ao cisalhamento foram utilizados 54 corpos-de-prova, nove de cada madeira, com dimensões de 3 x 1,5 x 1,5 cm, com 3,75 cm<sup>2</sup> na área cisalhada (ABNT 1997, modificada). Utilizou-se máquina universal de ensaios Contenco UMC-300.

Para o cálculo foi usada a expressão:

$$f_v = \frac{f_{v0}}{A_c}$$

Em que:

$f_v$ : resistência aos cisalhamento, MPa;

$f_{v0}$ : máxima força cisalhante aplicada ao corpo-de-prova, N, e,

$A_c$ : área da seção cisalhada, mm<sup>2</sup>.



Figura 5. Corpo-de-prova em ensaio de cisalhamento. Foto de Israel Luiz de Lima.

## 2.8. Retração volumétrica ( $\epsilon_v$ )

A retração volumétrica foi avaliada em 54 corpos-de-prova, nove de cada madeira de 5 x 1,5 x 1,5 cm, que foram saturados em água por cerca de 30 dias. Posteriormente, com auxílio de paquímetro, foi obtido o volume saturado de cada um e, em seguida, os mesmos foram secos em estufa até atingirem a massa seca constante a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$ , obtendo-se então o volume seco de cada corpo-de-prova (ABNT 1997, modificada).

A expressão utilizada foi:

$$\epsilon_v = \frac{V_u - V_s}{V_u} 100$$

Em que:

$\epsilon_v$ : retração volumétrica, %;

$V_u$ : volume úmido,  $\text{cm}^3$ ;

$V_s$ : volume seco,  $\text{cm}^3$ .



Figura 6. Determinação das dimensões dos corpos-de-prova, com paquímetro digital, para a avaliação da retração volumétrica.

## **2.9. Análise estatística**

A análise estatística dos resultados foi realizada com auxílio do programa *SigmaStat 3.5* da *SPSS Incorporation*. Para se obter as diferenças entre as propriedades das diferentes madeiras foram empregadas análises de variância e testes de comparações múltiplas (teste de Tukey).

Utilizou-se análise de regressão linear para determinar as correlações entre as propriedades e a variação da densidade aparente e velocidade de propagação do som nas varetas.

### 3. Resultados

#### 3.1. Propriedades física, acústica e mecânicas das varetas longas

Para as varetas de 70 cm, as maiores densidades ocorreram em *Dipteryx* spp., que não diferiu de *Hymenaea* spp. e *Diplotropis* spp. e as menores em *Mezilaurus itauba* e *Handroanthus* spp. Os maiores valores de velocidade de propagação do som ocorreram em *Handroanthus* spp. e os menores em *Astronium lecointei*, embora estatisticamente as diferenças não tenham sido tão significativas. O módulo de elasticidade dinâmico foi maior em *Dipteryx* spp., cujo valor se mostrou estatisticamente igual em *Hymenaea* spp. e *Diplotropis* spp. (tabela 1).

Nas análises de regressão, quando se reuniu todos os dados independentemente da madeira, não se observou correlação significativa entre a densidade aparente e a velocidade de propagação do som. Ao analisar os valores de cada madeira separadamente, foi encontrada correlação negativa significativa para *Astronium lecointei* que apresentou coeficiente de correlação de Pearson ( $r=0,856$ ) e grau de significância ( $p=0,029$ ) (figura 7).

Tabela 1. Densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ), velocidade de propagação do som ( $v$ ) e módulo de elasticidade dinâmico ( $MOE_d$ ) em varetas longas (70 cm de comprimento) nas seis madeiras estudadas.

Madeiras estudadas	Propriedades		
	$\rho_{ap}$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )	$v$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	$MOE_d$ (MPa)
<i>Handroanthus</i> spp.	850 ± 20 <b>c</b>	5270 ± 40 <b>a</b>	23246 ± 881 <b>a,b</b>
<i>Hymenaea</i> spp.	1020 ± 50 <b>a</b>	5000 ± 130 <b>a,b</b>	25139 ± 2555 <b>a</b>
<i>Mezilaurus itauba</i>	880 ± 20 <b>c</b>	5100 ± 90 <b>a</b>	22408 ± 443 <b>a,b</b>
<i>Dipteryx</i> spp.	1050 ± 40 <b>a</b>	5040 ± 270 <b>a</b>	26324 ± 3036 <b>a</b>
<i>Diplotropis</i> spp.	990 ± 30 <b>a,b</b>	4930 ± 120 <b>a,b</b>	23508 ± 609 <b>a</b>
<i>Astronium lecointei</i>	920 ± 20 <b>b,c</b>	4440 ± 410 <b>b</b>	17774 ± 2898 <b>b</b>

Os valores representam média e desvio padrão. Na mesma coluna, valores seguidos de letras distintas diferem estatisticamente em ( $p<0,05$ ) pelo teste de Tukey.

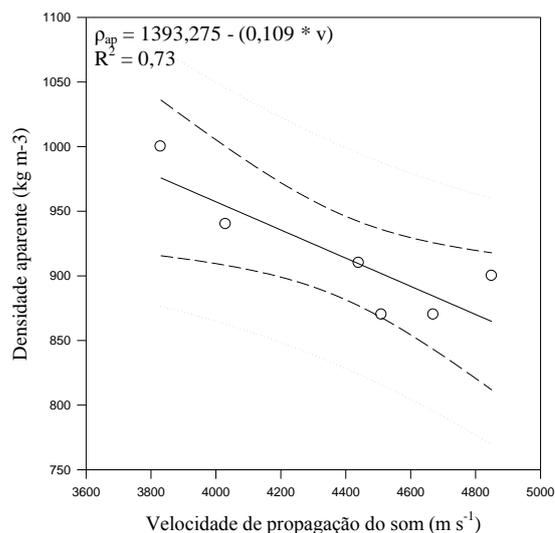


Figura 7. Correlação entre a densidade aparente e a velocidade de propagação do som em *Astronium lecointei*. Nos gráficos são mostradas as linhas que representam os percentis (10, 25, 50, 75 e 90%).

### 3.2. Propriedades física, acústica e mecânicas das varetas curtas

Semelhante ao que ocorreu nas varetas longas, nas varetas curtas (de 35cm), as maiores densidades foram constatadas em *Dipteryx* spp., que não diferiu de *Hymenaea* spp. e *Diplotropis* spp.; já *Handroanthus* spp. apresentou os menores valores. Quanto à velocidade de propagação do som e o módulo de elasticidade dinâmico, os resultados seguiram o padrão obtido com as varetas longas: *Dipteryx* spp. mostrou os valores mais altos e a *Astronium lecointei*, os mais baixos. Já para o módulo de elasticidade estático, obtido por meio de processo destrutivo, os maiores valores ocorreram em *Handroanthus* spp., os menores continuaram sendo em *Astronium lecointei*, que também mostrou os menores valores de módulo de ruptura, igualmente obtido por meio de processo destrutivo, sendo que os maiores foram em *Hymenaea* spp. (tabela 2).

Nas análises de regressão, quando se reuniu os dados independentemente da madeira, foram observadas correlações positivas significativas entre a velocidade de propagação do som e o módulo de elasticidade estático e entre aquela e o módulo de ruptura; também se observou correlação positiva significativa entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de ruptura (figura 8a-c). Ao analisar os valores de densidade aparente com a velocidade de propagação do som de cada madeira separadamente, não se observou nenhuma correlação significativa.

Tabela 2. Densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ), velocidade de propagação do som ( $v$ ), módulo de elasticidade dinâmico ( $MOE_d$ ), módulo de elasticidade estático ( $MOE_e$ ) e módulo de ruptura (MOR) em varetas curtas (35 cm de comprimento) nas seis madeiras estudadas.

Madeiras estudadas	Propriedades				
	$\rho_{ap}$ ( $kg\ m^{-3}$ )	$v$ ( $m\ s^{-1}$ )	$MOE_d$ (MPa)	$MOE_e$ (MPa)	MOR (MPa)
<i>Handroanthus</i> spp.	850 ± 20 <b>c</b>	5190 ± 10 <b>a</b>	22394 ± 636 <b>a</b>	23285 ± 5847 <b>a</b>	151 ± 18 <b>a,b</b>
<i>Hymenaea</i> spp.	990 ± 20 <b>a,b</b>	5030 ± 110 <b>a</b>	24609 ± 1327 <b>a</b>	21196 ± 3175 <b>a</b>	188 ± 14 <b>a</b>
<i>Mezilaurus itauba</i>	890 ± 20 <b>b,c</b>	4970 ± 90 <b>a,b</b>	21501 ± 435 <b>a,b</b>	19296 ± 2140 <b>a,b</b>	147 ± 14 <b>a,b</b>
<i>Dipteryx</i> spp.	1060 ± 60 <b>a</b>	5030 ± 330 <b>a</b>	26487 ± 3326 <b>a</b>	18777 ± 726 <b>a,b</b>	163 ± 28 <b>a</b>
<i>Diplotropis</i> spp.	980 ± 50 <b>a,b</b>	4980 ± 100 <b>a,b</b>	23950 ± 2047 <b>a</b>	21437 ± 1365 <b>a</b>	163 ± 1 <b>a</b>
<i>Astronium lecointei</i>	910 ± 80 <b>b,c</b>	4330 ± 450 <b>b</b>	16781 ± 2168 <b>b</b>	12405 ± 1577 <b>b</b>	96 ± 28 <b>b</b>

Os valores representam média e desvio padrão. Na mesma coluna, valores seguidos de letras distintas diferem estatisticamente em ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey.

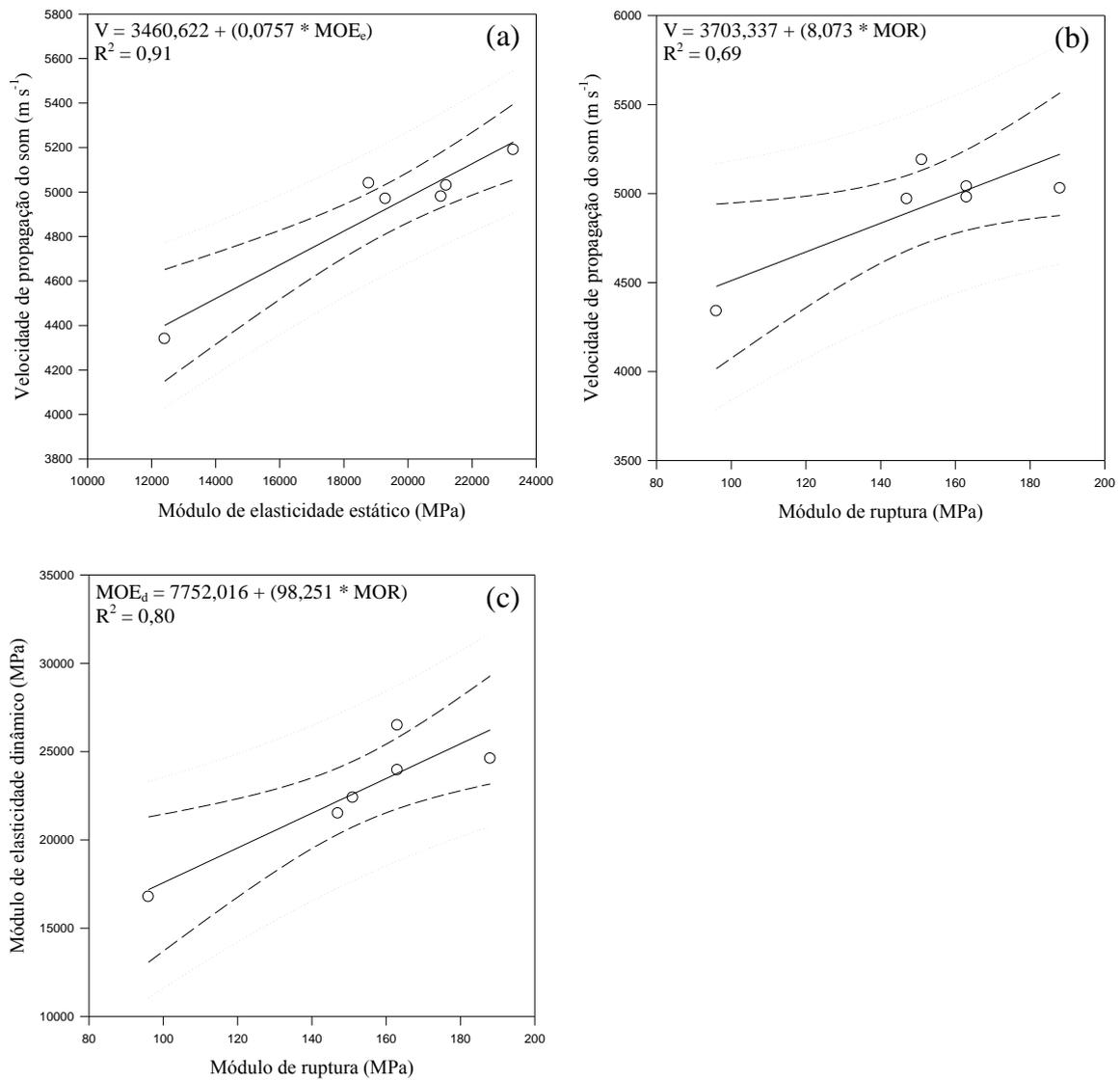


Figura 8. Correlação positiva significativa entre a velocidade de propagação do som e o módulo de elasticidade estático (a), entre a velocidade de propagação do som e o módulo de ruptura (b) e entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de ruptura (c).

### 3.3. Propriedades físicas, acústica e mecânicas dos corpos-de-prova

Os resultados relativos à densidade nos corpos-de-prova (de 5cm) seguiu o padrão observado nas varetas longas e curtas com os valores mais altos em *Dipteryx* spp. e os mais baixos no *Handroanthus* spp. No entanto, a velocidade de propagação do som foi maior em *Diploptropis* spp. e menor em *Astronium lecointei*. Para a retração volumétrica, embora os maiores valores tenham sido observados em *Diploptropis* spp. e os menores em *Hymenaea* spp., não foi detectada diferença significativa entre as madeiras. Os maiores valores de cisalhamento foram observados em *Hymenaea* spp. e os menores em *Mezilaurus itauba*. Quanto à compressão, apesar dos valores terem sido maiores em *Dipteryx* spp. e menores no *Handroanthus* spp., não foram observadas diferenças estatísticas entre as madeiras (tabela 3).

Nas análises de regressão reunindo-se os resultados de todas as madeiras, observou-se correlação positiva significativa entre a densidade aparente e a compressão paralela às fibras e entre retração volumétrica e a velocidade de propagação do som (figura 9a-b) Quando a análise foi realizada para as diferentes madeiras individualmente revelou correlações baixas, mas significativas para as amostras de *Hymenaea* spp. e *Dipteryx* spp. (figura 9b-c).

Tabela 3. Densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ), velocidade de propagação do som ( $v$ ), compressão ( $f_{c0}$ ), cisalhamento ( $f_v$ ) e retração volumétrica ( $\epsilon_v$ ) em corpos-de-prova (5 cm de comprimento) nas seis madeiras estudadas.

Madeiras estudadas	Propriedades				
	$\rho_{ap}$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )	$v$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	$f_{c0}$ (MPa)	$f_v$ (MPa)	$\epsilon_v$ (%)
<i>Handroanthus</i> spp.	840 ± 20 <b>d</b>	4770 ± 90 <b>a</b>	134,1 ± 37,4	37,8 ± 9,9 <b>b</b>	10,75 ± 2,34
<i>Hymenaea</i> spp.	1020 ± 50 <b>b</b>	4770 ± 170 <b>a</b>	219,5 ± 66,1	75,1 ± 21,5 <b>a</b>	9,88 ± 1,72
<i>Mezilaurus itauba</i>	870 ± 30 <b>d</b>	4520 ± 150 <b>b</b>	165,9 ± 14,5	15,3 ± 1,4 <b>c</b>	10,01 ± 1,73
<i>Dipteryx</i> spp.	1050 ± 40 <b>a</b>	4800 ± 220 <b>a</b>	267,8 ± 46,0	68,9 ± 12,6 <b>a</b>	11,06 ± 1,77
<i>Diploptropis</i> spp.	950 ± 20 <b>c</b>	4860 ± 340 <b>a</b>	230,4 ± 79,1	16,5 ± 4,7 <b>c</b>	11,86 ± 2,19
<i>Astronium lecointei</i>	920 ± 40 <b>c</b>	4390 ± 350 <b>b</b>	135,2 ± 11,1	49,7 ± 4,9 <b>b</b>	11,65 ± 6,63

Os valores representam média e desvio-padrão. Na mesma coluna, valores seguidos de letras distintas diferem estatisticamente em ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey.

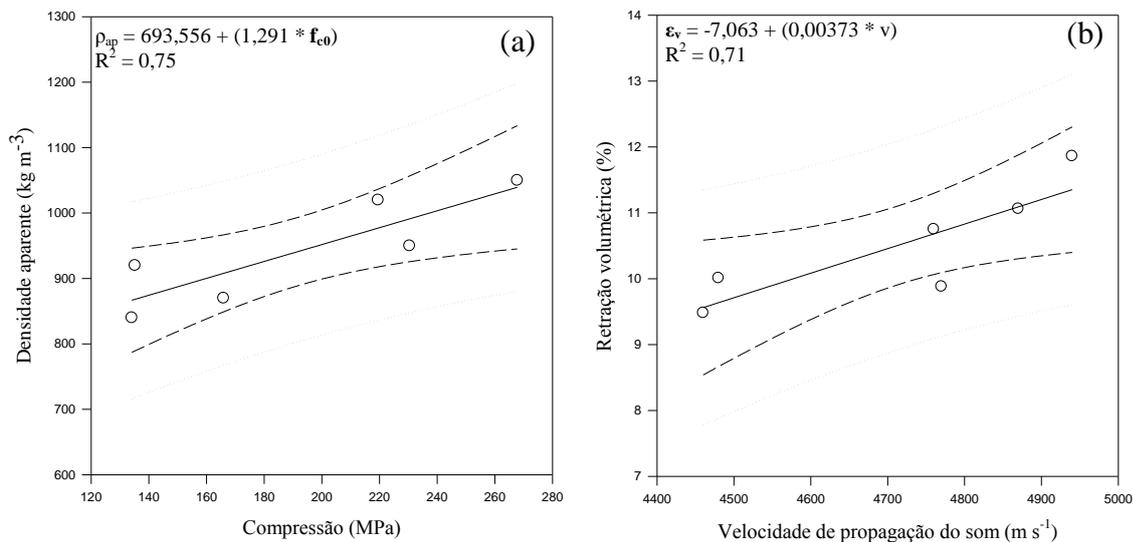


Figura 9. Correlação positiva significante entre a densidade aparente e a compressão paralela às fibras (a) e entre a retração volumétrica e a velocidade de propagação do som (b) nas amostras de todas as madeiras.

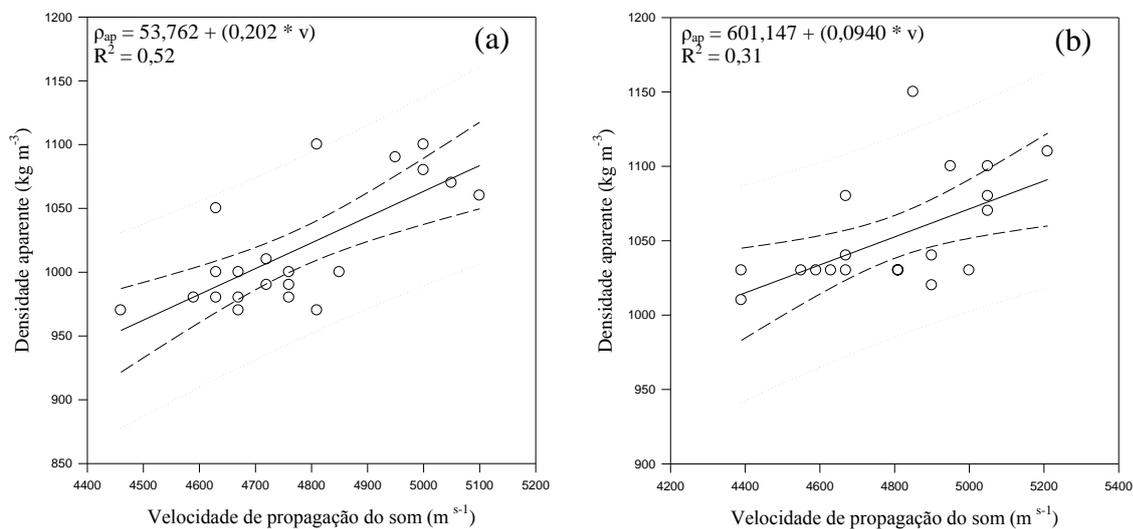


Figura 10. Correlação positiva significante entre a densidade aparente e a velocidade de propagação do som nas amostras de *Hymenaea* spp. (a) e nas amostras de *Dipteryx* spp. (b).

Além de comparar os valores de retração volumétrica, cisalhamento e compressão, também foi avaliada a variação da densidade aparente e velocidade de propagação do som ao longo das varetas curtas. Para a velocidade de propagação do som não foram observadas variações ao longo da extensão da vareta, enquanto que a densidade aparente variou significativamente em duas varetas de *Hymenaea* spp. (figura 10a-b), uma de *Mezilaurus itauba*, uma de *Diplotropis* spp. e uma de *Astronium lecointei* (figura 11a-c). As varetas de *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp. não mostraram variação na densidade aparente ao longo da sua extensão.

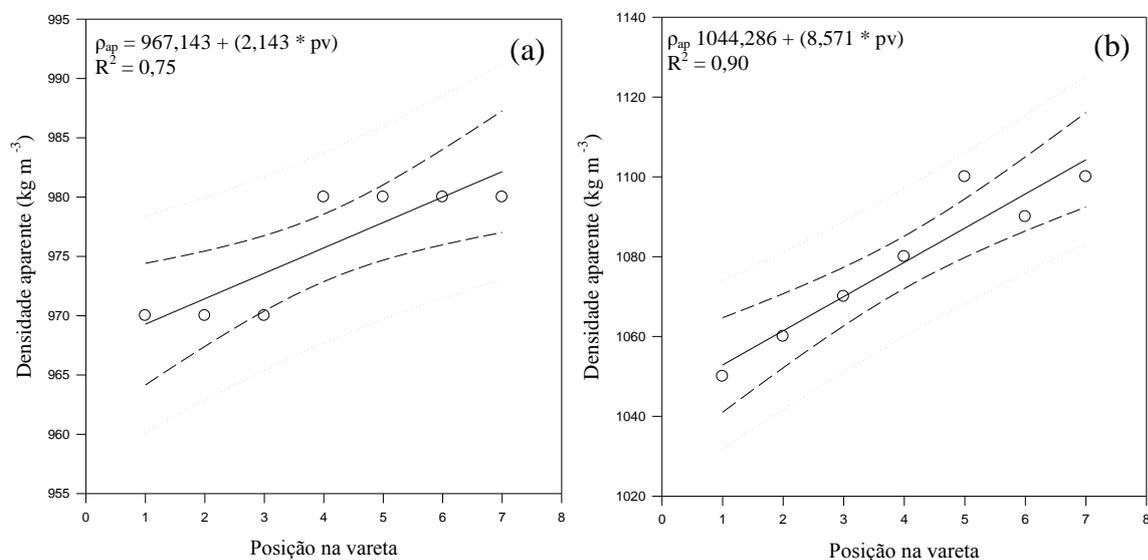


Figura 11. Variação da densidade aparente nas varetas de *Hymenaea* spp., vareta 1 (a) e vareta 2 (b).

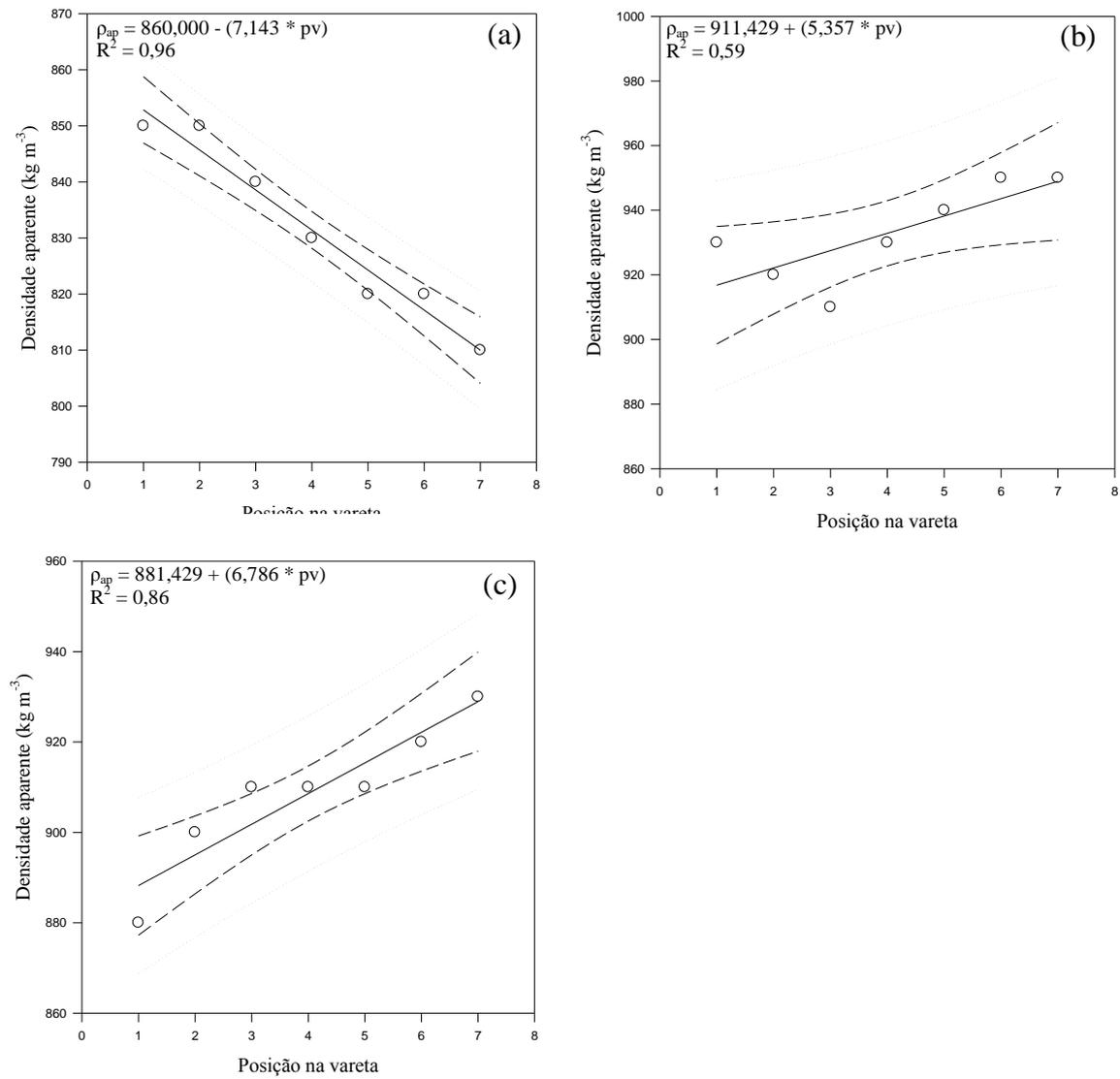


Figura 12. Variação da densidade aparente nas varetas de *Mezilaurus itauba* (a), *Diploptropis spp.* (b) e *Astronium lecointei* (c).

#### 4. Discussão

Embora as correlações entre a densidade aparente e a velocidade de propagação do som já tenham sido abordadas no capítulo 1, neste capítulo essas análises foram ampliadas, investigando-se a variação destas propriedades em amostras de diferentes comprimentos e também ao longo das varetas. Além disso, foram feitas correlações da densidade aparente e velocidade de propagação do som com outras propriedades das madeiras.

Quando os dados de todas as madeiras foram reunidos e analisados conjuntamente, não se encontrou correlação significativa entre a densidade aparente e a velocidade de propagação do som nas amostras de diferentes dimensões. No entanto, quando os dados de cada madeira foram avaliados separadamente, foi encontrada correlação negativa significativa para as varetas longas de *Astronium lecointei*, resultados semelhantes foram obtidos por Lucchi (1986), Fernandes (2004) e Calegari *et al.* (2007) ao observarem que menores densidades estavam relacionadas com maiores velocidades de propagação do som.

Ao contrário, nos corpos-de-prova (5 cm de comprimento), ocorreram correlações positivas significantes entre a densidade aparente e a velocidade de propagação do som em *Dipteryx* spp. e *Hymenaea* spp. A mesma relação positiva foi encontrada por Oliveira & Sales (2006) em *Hymenaea* sp. Outros autores como Wang *et al.* (2003) e Shimoyama (2005) não encontraram correlação entre as duas propriedades. Wegst (2006) menciona a ocorrência de madeiras com altas velocidades de propagação do som acompanhadas de valores altos e baixos de densidade.

Além das correlações entre as propriedades estudadas, avaliou-se também a variação entre a densidade aparente e a velocidade de propagação do som em diferentes trechos das varetas. Os resultados revelaram que as varetas de *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp. não mostraram variação entre as diferentes partes analisadas, o que indica que essas madeiras são mais homogêneas quando comparadas a *Hymenaea* spp. *M. itauba*, *Diploptropis* spp. e *A. lecointei*, nas quais a densidade variou de forma significativa ao longo da vareta.

Como descrito no capítulo 1, variações na densidade e velocidade de propagação do som estão correlacionadas com as características anatômicas, e uma vez que estas variam tanto no sentido axial como radial e estão associadas à ocorrência de lenho juvenil e adulto, é de se esperar variação, dependendo da região do tronco de onde a amostra foi retirada. Para a velocidade de propagação do som, há resultados opostos, Lucchi (1986) observou diminuição desta propriedade no sentido da casca, já Stargelin *et al.* (2008) mencionam aumento no mesmo sentido, os autores atribuem esse resultado às características anatômicas, como fibras de menor diâmetro e com paredes mais espessas associadas a maior densidade.

Os resultados mostram que a relação entre a densidade e a velocidade de propagação do som deve ser analisada com cautela, uma vez que nas varetas longas e curtas, maiores valores de velocidade de propagação do som foram observados em *Handroanthus* spp. que foi a madeira que apresentou as menores densidades. Além disso, encontrou-se relação negativa em varetas longas de uma das madeiras e positiva em corpos-de-prova de duas madeiras, o que sugere que a relação pode também variar em função das dimensões da peça analisada.

Portanto em madeiras para arco, apenas a alta densidade, característica definida por Alves *et al.* (2008a) como importante na qualificação da madeira, isoladamente não garante qualidade à vareta, uma vez que diferentes valores de densidade podem estar distribuídos de forma heterogênea ao longo da vareta (Longui 2005). Essa desuniformidade pode atrapalhar o processo de manufatura do arco, uma vez que o arquiteiro poderá encontrar, ao longo da vareta, trechos de maior resistência aos instrumentos de corte, além de maior dificuldade no ajuste do equilíbrio do arco. Tal fato repercutirá em maior dificuldade para o músico, que terá que compensar o desequilíbrio alterando a pressão exercida sobre o arco durante seu manuseio.

No capítulo 1 não foi possível analisar a correlação da densidade e da velocidade de propagação do som com o módulo de elasticidade dinâmico (ensaio não destrutivo), pois para o cálculo do mesmo, os valores das duas primeiras propriedades são considerados, o que acarretaria necessariamente em correlação significativa. No entanto, neste capítulo foram encontradas correlações significativas entre a velocidade de propagação do som (ensaio não destrutivo) e o módulo de elasticidade estático e módulo de ruptura (ensaios destrutivos), obtidos independentemente dos valores de densidade e velocidade de propagação do som. Também foi observada correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de ruptura. A correlação entre o módulo de elasticidade estático e módulo de ruptura também não pode ser realizada, pois o segundo é obtido com base no mesmo ensaio do primeiro.

Embora, por motivos óbvios, devam ser empregados ensaios não destrutivos na seleção de varetas para os arcos, os ensaios destrutivos são necessários para uma avaliação inicial que permita estabelecer semelhanças entre as propriedades da madeira testada e as de *C. echinata*, tradicionalmente empregada na fabricação dos arcos. Na literatura há vários trabalhos que indicam correlações significativas entre ensaios destrutivos e não destrutivos. (Tsehaye *et al.* 2002; Nogueira & Ballarin 2003; Feio 2004).

Os valores de módulo de elasticidade, que indica a rigidez da madeira, determinados por ensaio destrutivo (módulo estático), das madeiras de *Handroanthus* spp. (23285 MPa), *Hymenaea* spp. (21195 MPa) e *Diplotropis* spp. (21437 MPa), foram mais altos do que aqueles descritos por Alves *et al.* (2008a) para varetas de *C. echinata* de alta qualidade (20180

MPa) e de baixa qualidade (14233 MPa), enquanto que *A. lecointei* apresentou valor menor (12405 MPa). Schimleck *et al.* (2009), em estudo com amostras de *C. echinata* para arcos de violino, encontraram valor superior para as amostras de alta qualidade (25200 MPa), já as amostras de qualidade inferior (18900 MPa) apresentaram valor próximo do encontrado no presente estudo para *Dipteryx* spp. (18777 MPa).

Para arcos, além dos altos valores de velocidade de propagação do som e módulo de elasticidade dinâmico e estático, como mencionado acima, é importante que a madeira apresente grande resistência à ruptura, uma vez que a vareta do arco está sujeita a esforços constantes que podem provocar sua quebra. No presente estudo, maior valor de módulo de ruptura (MOR) foi encontrado em *Hymenaea* spp. (188 MPa), contudo esse valor ficou abaixo do mencionado por Alves *et al.* (2008a) para varetas de alta qualidade de *C. echinata* (196 MPa), contudo foi maior do que aquele de varetas de *C. echinata* de qualidade inferior (162 MPa). *M. itauba* e *A. lecointei* mostraram valores inferiores para essas propriedades, respectivamente 147 MPa e 96 MPa. Embora esta última não tenha apresentado grande potencial para arcos. Slooten & Souza (1993) informam que essa madeira é indicada para a fabricação de fundos de violão e fagotes, apresentando velocidade de propagação do som de  $4804 \text{ m s}^{-1}$ , módulo de elasticidade dinâmico de 11277 MPa e módulo de ruptura de 100 MPa.

Valores altos de módulo de elasticidade/rigidez, módulo de ruptura, grã direita e textura fina qualificam madeiras para arcos por torná-las mais eficientes na transmissão de energia o que melhora a tocabilidade do arco (Souza 1983; Lucchi 1986; Follmann 1995; Wegst 2006; Longui 2005e Alves *et al.* 2008a).

Além daquelas já descritas, outras propriedades devem ser investigadas em madeiras para arco, dentre elas a resistência ao cisalhamento. Segundo Matsunaga & Minato (1998) e Franco & Yojo (2008) maior resistência ao cisalhamento é importante na madeira para arco, pois essa característica confere à madeira menor risco de quebra na ponta da vareta, que está exposta a grande tensão quando curvada. Em madeiras verdes de *C. echinata* e *Handroanthus* spp. os mesmos autores encontraram valores de 16,1 e 14,9 MPa, respectivamente. Vale mencionar que a resistência da madeira diminui conforme aumenta a umidade (Logsdon & Calil Junior 2002). Assim, valores obtidos em madeiras verdes sempre serão menores do que aqueles determinados a 15% de umidade.

Matsunaga & Minato (1998), em estudo com *C. echinata*, *Manilkara bidentata*, *Dialium* sp., *Swartzia fistuloides* e *Eucalyptus pilularis*, descrevem que embora *M. bidentata* apresente os maiores valores de cisalhamento (23,9MPa), em comparação com *C. echinata* (22,5MPa), os autores mencionam que a força de cisalhamento é proporcional à densidade, assim quando

o valor de cisalhamento foi dividido pela densidade, as amostras de *C. echinata* apresentaram os maiores valores.

No presente estudo, os maiores valores de resistência ao cisalhamento ocorreram em *Hymenaea* spp. (75,1 MPa) e *Dipteryx* spp. (68,9 MPa) nos testes feitos em madeiras com cerca de 15% de umidade. O conhecimento dessa propriedade é importante uma vez que permite prever e evitar que uma vareta passe por todos os processos de manufatura e se rompa assim que o arco seja tensionado.

Embora a vareta do arco não sofra forte influência da força de compressão, essa deve ser considerada, uma vez que qualquer peça quando curvada, estará submetida a forças de compressão; no arco essas forças ocorrem na parte de cima da vareta, oposta à crina, portanto, a resistência à compressão será atuante quando o arco estiver sendo preparado e também todas as vezes que for tensionado para o ajuste das crinas. Neste estudo a compressão paralela às fibras apresentou correlação positiva ( $R^2 = 0,75$ ) com a densidade aparente, o que informa que varetas mais densas são mais indicadas para resistir à compressão. Os maiores valores (acima de 200 MPa) ocorreram nas amostras de *Dipteryx* spp., *Diploptropis* spp. e *Hymenaea* spp, enquanto que na madeira verde de *C. echinata*, Franco e Yojo (2008) descrevem valores de (60,8 MPa) para madeira nativa e (47,4 MPa) para madeira reflorestada. Logsdon & Calil Junior (2002) mencionam um valor (58,41 MPa) para a madeira verde de *Hymenaea stilbocarpa*, o que confirma a proximidade de valores da madeira desse gênero com a madeira nativa de *C. echinata*.

O estudo da retração volumétrica em madeiras para arcos é importante, uma vez que pode indicar o comportamento do arco ao longo do tempo, ou seja, se a vareta vai manter sua curvatura ou se o talão poderá apresentar algum afrouxamento que repercuta em dificuldade na tensão da crina; ou ainda se existe a possibilidade da madeira desenvolver micro rachaduras em função da troca constante de umidade com o ambiente, o que pode provocar rompimento quando o arco receber alguma força de tração. Segundo Franco & Yojo (2008) madeiras empregadas para a confecção de arcos devem preferencialmente apresentar baixos valores de retração volumétrica, o que garantirá menor variação nas dimensões da vareta quando o arco for transportado para ambientes com diferentes teores de umidade. Segundo Araújo (2007) a presença de água implica em diferenças na densidade e conseqüentemente na resistência mecânica da madeira. Na maior parte das situações, não é possível controlar a umidade do ar e como a madeira é higroscópica, seu teor de água tende a se equilibrar com o ambiente. Essas alterações ocasionam variações nas propriedades físico-mecânicas, que podem refletir na tocabilidade e durabilidade do arco.

Segundo Bowyer *et al.* (2003) *apud* Santos (2008), madeiras com maior densidade apresentam maior tendência à retração, isto deve-se ao fato que madeiras mais densas possuem maior teor de compostos que formam a parede celular, e portanto maior teor de água de adesão. Essa tendência não foi observada no presente estudo.

Dentre as madeiras estudadas por Slooten & Souza (1993) *Astronium lecointei* foi uma das que apresentou os maiores valores de retração volumétrica (12,9%). Franco & Yojo (2008) encontraram valores de 11,7% para *C. echinata* proveniente de ambiente natural e cerca de 11% para *Handroanthus* spp. No presente estudo os menores valores foram observados em *Hymenaea* spp. (9,88%) e os maiores em *Diploptropis* spp. (11,86%). Zenid (2009) menciona para *Hymenaea* spp. e *Diploptropis* spp. valores de retração volumétrica de 10,7% e 15,1%, respectivamente. Portanto, considerando-se apenas a retração volumétrica, a madeira de *Hymenaea* spp., mostrou valores adequados para a confecção dos arcos, com resultados menores do que os de *C. echinata*, já *Diploptropis* spp. apresentou valores mais altos, que podem comprometer sua utilização na arquetaria.

## 5. Conclusões

Os resultados revelam que na avaliação de madeiras potenciais para arcos, deve-se ter cautela ao analisar a densidade e a velocidade de propagação do som, uma vez que na maioria das amostras deste estudo não foram constatadas correlações entre estas duas propriedades.

As amostras de *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp não apresentaram variação na densidade e velocidade de propagação do som ao longo das varetas. Esse resultado sugere que essas madeiras são mais homogêneas, o que pode propiciar arcos mais equilibrados, além de permitir um melhor aproveitamento da madeira.

*Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp., mostraram potencial como madeiras alternativas na fabricação dos arcos para instrumentos de corda. As madeiras de *Hymenaea* spp. e *Diploptropis* spp. também se mostraram promissoras e merecem ser mais bem investigadas. Já as madeiras de *M. itauba* e *A. lecointei* não apresentaram potencial para a arquetaria.

# Capítulo 3

**Influência dos teores de extrativos totais, lignina e holocelulose na qualidade de madeiras para arcos de instrumentos de corda**



## 1. Introdução

A madeira é um biopolímero tridimensional composto principalmente de celulose, hemiceluloses e lignina, responsáveis pela formação da parede celular e conseqüentemente influenciando nas propriedades do material. De forma simplificada, pode-se dizer que a celulose forma a estrutura da parede que é complementada pelas hemiceluloses, ambas são envolvidas pela lignina. Além destes constituintes, há outras substâncias, como os extrativos, que atuam como componentes complementares, apresentando grande variabilidade tanto no teor, quanto na constituição. O conhecimento da natureza química da madeira possibilita o entendimento de seu comportamento como matéria prima nas mais diversas aplicações (Lepage 1986; Mori *et al.* 2003; Morais *et al.* 2005; Silva *et al.* 2005).

Entre os constituintes da parede celular, destaca-se a celulose, o polissacarídeo mais abundante nas plantas e componente estrutural de todas as paredes celulares; cerca de 15 a 30% da massa seca de todas as paredes primárias e uma porcentagem ainda maior das paredes secundárias é constituída por celulose (Carpita & McCann 2000). Já as hemiceluloses são polissacarídeos não-celulósicos e relacionam-se com a celulose na parede das células, sendo que os principais constituintes das polioses são: glucoses, manose, galactose, xilose e arabinose. Estes diferentes componentes das hemiceluloses apresentam grande variação entre espécies e também dentro da mesma árvore, sendo que, de maneira geral, madeiras mais duras possuem maiores teores de hemiceluloses do que os encontrados em madeiras moles (Fengel & Wegener 1989, *apud* Perissotto 2005).

Como outro constituinte das paredes celulares, a lignina é o principal componente de algumas paredes secundárias, sendo formada por um sistema aromático composto de unidades de fenilpropanóides. A lignina incorpora-se à parede da célula durante seu desenvolvimento e distribui-se entre as microfibrilas tornando a parede mais rígida e resistente à degradação (Jordão & Andrade 2000; Carpita & McCann 2000).

Os extrativos são substâncias formadas a partir de alterações dos carboidratos produzidos na fotossíntese, podem responder por mais de 20% do peso seco em madeiras tropicais. Eles estão presentes nas células parenquimáticas e no lume dos vasos e são constituídos por uma série de compostos orgânicos, como ceras, alcalóides, compostos fenólicos, mucilagens, gomas, resinas, terpenos, saponinas e óleos essenciais. Os extrativos atuam como material de reserva, ou como parte do mecanismo de defesa das plantas ao ataque de microorganismos, além de contribuírem para a cor e odor das madeiras (Panshin & De Zeeuw 1964; Pettersen 1984).

Embora existam diversos estudos que avaliem os teores de extrativos, lignina e hemicelulose na produção de papel e celulose (Rosa 2003), há poucos trabalhos que

correlacionem esses teores com as propriedades físicas, mecânicas e acústicas das madeiras: alguns deles são mencionados a seguir.

Tomazello Filho *et al.* (1985), observaram em *Pinus oocarpa* que a madeira de compressão difere quimicamente da madeira normal por apresentar maiores teores de lignina e extrativos e menor teor de holocelulose. Minato *et al.* (1997) e Sakai *et al.* (1999) observaram que a impregnação dos extrativos retirados da madeira de *C. echinata* em outras madeiras diminuía o decaimento vibracional destas, os autores explicam que em madeiras para instrumentos musicais, valores baixos de decaimento vibracional são mais adequados. Matsunaga *et al.* (1996) em estudo com *C. echinata* relacionaram a maior intensidade da cor ao maior o teor de extrativos presentes nas madeiras, o que influenciava positivamente no decaimento vibracional.

Grabner *et al.* (2005) observaram uma tendência de aumento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade com o aumento de extrativos em híbridos de *Larix*.

Longui (2005) em estudo com as madeiras de *C. echinata*, *Handroanthus* sp. e *Manilkara* sp. encontrou correlação entre os teores de lignina e a velocidade de propagação do som, além dos módulos de elasticidade e ruptura. Santos & Sansígolo (2007) mencionam que a composição química da madeira também influencia a densidade, embora de maneira não muito bem esclarecida, sendo que essa influência deve ser analisada em conjunto com outras características. Esses autores estudando clones de eucalipto encontraram maiores teores de extrativos e lignina em madeiras com menor densidade. Santos (2008) estudou a influência dos teores lignina, holocelulose e extrativos na densidade e contração de cinco madeiras do Cerrado.

O objetivo desse trabalho foi investigar a influência dos teores de extrativos totais, lignina e holocelulose na qualidade de madeiras para arcos de instrumentos de corda. Além disso, considerando a escassez de trabalhos que correlacionem a influência dos constituintes químicos da madeira nas propriedades físicas, mecânicas e acústicas, objetivou-se também, ampliar o conhecimento sobre a influência dos teores mencionados na densidade, resistência e velocidade de propagação do som nas madeiras.

## 2. Material e métodos

### 2.1. Madeiras analisadas e preparação das amostras

As espécies analisadas no presente estudo foram: ipê - *Handroanthus* spp. (Bignoniaceae); jatobá - *Hymenaea* spp. (Fabaceae); itaúba - *Mezilaurus itauba* (Lauraceae); cumaru - *Dipteryx* spp. (Fabaceae); sucupira - *Diplotropis* spp. (Fabaceae) e muiracatiara - *Astronium lecointei* (Anarcadiaceae). Informações sobre as mesmas foram apresentadas no capítulo 1. Além destas, também foram investigadas as mesmas amostras de *C. echinata* de qualidades distintas: top (ótima qualidade) e estudante (qualidade inferior) avaliadas por Longui (2005).

Optou-se pela inclusão das madeiras de *C. echinata* nesta análise, uma vez que, ao contrário das propriedades físicas, mecânicas e acústica que foram avaliadas pelo autor para *C. echinata* (Longui 2005), não se dispunha de dados sobre os teores, de extrativos, lignina e holocelulose para essa espécie, comparáveis com aqueles obtidos para as seis madeiras analisadas no presente estudo. Considerando-se que *C. echinata* foi utilizado como madeira modelo, tais dados tornaram-se indispensáveis.

As amostras foram cortadas com auxílio de serra de fita na forma de varetas conforme mencionado no item 2.3 do capítulo 1.

Corpos de prova, com cerca de 100 mm × 15 mm × 15 mm, foram retirados da região da vareta subsequente ao talão do futuro arco, como se vê na figura 1. As amostras foram fragmentadas em pedaços menores com martelo e formão (figura 2a), que posteriormente foram triturados em micromoinho de facas (figura 2b). O pó resultante (figura 2c) foi passado em peneiras classificatórias (figura 2d) sendo utilizadas as frações que passaram pela peneira de malha 40 mesh e ficaram retidas na de malha 60 mesh.



Figura 1. Representação esquemática da retirada dos corpos de prova para as análises químicas.



Figura 2. Procedimento para moagem das amostras de madeira. a. Amostras fragmentadas. b. Micromoinho de facas empregado para obtenção do pó. c. Pó obtido para as análises químicas. d. Peneiras classificatórias com malha no.16 (40 mesh) e no.24 (60 mesh). Foto (d) de Maria Regina Buch.

## 2.2. Determinação do teor de extrativos, lignina e holocelulose

A partir do pó de cada amostra foi desenvolvido um protocolo, que permitiu de maneira seqüencial, determinar os teores de extrativos totais, lignina solúvel, lignina insolúvel e holocelulose das madeiras estudadas. Esta etapa foi desenvolvida no Laboratório de Química, Celulose e Energia – LQCE, no Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP – Piracicaba/SP. A metodologia empregada está de acordo com Brito & Barrichelo (1983), Gomide & Demuner (1986) e TAPPI (1998).

### 2.2.1. Extrativos totais

Inicialmente pesou-se 1g de cada amostra, em triplicata. O pó foi colocado em pequenos sacos confeccionados em papel de filtro, os mesmos foram acondicionados em extratores soxhlets (cerca de 30 sacos em cada extrator). Realizou-se a extração com 200 ml de solução de tolueno-álcool 96° (2:1 v/v) por um período de 6 a 8 horas. O material foi seco ao ar, sendo em seguida feita nova extração com 200 ml de álcool, também por 6 a 8 horas. O material foi novamente seco ao ar, colocado em estufa a  $105 \pm 3$  °C por 2 horas, após esse período, a massa foi determinada. Na sequência, o material foi colocado em erlenmeyers com 100ml de água destilada, que foram tampados com papel alumínio e mantidos em banho-maria sob ebulição por cerca de 3 horas, sendo agitados suavemente a cada 15 minutos. O material foi então filtrado em cadinhos de vidro e lavado com água quente com auxílio de Kitassato e trompa de vácuo. Os cadinhos com o material foram colocados em estufa a  $105 \pm 3$ °C por cerca de 4 horas, retirados e esfriados em dessecador por pelo menos 15 minutos, tendo então sua massa determinada.

O teor de extrativos totais foi obtido pela expressão:

$$\text{Extrativos (\%)} = \frac{\text{PS}}{\text{PS}} \times 100$$

Onde:

PS: Peso seco da serragem



Figura 3. Conjunto para retirada dos extrativos composto de extratores soxhlet e aquecedor tipo sebelin da Marconi. Foto de Maria Regina Buch.

### 2.2.2. Lignina residual (insolúvel)

Ao final dessa etapa, o material retornou à estufa a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  por pelo menos 2 horas para posteriormente serem executados os procedimentos para determinação dos teores de lignina. Após esse período, os cadinhos com o material foram esfriados em dessecador por pelo menos 5 minutos. Pesou-se 300 mg do pó, sem extrativos, e transferiu-se o material para frascos âmbar de 250 ml que estavam em banho-maria à temperatura de 10 a 15 °C, adicionando-se 3 ml de ácido sulfúrico a 72%. Os frascos continuaram em banho-maria, aumentando-se a temperatura para  $30 \pm 2^\circ\text{C}$  por 1 hora, com agitação frequente. Após esse período, retiraram-se os frascos do banho-maria e adicionou-se em cada um 84 ml de água destilada quente. Os frascos foram então lacrados e levados a autoclave a  $118^\circ\text{C}$  (27psi), onde foram mantidos por cerca de 1 hora.

Durante a execução da etapa descrita acima, bateu-se em liquidificador, papel filtro e água, na sequência com auxílio do kitassato e trompa de vácuo, a “massa” resultante foi adicionada em cadinhos formando uma fina camada de filtro. Os cadinhos foram mantidos em estufa por pelo menos 1 hora, sendo então esfriados em dessecador e tendo suas massas

determinadas.

O material foi retirado da autoclave e filtrado nos cadinhos. Os frascos âmbar e os cadinhos foram lavados com água quente. Os cadinhos foram levados para estufa à  $105\pm 3^\circ\text{C}$  por pelo menos 4 horas, esfriados em dessecador por pelo menos 5 minutos, em seguida a massa foi estabelecida.

O teor de lignina insolúvel foi obtido pela expressão:

$$\text{Lignina insolúvel (\%)} = \left[ \frac{P_{Slig}}{P_S} \right] \times 100$$

Onde:

PS: Peso seco da serragem

Pslig.: Peso seco da lignina insolúvel



Figura 4. Equipamentos utilizados na obtenção da lignina residual e lignina solúvel. a. Banho ultratermostatizado Marconi. b. Autoclave vertical CS. Fotos de Maria Regina Buch.

### 2.2.3. Lignina solúvel

O filtrado não foi descartado, sendo empregado para a obtenção da lignina solúvel em ácido sulfúrico. Transferiu-se o filtrado para balões volumétricos de 1000 ml, passou-se água quente nos Kitassatos, que foi transferida para os balões, completando-se o volume. Foram preparadas amostras em branco, diluindo-se 3 ml de ácido sulfúrico a 72% para 100 ml. Em espectrofotômetro UV-visível Cary 100 Conc, realizou-se a leitura dos filtrados e do branco em dois comprimentos de onda – 215 nm e 280 nm utilizando cubetas de quartzo.

O teor lignina solúvel foi obtido pela expressão:

$$\text{Lignina solúvel (\%)} = \left[ \frac{4.53 \times (L_{215} - \text{branco}) - (L_{280} - \text{branco})}{500 \times PS} \right] \times 100$$

Onde:

PS: Peso seco da serragem



Figura 5. Espectrofotômetro Cary UV visível 100 CONC da Varian, utilizado para a obtenção dos valores de lignina residual. Foto de Maria Regina Buch.

#### 2.2.4. Holocelulose

A determinação da holocelulose foi feita por meio de cálculo, subtraindo-se as porcentagens de extrativos totais, lignina residual e solúvel.

#### 2.3. Análise estatística

A análise estatística dos resultados foi realizada com auxílio do programa *SigmaStat 3.5* da *SPSS Incorporation*. Para se obter as diferenças entre os teores nas diferentes madeiras foi empregada análise de variância e teste de comparações múltiplas (teste de Tukey). Também se utilizou análise de regressão linear, com a qual foram determinadas as correlações entre os teores de extrativos, lignina e holocelulose com os valores de densidade aparente, velocidade de propagação do som e módulo de elasticidade dinâmico, obtidos no capítulo 1, lembrando que as amostras para as análises químicas representam a continuidade das varetas que foram avaliadas quanto às propriedades acima mencionadas. Analisaram-se também amostras de *C. echinata*, estudadas por Longui (2005) e Alves *et al.* (2008a), destas empregaram-se os dados de densidade aparente, velocidade de propagação do som, módulo de elasticidade estático e módulo de ruptura.

### 3. Resultados

O teor de extrativos foi maior nas amostras de *C. echinata* (estudante), que não diferiu de *C. echinata* (top), *Hymenaea* spp. e *Astronium lecointei*. Os maiores teores de lignina residual ocorreram em *M. itauba*, *Dipteryx* spp. que diferiu estatisticamente de *Handroanthus* spp. Já para a lignina solúvel, os maiores teores foram observados nas amostras de *C. echinata* (top e estudante) e *Diplotropis* spp. que não apresentaram diferença estatística entre si. O teor de holocelulose foi maior nas amostras de *Diplotropis* spp., sendo que as demais madeiras não diferiram estatisticamente, no entanto, o menor valor foi observado nas amostras de *C. echinata* (estudante). Os resultados são apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Teores de extrativos totais (ET), lignina residual (LR), lignina solúvel (LS) e holocelulose (HO) das madeiras estudadas.

Madeiras estudadas	Teores %			
	ET	LR	LS	HO
<i>Caesalpinia echinata</i> (estudante)	20,1 ± 3 <b>a</b>	29,9 ± 0,9 <b>b,c</b>	1,8 ± 0,2 <b>a</b>	48,1 ± 3,8 <b>b</b>
<i>Caesalpinia echinata</i> (top)	17,9 ± 0,5 <b>a,b</b>	29 ± 0,1 <b>c</b>	1,7 ± 0,1 <b>a</b>	51,2 ± 0,4 <b>b</b>
<i>Handroanthus</i> spp.	11 ± 2,7 <b>b,c</b>	32,5 ± 2,0 <b>a,b</b>	0,9 ± 0,4 <b>b</b>	55,4 ± 3,4 <b>b</b>
<i>Hymenaea</i> spp.	13,8 ± 5,5 <b>a,b</b>	29,7 ± 0,5 <b>c</b>	0,7 ± 0,3 <b>b,c</b>	55,6 ± 5,6 <b>b</b>
<i>Mezilaurus itauba</i>	11,3 ± 2,6 <b>b,c</b>	33,8 ± 0,9 <b>a</b>	0,2 ± 0,1 <b>c</b>	54,5 ± 2,5 <b>b</b>
<i>Dipteryx</i> spp.	11,3 ± 2,4 <b>b,c</b>	33,4 ± 0,5 <b>a</b>	0,8 ± 0,2 <b>b,c</b>	54,4 ± 2,3 <b>b</b>
<i>Diplotropis</i> spp.	5,4 ± 3,2 <b>c</b>	30 ± 1,7 <b>b,c</b>	1,5 ± 0,3 <b>a</b>	62,9 ± 2,3 <b>a</b>
<i>Astronium lecointei</i>	14 ± 6,7 <b>a,b</b>	30,5 ± 1,4 <b>b,c</b>	0,8 ± 0,1 <b>b</b>	54,5 ± 5,6 <b>b</b>

São apresentados os valores médios e o desvio-padrão. Na mesma coluna, valores seguidos de letras distintas diferem estatisticamente em ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey.

Nas análises de regressão linear, quando foram reunidos os dados de todas as madeiras, não foi observada nenhuma correlação significativa entre os teores analisados e a densidade aparente, velocidade de propagação do som, módulos de elasticidade estático e dinâmico e módulo de ruptura. No entanto, quando os dados de cada madeira foram analisados separadamente, houve correlações positivas ou negativas, que são discutidas a seguir para cada uma. Cabe destacar que todos os teores analisados, especialmente o teor de extrativos e a lignina residual, apresentaram correlação com a densidade aparente.

Para *C. echinata*, devido ao pequeno número de amostras, foram reunidos para a mesma análise de regressão linear dados das categorias top e estudante. Encontraram-se correlações negativas significantes entre o teor de extrativos e a velocidade de propagação do som (figura 6a), o teor de lignina residual e o módulo de elasticidade estático (figura 6b) e entre o teor de lignina residual e o módulo de ruptura (figura 6c). Correlações positivas significantes foram notadas entre teor de holocelulose e velocidade de propagação do som (figura 7a) e entre o teor de holocelulose e o módulo de ruptura (figura 7b).

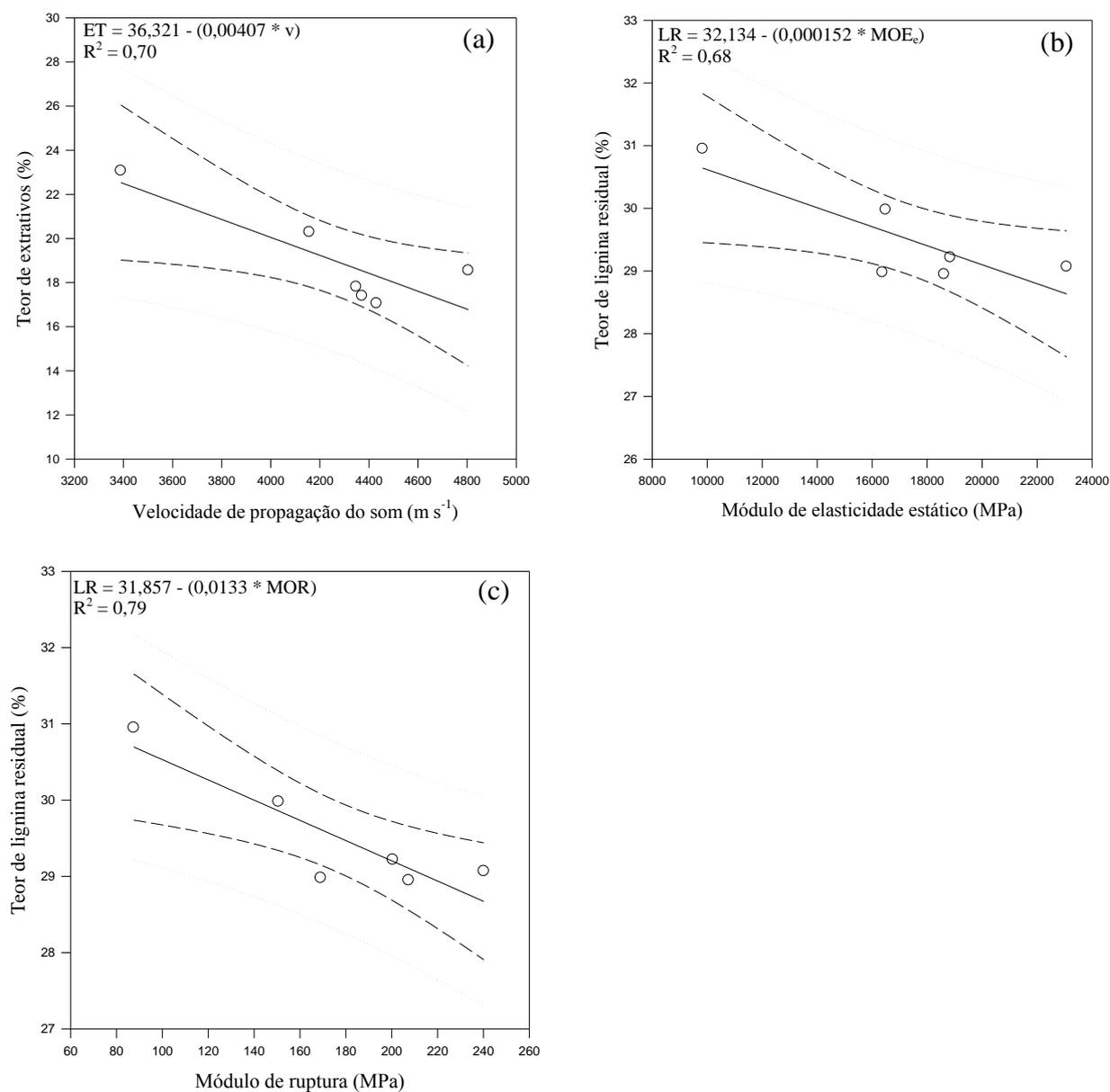


Figura 6. Correlações negativas significantes entre o teor de extrativos e a velocidade de propagação do som (a), entre o teor de lignina residual e o módulo de elasticidade estático (b) e entre o teor de lignina residual e o módulo de ruptura (c) em *Caesalpinia echinata*. Nos gráficos são mostradas as linhas que representam os percentis (10, 25, 50, 75 e 90%).

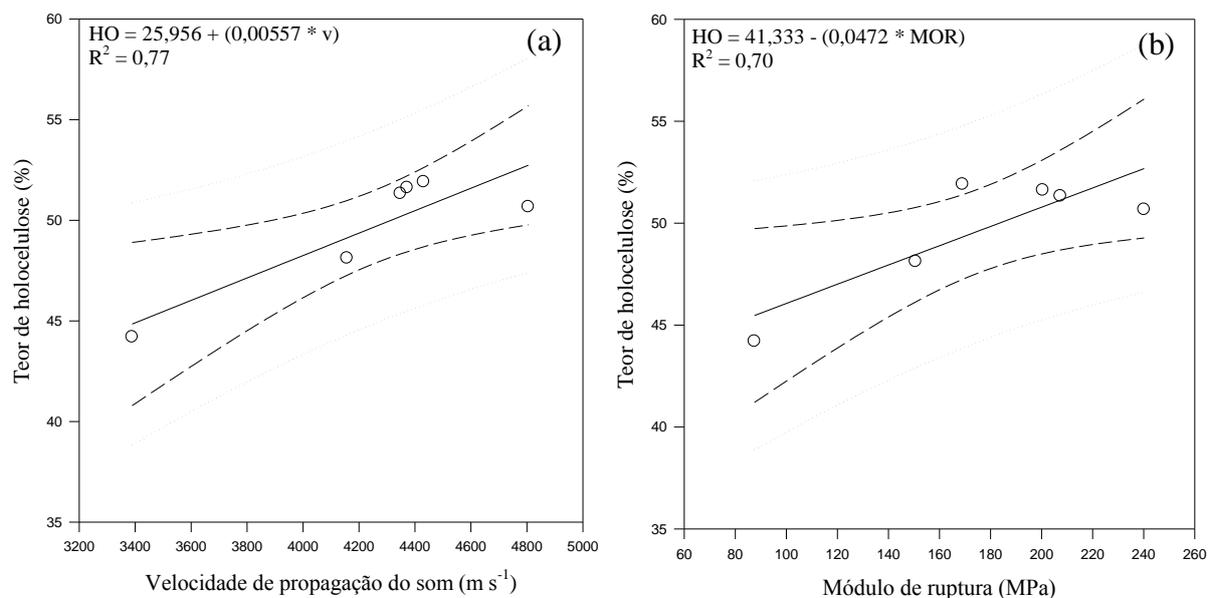


Figura 7. Correlações positivas significantes entre o teor de holocelulose e a velocidade de propagação do som (a) e entre o teor de holocelulose e o módulo de ruptura (b) em *C. echinata*.

Em *Handroanthus* spp. foi detectada apenas correlação positiva significante entre o teor de extrativos e a densidade aparente (figura 8).

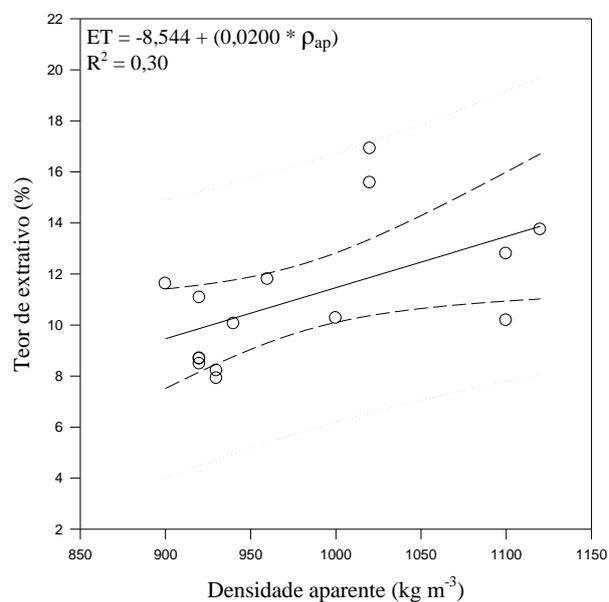


Figura 8. Correlação positiva significante entre o teor de extrativos e a densidade aparente (a) em *Handroanthus* spp.

Para as amostras de *M. itauba*, há correlações negativas significantes entre o teor de extrativos e a velocidade de propagação do som (figura 9a) e entre o teor de lignina residual e a densidade aparente (figura 9b). Correlação positiva significante também foi observada para teor de holocelulose e a velocidade de propagação do som (figura 9c).

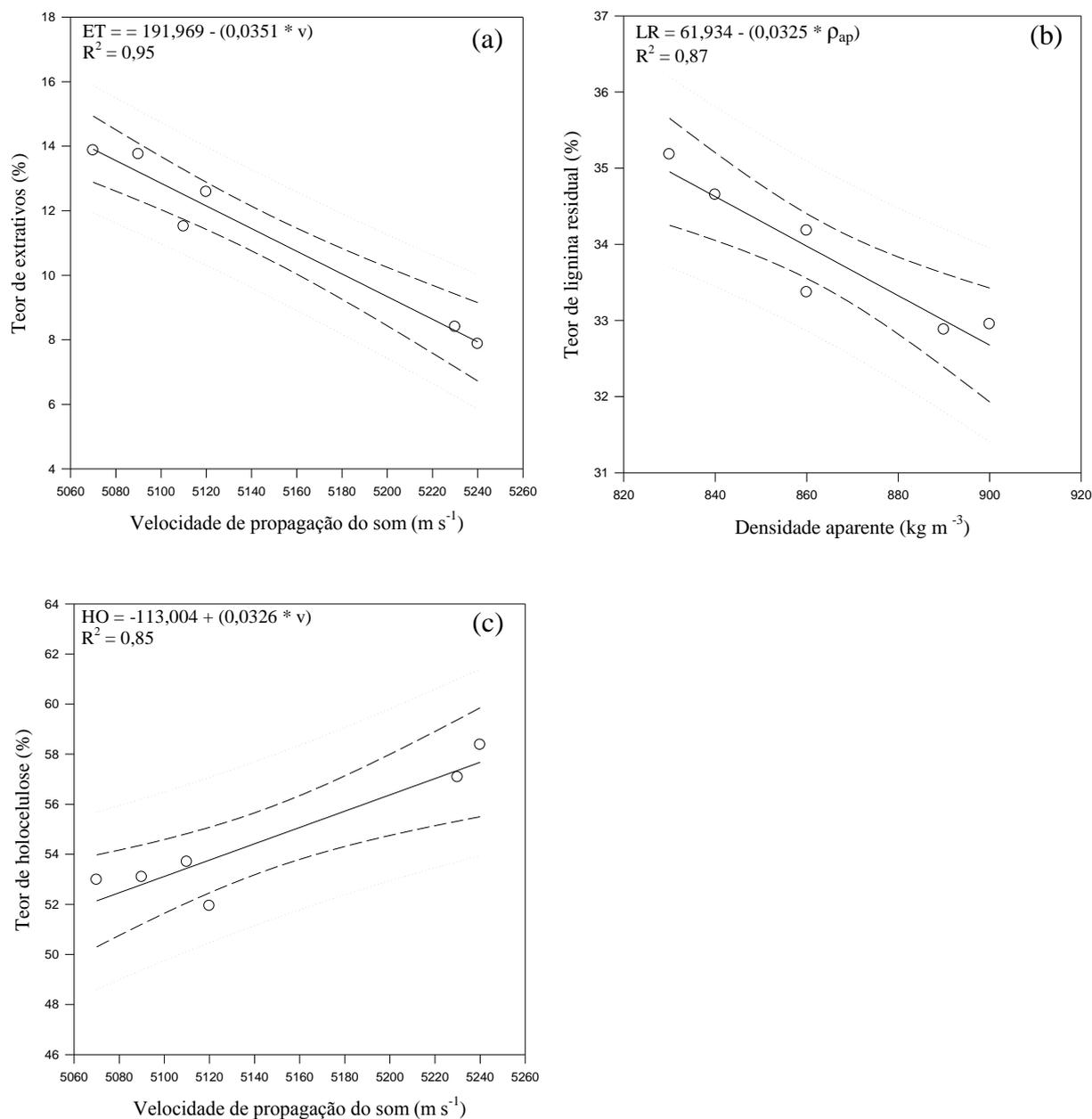


Figura 9. Correlações negativas significantes entre o teor de extrativos e a velocidade de propagação do som (a), entre o teor de lignina residual e a densidade aparente (b) e correlação positiva significante entre o teor de holocelulose e a velocidade de propagação do som (c) em *Mezilaurus itauba*.

Entre as amostras de *Dipteryx* spp. foram encontradas correlações positivas significantes entre o teor de extrativos e a densidade aparente (figura 10a) e entre o teor de lignina solúvel e a densidade aparente (figura 10b). Além de correlação negativa significativa entre o teor de holocelulose e a densidade aparente (figura 10c).

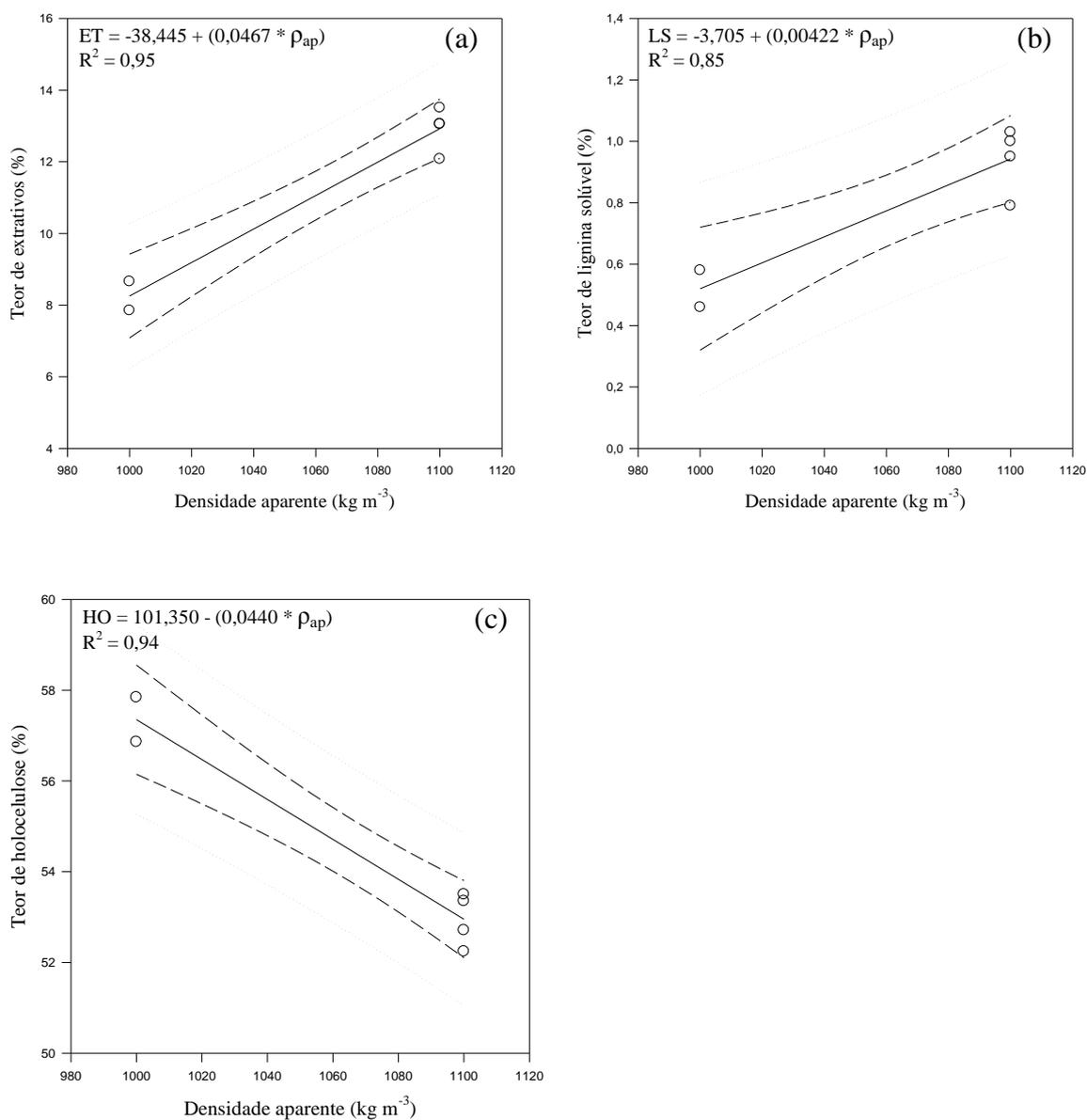


Figura 10. Correlações positivas significantes entre o teor de extrativos e a densidade aparente (a) e entre o teor de lignina solúvel e a densidade aparente (b) e correlação negativa significativa entre o teor de holocelulose e a densidade aparente (c) em *Dipteryx* spp.

Em *A. lecointei* foi observada correlação negativa significativa entre o teor de lignina residual e a densidade aparente (figura 11).

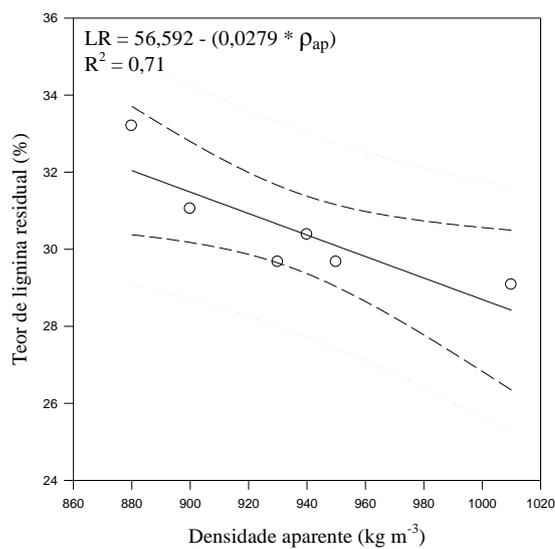


Figura 11. Correlação negativa significativa entre o teor de lignina residual e a densidade aparente em *Astronium lecointei*.

Para *Diplotropis* spp. e *Hymenaea* spp. não foram observadas correlações significativas para todas as características avaliadas.

#### 4. Discussão

Além das características anatômicas, as proporções dos diferentes constituintes da parede celular, como a holocelulose e a lignina, e também os extrativos presentes nas células parenquimáticas e no lume dos vasos contribuem para as diferenças encontradas nas propriedades físicas, mecânicas e acústicas das madeiras (Panshin & De Zeeuw 1964; Matsunaga *et al.* 1996; Minato *et al.* 1997; Obataya *et al.* 1998; Sakai *et al.* 1999; Bergander & Salmén 2002; Longui 2005; Santos 2008).

Há referências na literatura de que madeiras com maior teor de extrativos têm a tendência de apresentar maior densidade (Bowyer *et al.* 2003 *apud* Santos 2008). No presente trabalho, constatou-se essa relação positiva em *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp.

Nas demais madeiras não se observaram correlações entre a o teor de extrativos e a densidade, incluindo entre elas *C. echinata* que apresentou o maior teor de extrativos dentre todas as analisadas. Santos (2008) em estudo com cinco espécies de cerrado também não encontrou correlação entre estas duas propriedades.

A correlação entre o teor de lignina e a densidade também variou entre as madeiras, a lignina solúvel contribuiu para o aumento na densidade de *Dipteryx* spp., e a lignina residual para o decréscimo em *M. itauba* e *A. lecointei*, para as outras madeiras não foi observada correlação significativa. No caso da holocelulose, a única correlação observada com a densidade, foi em *Dipteryx* spp., sendo negativa.

Como descrito nos capítulos anteriores, a densidade é uma propriedade importante na seleção das madeiras para arcos. No entanto, não se observou uma influência muito clara dos teores aqui analisados na densidade das madeiras, uma vez que foram encontradas tanto correlações positivas como negativas. Cabe destacar que *Dipteryx* spp. e *M. itauba* mostraram densidades significativamente diferentes:  $1070 \text{ kg m}^{-3}$  e  $840 \text{ kg m}^{-3}$ , respectivamente (capítulo 1, tabela 3). No entanto, os teores dessas duas madeiras apresentaram valores muito próximos.

Para as mesmas amostras de *C. echinata* aqui estudadas, Alves *et al.* (2008a) mencionam densidade média de  $950 \text{ kg m}^{-3}$  para a categoria estudante e,  $1020 \text{ kg m}^{-3}$  para a categoria top, sendo que a menor frequência de vasos e raios e a maior porcentagem de fibras nas madeiras da categoria top contribuíram para a maior densidade observada. No presente estudo, entre as diferentes qualidades, os valores de lignina foram muito próximos, já o teor de extrativos foi maior na categoria estudante e o teor de holocelulose foi maior na categoria top (tabela 1), considerando que a holocelulose é um constituinte da parede celular, maiores teores desse constituinte, associados com as características anatômicas descritas acima, podem ter contribuído para os maiores valores de densidade em *C. echinata* (top).

Estes resultados sugerem que a correlação entre a densidade e os teores de extrativos, lignina e holocelulose, deva ser interpretada de maneira distinta entre as diferentes madeiras, sendo que em algumas (*Dipteryx* spp. e *M. itauba*) a participação destes teores não foi significativa, já em outras (*C. echinata*), eles parecem ter alguma contribuição na densidade das varetas dos arcos.

De acordo com Panshin & De Zeeuw (1964) e Salmén & Burgert (2008), o desempenho das propriedades mecânicas da madeira é altamente dependente do arranjo estrutural e, dos teores e propriedades dos polímeros presentes na parede das células. Takaaki *et al.* (2007) e Salmén & Bergström (2009) encontraram correlação positiva entre o teor de celulose e a rigidez e resistência da madeira.

No presente estudo, a relação entre os teores dos constituintes aqui analisados e as propriedades mecânicas da madeira foi observada em *C. echinata*, uma vez que o aumento nos teores de lignina mostrou associação com menores valores de módulo de elasticidade e módulo de ruptura. Embora Alves *et al.* (2008a), por meio de análise dos componentes principais (PCA), tenham observado correlação entre o módulo de elasticidade e o teor de lignina, obtida por metodologia diferente da realizada neste estudo, observa-se que os valores de lignina, aqui apresentados são muito próximos e que possivelmente não são responsáveis pela grande diferença encontrada nos módulos de elasticidade das duas qualidades de varetas de *C. echinata*, top (29513 MPa) e estudante (22225 MPa). As maiores diferenças entre as varetas top e estudante de *C. echinata* foram notadas no teor de extrativos, maior nas últimas; e para o teor de holocelulose, maior nas primeiras. Sendo que foi observada correlação positiva entre o teor de holocelulose e o módulo de ruptura, assim de forma semelhante ao que ocorreu com a densidade, considerando que a holocelulose é um constituinte da parede celular, maiores teores, associados com as características anatômicas, podem ter contribuído para aumentar a resistência à ruptura das amostras top de *C. echinata*.

Da mesma forma que a densidade, a influência dos teores de extrativos, lignina e holocelulose no módulo de elasticidade dinâmico deve ser interpretada para cada madeira de forma particular, uma vez que não foram observadas relações muito claras quando as madeiras foram analisadas conjuntamente. Ao comparar os resultados dos diferentes teores e do módulo de elasticidade para as seis madeiras estudadas no capítulo 1 (tabela 3) e para *C. echinata* estudada por Longui (2005) e Alves *et al.* (2008a), notou-se que o valor médio do módulo de elasticidade dinâmico das amostras de *C. echinata* (top) foi de (29513 MPa), maior do que o das seis madeiras estudadas no capítulo 1, enquanto que os de *C. echinata* (estudante) é de (22225 MPa), valor que só não é menor do que o apresentado por *A. lecointei* (17487 MPa). Embora sem diferença estatística, *A. lecointei* apresentou maiores valores de

lignina e holocelulose em comparação com *C. echinata*. Estes resultados sugerem que outras características, possivelmente às anatômicas (como comprovado no capítulo 1) têm participação mais efetiva nas propriedades da madeira do que os teores dos diferentes constituintes.

No caso da velocidade de propagação do som, não se observou correlação com os teores de lignina. Já o maior teor de extrativos está correlacionado com a diminuição na velocidade de propagação do som em *C. echinata* e *M. itauba*. Longui (2005) e Alves *et al* (2008a) observaram que valores altos de velocidade de propagação do som estavam associados a madeiras mais rígidas, sendo que a velocidade de propagação do som pode ser usada para estimar a rigidez da madeira. Carrasco & Azevedo Júnior (2003) mencionam que maior teor de celulose implica no aumento da rigidez. No presente estudo, para *C. echinata* e *M. itauba* foi notado que o aumento no teor de holocelulose está relacionado a maiores velocidades de propagação do som.

Schimleck *et al.* (2009), em estudo com amostras de *C. echinata* para arcos de violino, de três qualidades distintas, observaram que nas amostras de qualidade inferior o teor de extrativos foi de 24,9% com rigidez de 18900 MPa, nas amostras de média qualidade o teor de extrativos foi de 22,9% e a rigidez 24958 MPa, já nas amostras de alta qualidade, o teor de extrativos foi de 21,2 % e a rigidez 925200 MPa. Os autores concluíram que alto teor de extrativos correlacionou-se negativamente com a qualidade da vareta, o que está de acordo com o apresentado por Alves *et al.* (2008a).

No presente estudo, avaliaram-se as mesmas amostras de *C. echinata* examinadas por Alves *et al.* (2008a), mas por meio de técnica diferente, e comprovou-se a presença de menor teor de extrativos nas amostras de *C. echinata* top (17,92%) em relação a qualidade estudante (20,14%). A contribuição do teor de extrativos parece não ter grande influência na velocidade de propagação do som, uma vez que as varetas de *Dipterix* spp., madeira com menor teor de extrativos, apresentou velocidade de propagação maior do que madeiras com maiores teores de extrativos (capítulo 1, tabela 3).

Além dos extrativos, os teores de lignina e holocelulose também não pareceram influenciar significativamente a velocidade de propagação do som. Para evidenciar esta discussão, novamente tomam-se como exemplo as madeiras de *Dipterix* spp. e *M. itauba* que apresentaram o mesmo valor médio de velocidade ( $5140 \text{ m s}^{-1}$ ) ver tabela 3 do capítulo 1. No entanto, os teores dessas duas madeiras apresentaram valores muito próximos.

Com base nos resultados dos componentes químicos das madeiras aqui analisadas, conclui-se que, para a seleção de madeiras adequadas para a fabricação dos arcos, os dados químicos, anatômicos, físicos e mecânicos e acústicos devam ser interpretados conjuntamente,

uma vez que a análise isolada pode levar a uma compreensão errônea da qualidade da madeira avaliada.

## 5. Conclusões

Os resultados sugerem que a correlação entre a densidade e os teores de extrativos, lignina e holocelulose deve ser interpretada de maneira distinta entre as diferentes madeiras, uma vez que a influência destes constituintes varia, dependendo da madeira analisada.

Há correlação positiva significativa entre o teor de holocelulose e a resistência à ruptura na madeira de *C. echinata*.

Quanto à velocidade de propagação do som, há uma correlação negativa entre esta propriedade e o teor de extrativos nas madeiras de *C. echinata* e *M. itauba*. Para as outras madeiras não foram notadas influências significativas.

## Capítulo 4

**Trabalhabilidade, propriedades organolépticas e disponibilidade de mercado em madeiras potenciais para arcos de instrumentos de corda**



## 1. Introdução

A utilização de novas espécies fornecedoras de madeiras, em substituição a outras já consagradas, exige o conhecimento de suas propriedades tecnológicas, especialmente a resistência, de propriedades organolépticas, ou seja, aquelas que impressionam nossos sentidos, e da trabalhabilidade, que se refere ao comportamento da madeira em responder aos processos realizados com ferramentas ou máquinas. As madeiras tradicionais tiveram essas e outras propriedades comprovadas ao longo de décadas de uso, assim a comparação das propriedades das madeiras potenciais com as das madeiras tradicionais, representa uma estratégia eficaz para aferir o potencial de outras espécies. Contudo, na prática, quando se trabalha com madeira, deve-se considerar a heterogeneidade, anisotropia e variabilidade desse material, uma vez que nem mesmo dois pedaços de madeira da mesma espécie são absolutamente iguais (Burger & Richter 1991; Hoadley 2000; Araújo 2002), o que dificulta a seleção de madeiras alternativas.

Desde que apresentem as propriedades físico-mecânicas adequadas, as madeiras também são escolhidas por um conjunto de aspectos que caracterizam suas propriedades organolépticas, como a cor, que é dada por pigmentos, taninos, resinas e pode ser alterada pela luz e oxidação; o cheiro originado da presença de substâncias depositadas principalmente nas células do cerne; o brilho, decorrente da propriedade das paredes celulares refletirem a luz; a textura, que é a impressão visual produzida pelo tamanho dos vasos e raios; a grã que se refere à disposição das células orientadas longitudinalmente e o desenho, que resulta de várias características como diferenciação entre cerne e alburno, cor, grã e especialmente dos anéis de crescimento e raios (Brunelli *et al.* 1997). Segundo Gonçalves (2000) em madeiras nas quais as camadas de crescimento são bem visíveis, os planos longitudinais podem apresentar desenhos interessantes, formando cones sobrepostos no plano longitudinal tangencial e linhas no longitudinal radial, o que pode ser atrativo do ponto de vista estético.

A trabalhabilidade é outra característica a ser considerada e é influenciada por muitos parâmetros como as propriedades físico-mecânicas e organolépticas, as características anatômicas e a presença de determinadas substâncias presentes na madeira. Entre estas características, a grã indica a o grau de dificuldade em se conseguir um bom acabamento, uma vez que peças confeccionadas com madeiras de grã irregular, ao receberem o acabamento, apresentarão superfície áspera nas regiões onde a ferramenta passar em sentido contrário à orientação das células. Em madeiras com densidade muito baixa, há dificuldade na obtenção de superfícies lisas, uma vez que em tecidos mais frágeis, as células são arrancadas, o que resulta em superfícies aveludadas. Já em madeiras com alta densidade, há grande desgaste de ferramentas. A presença de substâncias nas células, como sílica, extrativos, óleos e compostos

tóxicos, podem ocasionar dificuldade no desdobro e processamento, desgaste excessivo de ferramentas e riscos à saúde (Burger & Richter 1991; Williams 1999; Hoadley 2000).

No caso dos arcos para instrumentos de corda, a madeira de *Caesalpinia echinata* Lam. é utilizada há mais de 200 anos para tal aplicação (Bueno 2002), sendo que há poucos estudos científicos que proponham madeiras alternativas (Matsunaga *et al.* 1996; Angyalossy *et al.* 2005; Longui 2005). Além de outras madeiras, na Europa, diversos materiais vêm sendo testados na fabricação dos arcos, como tubos ocos de aço, fibra de vidro, sem resultados efetivos (Bueno 2002), embora, recentemente, tenham sido alcançados bons resultados por empresas que confeccionam arcos de fibra de carbono (Codabow 2009).

Apesar disso, as fibras de carbono, ao contrário da madeira, representam um material não renovável, originado do petróleo, cuja produção exige temperaturas superiores a 2000°C (Carvalho *et al.* 1999), e que gera resíduos tóxicos nocivos à saúde. Em contrapartida, a madeira, além de ser um material limpo e renovável, apresenta heterogeneidade intrínseca, que possibilita a confecção de peças únicas, agradáveis ao toque e de extrema beleza.

Arcos com beleza e qualidade são obtidos com o pau-brasil, árvore nativa da Mata Atlântica e que atualmente, ainda ocorre em áreas remanescentes nos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Ceará, Sergipe, Pernambuco, Alagoas, Bahia, Espírito Santo e Rio de Janeiro (Rocha 2004; Bueno 2002). No entanto, de acordo com a portaria IBAMA n.37-N, de abril de 1992, a espécie se encontra em perigo de extinção e a exploração predatória para a fabricação dos arcos pode contribuir ainda mais para agravar esse quadro, o que reforça a necessidade da busca de madeiras alternativas.

Dessa forma, a obtenção das madeiras para aplicações diversas, dentre elas, a fabricação de arcos, deve ser realizada de forma sustentada, respeitando-se as estratégias para minimizar os impactos sobre florestas nativas; além disso, o uso de madeiras alternativas contribui para diminuir o impacto sobre as madeiras tradicionais. De acordo com Brunelli (1997), apesar do volume e diversidade de madeiras nas florestas brasileiras, ainda não é possível suprir a crescente demanda por madeira. Assim, o estudo de várias espécies de madeira é essencial para se estabelecer alternativas de consumo frente as mais diversas aplicações, evitando assim a exploração predatória de algumas poucas espécies, como *C. echinata* no caso dos arcos.

Visando a proposição de madeiras alternativas para a fabricação de arcos, os objetivos desse estudo foram, com base na experiência prática do arquiteiro Daniel Lombardi - Arcos Lombardi, determinar a trabalhabilidade e propriedades organolépticas de seis madeiras potenciais, comparando-as com o pau-brasil (*Caesalpinia echinata* Lam.), a espécie tradicionalmente empregada para tal finalidade. Objetivou-se também verificar a

disponibilidade de mercado dessas seis madeiras, informação indispensável para se poder sugerir a utilização das mesmas.

## **2. Material e métodos**

### **2.1. Madeiras analisadas e critério de avaliação da trabalhabilidade**

As espécies analisadas no presente estudo foram: ipê - *Handroanthus* spp. (Bignoniaceae); itaúba - *Mezilaurus itauba* (Lauraceae); jatobá - *Hymenaea* spp. (Fabaceae); cumaru - *Dipteryx* spp. (Fabaceae); sucupira - *Diplotropis* spp. (Fabaceae) e muiracatiara - *Astronium lecointei* (Anarcadiaceae). Informações sobre as mesmas foram apresentadas no capítulo 1.

A trabalhabilidade foi estabelecida com o auxílio do arqueteiro Sr. Daniel Lombardi (Arcos Lombardi), que produz arcos de pau-brasil e de outras madeiras há cerca de 20 anos ([www.lombardiarcos.com.br](http://www.lombardiarcos.com.br)).

Para cada etapa do processo de confecção de arco desenvolvido pelo arqueteiro e descrito em Alves *et al.* (2008b), atribuiu-se uma escala de dificuldade de 1 a 5, sendo que números maiores indicam maior dificuldade em executar tal etapa. As seis madeiras analisadas no presente estudo, bem como o pau-brasil, muito conhecido pelo arqueteiro foram avaliadas por ele de forma comparativa, o que resultou numa pontuação relativa para cada etapa do processo, que somada, forneceu uma idéia da trabalhabilidade da madeira. Valores altos informam, portanto, que a madeira é mais dificilmente trabalhada em comparação com outras que apresentaram valores mais baixos. As etapas desenvolvidas e pontuadas pelo arqueteiro foram: desdobro, aplainamento, curvatura, lixação e acabamento.

### **2.2. Usinagem das madeiras**

A ferramenta utilizada nesta etapa foi serra de fita. As pranchas, caibros e ripas adquiridas no comércio de São Paulo foram desdobradas em cerca de 80 varetas, como descrito no capítulo 1. Durante esse processo, o grau de dificuldade foi quantificado e comparado pelo arqueteiro com aquele apresentado pelo pau-brasil, já de seu conhecimento.



Figura 1. Desdobro das varetas. a. Corte de uma peça de *Diploptropis* spp. b. Algumas das varetas analisadas no estudo.

### 2.3. Aplainamento

Após o desdobro e seleção das varetas realizada com base na densidade e velocidade de propagação do som, conforme descrito nos capítulos 1 e 2, as varetas foram aplainadas para obtenção de suas formas e dimensões finais. O aplainamento é feito em diversas etapas da fabricação das varetas, sejam elas de forma oitavada ou cilíndrica; no entanto, o trabalho mais intenso é realizado no início do processo, uma vez que da vareta bruta com cerca de 750 x 15 x 15 mm (figura 1b) se retira grande quantidade de material para se atingir as dimensões definitivas da vareta final. As ferramentas utilizadas nesse processo foram: plaina, gabarito de diâmetro, régua, morsa, raspadeira e formão.



Figura 2. Etapa de aplainamento. a. Plaina e gabaritos. b. Vareta sendo aplainada. Fotos de Erika Amano.

## 2.4. Encurvamento com lamparina

Essa etapa foi realizada com auxílio de lamparina, abastecida com álcool e um apoio confeccionado em madeira e preso a uma mesa. As varetas foram aquecidas a cada 2 centímetros de distância e forçadas contra o apoio para a obtenção da curvatura desejada.



Figura 3. Encurvamento das varetas. a. Aquecimento da vareta com lamparina. b. Vareta sendo curvado sobre apoio para obtenção da curvatura. Fotos de Erika Amano.

## 2.5. Lixamento

Da mesma forma que o aplainamento, as varetas foram lixadas em várias etapas do processo de fabricação. Utilizaram-se lixas com grana de números diferentes para promover o acabamento final das varetas. Para facilitar esse processo, as varetas foram presas em morsas e posicionadas sobre suportes, de forma a possibilitar o lixamento uniforme em toda a sua extensão.



Figura 4. Lixamento das varetas. a. Procedimento executado na parte superior da vareta. b. Procedimento executado na lateral da vareta. Fotos de Erika Amano.

## 2.6. Avaliação das propriedades organolépticas

A determinação das propriedades organolépticas das madeiras foi realizada por meio de análise visual, tátil e olfativa e, pela comparação com resultados mencionados na literatura (Mainieri *et al.* 1983; Brunelli *et al.* 1997; Zenid 2009).

## 2.7. Avaliação da disponibilidade comercial das madeiras estudadas

Atualmente, a grande oferta de madeira disponível no comércio é originária da Floresta Amazônica (Zenid 2009), o que põe em risco a conservação desse bioma. Assim, para evitar os mesmos erros cometidos no passado com a retirada predatória de madeiras muito conhecidas e procuradas como *C. echinata* na Mata Atlântica, *Araucaria angustifolia* e canelas na Floresta Mista presente na região Sul, e *Aspidosperma polyneuron* na Floresta Estacional Semidecidual, da região sudeste, o consumo de madeira deve ser consciente, ou seja, a madeira deve ser adquirida apenas de empresas que possam comprovar sua origem por meio de plano de manejo aprovado pelo IBAMA, com apresentação da nota fiscal e documento de origem florestal - DOF (Zenid 2009). Essa mesma preocupação deve ser adotada para madeiras de todos os biomas brasileiros.

Com base nisso, foram visitadas 10 madeireiras na cidade de São Paulo e 20 em outras cidades do estado de São Paulo, totalizando 30 fornecedores. Informações sobre as mesmas e sobre a disponibilidade das madeiras estudadas em cada local estão indicadas na tabela 3. Durante as visitas, a identificação das espécies/gêneros foi confirmada por meio de observação com lupa conta-fio (10 aumentos), consulta da literatura (Mainieri *et al.* 1983 e Mainieri & Chimelo 1989), além de comparação com amostras-padrão do acervo da Xiloteca do Instituto Florestal (SPSFw).

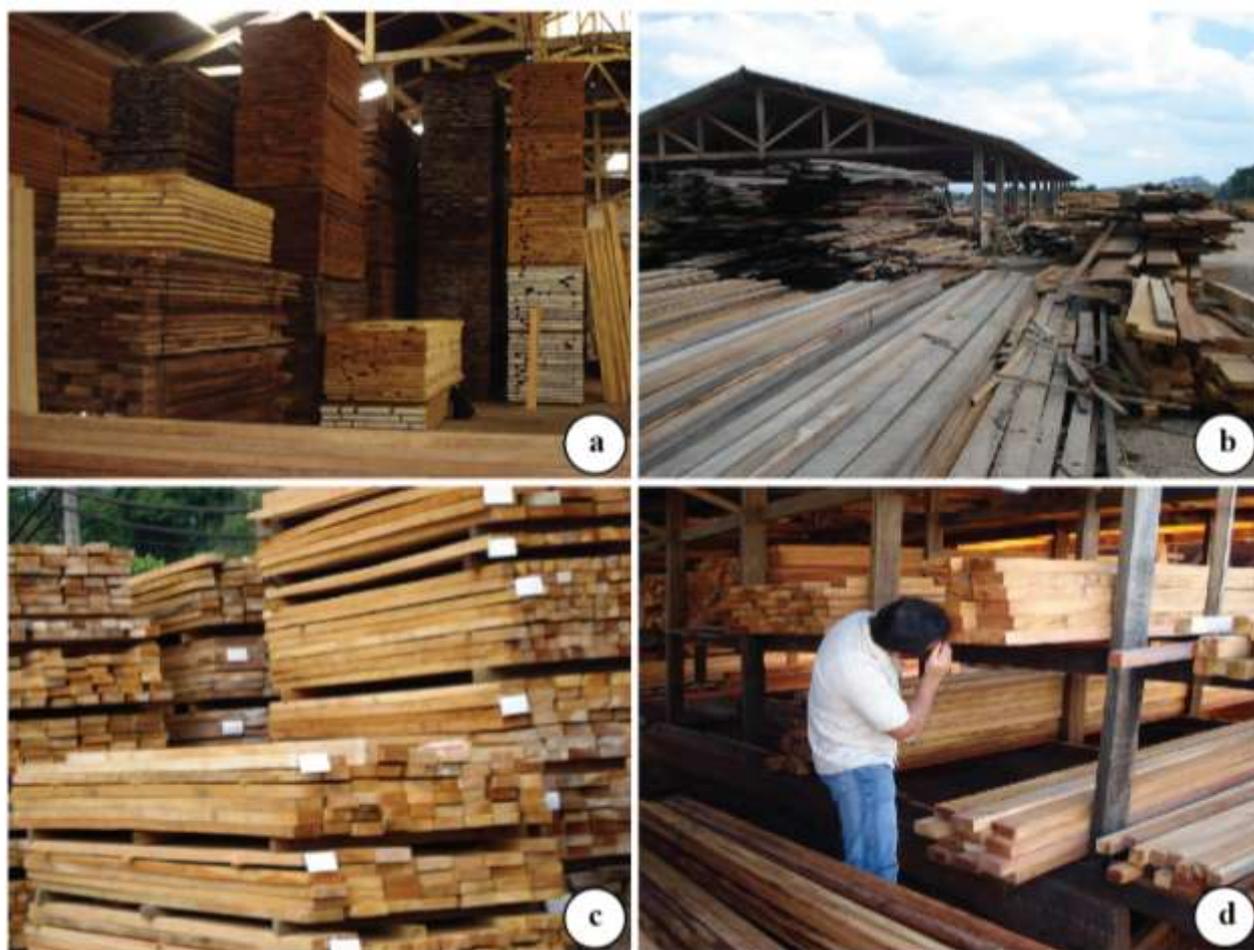


Figura 5. Avaliação da ocorrência das madeiras estudadas em madeireiras. a-c. Aspecto do pátio de algumas madeireiras visitadas. d. Observação das madeiras com lupa conta-fio (10 aumentos) para a determinação das espécies/gêneros. Fotos de Alaor Bufolo.

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1. Avaliação da trabalhabilidade das madeiras potenciais para arco

De uma maneira geral, as seis madeiras avaliadas neste trabalho apresentaram melhor trabalhabilidade, ou seja, foram mais facilmente usinadas, aplainadas e lixadas do que *C. echinata* (tabela 1), embora o acabamento final tenha sido melhor nesta última.

Quanto à usinagem, as madeiras de *M. itauba* e *A. lecointei* foram as mais fáceis de serem trabalhadas (grau um). Embora Zenid (2009) mencione que a presença de sílica na madeira de *M. itauba* possa dificultar seu corte, isso não foi constatado no presente estudo. As madeiras de *Handroanthus* spp., *Dipteryx* spp., *Diploptropis* spp. e *Hymenaea* spp. apresentaram o mesmo grau de dificuldade de usinagem (grau dois), que foi menor que o de *C. echinata* (grau três), lembrando que, quanto maior esse valor, mais difícil é trabalhar com a madeira.

O grau de dificuldade da usinagem é influenciado por vários fatores, dentre eles a grã, a homogeneidade da madeira, sua composição celular, densidade, entre outros. Uma possível explicação para o fato de *C. echinata* ser de difícil usinagem é que essa madeira pode apresentar grã reversa e nós. Matsunaga *et al.* (1996) constataram nessa madeira a presença de grande quantidade de nós e outros defeitos, como a distorção da grã. Os autores informam que esses defeitos causam um baixo rendimento quando se buscam varetas de qualidade para arco. Daniel Lombardi (comunicação pessoal) corrobora o baixo rendimento de *C. echinata*, acrescentando que, embora, de uma maneira geral, haja grande perda de material no processo de fabricação do arco quando se empregam diferentes madeiras, com *C. echinata*, devido aos seus defeitos, a perda pode chegar a 90%, considerando desde o corte da prancha até as dimensões finais das varetas.

Grã reversa e defeitos na madeira dificultam a usinagem, uma vez que provocam mudanças na direção da serra, que necessita de alinhamento constante. Segundo Kivimaa (1952) *apud* Lucas Filho (2004), a direção das fibras deve ser considerada ao se cortar a madeira e quanto mais próximo da transversalidade dessas células, maior a dificuldade.

A maior facilidade de Usinagem de *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp., em comparação com *C. echinata*, pode ser explicada pelo fato dessas madeiras serem mais homogêneas, seja, apresentarem pequena variação nas propriedades e apresentarem menos defeitos do que *C. echinata*. Além disso, de acordo com Longui (2005), *C. echinata* apresenta maior porcentagem de fibras e vasos com diâmetros menores que os de *Handroanthus* spp., o que pode dificultar o desdobro, considerando que as fibras promovem maior resistência ao corte.

As fibras não estão relacionadas apenas com o grau de dificuldade ao corte, mas também com a qualidade do produto resultante, ou seja, o aspecto da peça após a usinagem da

madeira. Silva *et al.* (2005) encontraram correlações entre as dimensões das fibras e a trabalhabilidade em madeira de *Eucalyptus grandis*. Os autores mencionam que madeiras com fibras de paredes mais espessas apresentam melhores resultados, pois as mesmas não são amassadas ou cortadas apenas parcialmente. Nas madeiras aqui estudadas e em *C. echinata*, mesmo havendo grandes diferenças na espessura das fibras (capítulo 1 tabela 2 e Alves *et al.* 2008a, respectivamente) todas as madeiras apresentam fibras de parede espessa a muito espessa (IAWA Committee 1989), o que favorece a qualidade do corte.

A densidade é outro fator que pode explicar a menor dificuldade na usinagem das madeiras de *Handroanthus* spp., *M. itauba* e *A. lecointei*, uma vez que nelas, a densidade foi comparativamente menor (valores apresentados nos capítulos 1 e 2), que a de *C. echinata* estudada por Alves *et al.* (2008a). Néri *et al.* (2000) mencionam que a força exigida para o corte aumenta conforme aumenta a densidade da madeira.

Ao contrário da usinagem, que variou entre os graus de dificuldade, um a três, as madeiras estudadas variaram mais em relação ao aplainamento, o que mostra que há muitos fatores que influenciam esse processo. *M. itauba* e *A. lecointei* apresentaram grau um, ou seja, são aplainadas facilmente; *Handroanthus* spp. apresentou grau dois, *Hymenaea* spp. grau três, enquanto *Dipteryx* spp. e *Diplotropis* spp. apresentaram grau quatro, ou seja, entre as madeiras estudadas, são as mais difíceis de serem aplainadas. Contudo, usando os mesmos critérios, *C. echinata* apresentou grau cinco, o que é explicado pela presença de grã reversa e de nós nessa madeira. A análise visual de todas as madeiras mostrou que *Dipteryx* spp. e *Diplotropis* spp. possuem grã de irregular a reversa (tabela 2). Brunelli *et al.* (1997) e Zenid (2009) confirmam que a madeira de *Diplotropis* apresenta grã reversa e é de difícil aplainamento.

Segundo Gonçalves (2000), quando a madeira é reversa apresentando fibras oblíquas em relação à superfície do corte, ao ser aplainada, os cavacos podem quebrar por cisalhamento, ocasionando um defeito de trabalhabilidade denominado de fibras lascadas. Segundo o autor, o acabamento em peças longas é bastante difícil, visto que as fibras em muitas madeiras apresentam orientação aleatória ao longo do tronco. Assim, as varetas para arcos de violino com cerca de 75 cm de comprimento, podem apresentar muitos desvios em suas fibras. Mesmo em *C. echinata*, o modelo de madeiras para arco, se observa uma grande variação na grã, ocorrendo varetas com grã direita e outras com grã reversa, sendo que nas primeiras o aplainamento é melhor (Daniel Lombardi, comunicação pessoal).

Além da orientação das fibras, seu comprimento também influencia na qualidade do acabamento, uma vez que fibras mais longas são mais dificilmente arrancadas quando a madeira é aplainada, evitando a formação de orifícios ou levantamento de fibras (Silva *et al.*

2005). Alves *et al.* (2008a) descrevem para a madeira de *C. echinata* de ótima qualidade para arcos, fibras de comprimentos menores (1158,70  $\mu\text{m}$ ) do que os observados nas seis madeiras aqui estudadas, sendo que o valor mais próximo ocorreu em *Handroanthus* spp. (capítulo 1, tabela 2). No entanto, além do comprimento, e talvez mais importante, seja a dimensão da superfície de contato entre as fibras no sentido longitudinal; estima-se que quanto maior for a região de contato entre as fibras, a possibilidade de ocorrência de arrancamentos ou fibras levantadas é menor.

As dimensões e frequência de vasos e raios também são importantes na determinação da trabalhabilidade das madeiras. Em varetas de *Dipteryx* spp. oriundas de amostras diferentes, ou seja, de árvores distintas, observou-se que aquelas com vasos de menor diâmetro apresentaram melhor resultado, confirmando a afirmação de Alves *et al.* (2008a) que madeiras com textura fina, ou seja, menor proporção e diâmetro de vasos, raios mais homogêneos com menores dimensões, além de fibras com paredes mais espessas, são mais adequadas para varetas de alta qualidade.

Segundo Hoadley (2000), os raios representam locais de maior fragilidade na madeira, além de dificultar a obtenção de uma superfície lisa, já que sua orientação raramente coincide com a superfície trabalhada, portanto madeiras com raios mais frequentes e altos apresentariam maior dificuldade quanto ao aplainamento.

Brunelli *et al.* (1997) e Zenid (2009) mencionam que a madeira de *Hymenaea* spp. é de fácil aplainamento. No presente estudo esta madeira apresentou grau de dificuldade três, mesmo possuindo grã reta. Tal dificuldade pode ser decorrente das dimensões das varetas e do grande diâmetro dos vasos e dimensões dos raios (capítulo 1, tabela 2). Além disso, *Hymenaea* spp. apresenta parênquima axial paratraqueal aliforme com confluências e parênquima marginal (figura 8b), características que podem comprometer o aplainamento da madeira. Variações na abundância de parênquima axial, dimensões e frequência de vasos, além do aspecto estético, podem enfraquecer determinadas regiões da madeira, que ficam mais suscetíveis a quebras.

O aspecto final das varetas não é influenciado apenas pelas dimensões dos vasos, maiores em *Hymenaea* spp. e *Diploptropis* spp. (capítulo 1, tabela 2), o parênquima axial mais abundante em *Dipteryx* spp. e *Diploptropis* spp. (figuras 8d e 8e) também se mostrou importante nesta etapa. As células parenquimáticas, por serem mais frágeis que as fibras e vasos, são fragmentadas ou arrancadas durante o aplainamento, da mesma forma que os raios, dificultando a obtenção de superfícies lisas, o que pode justificar o grau de dificuldade quatro estabelecido para essas duas madeiras.

A maior ou menor facilidade para se obter um bom resultado depende, portanto, de uma série de características como a presença de sílica e outros minerais abrasivos, o teor de resina, a orientação da grã, a presença de nós, além das dimensões e frequência dos constituintes celulares da madeira. Como se viu para o desdobro, a densidade também influencia no aplainamento, que é mais fácil em madeiras mais densas (Panshin & De Zeeuw 1964, Kollmann & Côté 1968, Silva 2002, Lucas Filho 2004). Como no presente estudo as madeiras estão dentro da mesma faixa de densidade, ou seja, muito pesadas (Mainieri *et al* 1983), considera-se que as diferenças observadas são devidas a variabilidade da estrutura anatômica. Comparando-se as madeiras aqui estudadas com varetas de *C. echinata* de ótima qualidade estudadas por Alves *et al* (2008a), percebe-se que as primeiras apresentaram uma combinação de vasos, raios e fibras com maiores dimensões, sendo que os valores obtidos para *Handroanthus* spp. foram os que mais se aproximaram do modelo (figuras 7a e 8a).

Na sequência do processo de fabricação dos arcos, o arqueteiro realizou o encurvamento das varetas por meio de aquecimento. *Diploptropis* spp. apresentou grau de dificuldade três e foi a que mais se aproximou de *C. echinata*, a mais difícil (grau cinco). *Hymenaea* spp. e *Dipterix* spp. foram mais fáceis (grau um), enquanto que *Handroanthus* spp., *M. itauba* e *A. lecointei* apresentaram grau dois. Matsunaga & Minato (1998) testaram o encurvamento em *C. echinata* e também em outras três espécies: *Manilkara bidentata*, *Dialium* sp. e *Swartzia fistuloides*. Os autores mediram o encurvamento após as madeiras terem sido curvadas com auxílio de placas de aço a temperaturas de 280°C e resfriadas; após duas semanas, o encurvamento foi novamente mensurado. Segundo os autores, a madeira de *C. echinata* foi a que apresentou o menor encurvamento, embora com ligeira diferença em relação às outras três madeiras analisadas, mas foi a que manteve melhor esse encurvamento após o tempo do ensaio.

De acordo com Daniel Lombardi (comunicação pessoal), dentre as madeiras aqui estudadas, *Handroanthus* spp. foi a única empregada por ele na fabricação de arcos já comercializados. Segundo o arqueteiro, essa madeira mantém o encurvamento de forma semelhante à *C. echinata*, porém é mais fácil na realização de tal processo.

Como já mencionado, para se realizar o encurvamento da vareta, a mesma deve ser aquecida. O objetivo desse aquecimento é amolecer a madeira em determinadas regiões, o que permite dar a curvatura desejada. Segundo Guimarães Júnior (2008), o amolecimento da madeira é atribuído a mudanças físicas na lignina e outras substâncias da madeira, sendo que o aquecimento melhora as condições de laminação, principalmente em madeiras duras. É possível que o teor dessas substâncias na madeira influencie no grau de dificuldade de realização do encurvamento.

Investigando o amolecimento de madeiras por meio do aquecimento, Matsunaga *et al.* (1996) e Matsunaga & Minato (1998) mencionaram que as madeiras de *C. echinata* e *Swartzia fistuloides*, com maior teor de extrativos do que as de *Manilkara bidentata* e *Dialium* sp. atingiram o mesmo grau de amolecimento com menor temperatura. Segundo os autores, os resultados sugerem que o teor de extrativos influencia na temperatura na qual a madeira apresenta um amolecimento. Matsunaga *et al.* (1996) mencionam que quando as madeiras foram aquecidas a cerca de 200°C, houve diminuição nos valores do módulo de elasticidade dinâmico, e que este resultado seria devido ao amolecimento dos extrativos, o que restringiria a livre movimentação das ligações de celulose na parede das células.

No presente estudo, devido ao aquecimento, ocorreram quebras em algumas das varetas, o que se deve a reações que ocorrem em substâncias presentes nas paredes (celulose e lignina) e no lume das células (extrativos); as varetas têm sua rigidez alterada, principalmente nas regiões próximas aos trechos aquecidos, o que pode aumentar a possibilidade de quebra. De acordo com Daniel Lombardi (comunicação pessoal), o padrão de quebra é distinto entre as madeiras; nas varetas de *C. echinata* a extensão da ruptura é pequena e a vareta quebra por completo, ao passo que nas varetas de *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp. a rachadura estende-se a partir da região de origem, mas não há rompimento das partes. Quando essas quebras ocorrem, avaliam-se as varetas quanto à possibilidade de conserto, contudo, o arco dela resultante está depreciado. A quebra observada em *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp. se mostrou menos restritiva do que aquela que ocorre no pau-brasil.

Para o estabelecimento do grau de dificuldade do lixamento essa foi executada sempre no direção dos veios da madeira; cabe destacar que esta etapa tem grande influência no acabamento final da vareta. Dentre as madeiras estudadas, *C. echinata* e *Dipteryx* spp. foram as mais difíceis de serem lixadas (grau três), *Handroanthus* spp., *M. itauba* e *A. lecointei* receberam grau dois, nessa etapa a maior facilidade foi encontrada em *Hymenaea* spp. e *Diploptropis* spp. (grau um).

Contudo, de acordo com Daniel Lombardi, o acabamento das varetas foi considerado ótimo em *C. echinata* e *M. itauba* (grau um), as demais madeiras apresentaram grau dois. As seguintes observações foram feitas para as madeiras grau dois: em *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp. ocorreu um levantamento das fibras, o que acarreta em um acabamento de qualidade inferior. Como mencionado anteriormente para o aplainamento, as características anatômicas como comprimento e direção das fibras, dimensões de vasos e raios influenciam diretamente na qualidade do lixamento e, conseqüentemente, do acabamento da peça. Em *Hymenaea* spp., apesar da madeira possuir vasos de grande diâmetro, a frequência destas células foi menor do que a encontrada em *Diploptropis* spp., com vasos de diâmetro

semelhante (figuras 8b e 8e), o que conferiu à primeira acabamento satisfatório. As madeiras de *Dipteryx* spp., devido ao parênquima axial, e *Diplotropis* spp., devido às dimensões de suas células (figuras 8d e 8e), que conferem à madeira textura média a grossa, há maior dificuldade em se obter um ótimo acabamento, o que além de influenciar a beleza do arco, pode enfraquecer a vareta. Em *A. lecointei* não foram observadas grandes dificuldades nessa etapa, embora Slooten & Souza (1993) mencionem que a trabalhabilidade de *A. lecointei* é variável devido às listras mais escuras.

Segundo Costa (1996) o acabamento de uma superfície de madeira é resultado de uma combinação de atributos e características intrínsecas desse material com as condições das ferramentas que atuam sobre ela. Assim, as propriedades mecânicas como a compressão paralela às fibras e o cisalhamento são importantes na usinagem das madeiras, uma vez que no aplainamento, por exemplo, a região da madeira à frente da ferramenta está sendo forçada pela compressão paralela às fibras e pelo cisalhamento na ponta da ferramenta (Gonçalves 2000).

Os valores determinados em cada etapa foram somados para se estabelecer o grau de dificuldade com a qual a madeira é trabalhada. Observou-se que as madeiras que forneceram varetas de melhor qualidade, apresentaram maior dificuldade em serem trabalhadas (tabela 1 e figura 6).

Como descrito anteriormente, arcos fabricados pelo Sr. Daniel Lombardi com a madeira de *Handroanthus* spp., já foram comercializados e continuam sendo apresentados para os músicos. Recentemente, um arco fabricado com a madeira de *Dipteryx* spp. foi adquirido pelo músico profissional Fábio Bruculi, que classificou o arco como de boa qualidade e capaz de ser usado em suas apresentações.

Tabela 1. Avaliação da trabalhabilidade das madeiras estudadas em comparação com a madeira de *Caesalpinia echinata*. Os números de 1 a 5 indicam o grau de dificuldade para realização da etapa; números maiores indicam maior dificuldade. A avaliação foi realizada pelo arquiteto Daniel Lombardi.

Etapas	Madeiras estudadas						
	<i>Caesalpinia echinata</i>	<i>Handroanthus</i> spp.	<i>Hymenaea</i> spp.	<i>Mezilaurus itauba</i>	<i>Dipteryx</i> spp.	<i>Diploptropis</i> spp.	<i>Astronium lecointei</i>
Usinagem	3	2	2	1	2	2	1
Aplainamento	5	2	3	1	4	4	1
Encurvamento	5	2	1	2	1	3	2
Lixamento	3	2	1	2	3	1	2
Acabamento	1	2	2	1	2	2	2

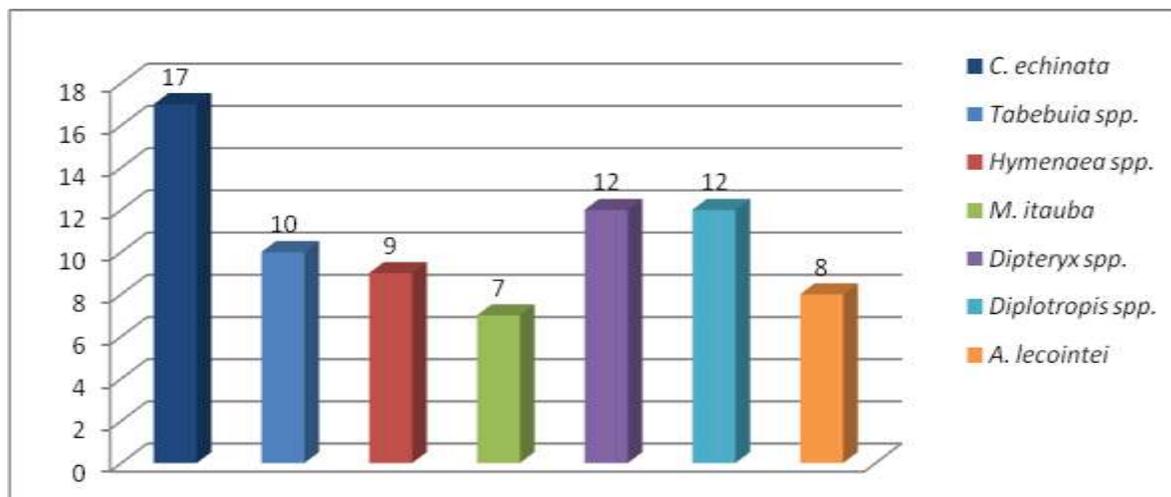


Figura 6. Somatória dos graus de dificuldade relativos à trabalhabilidade das madeiras estudadas.

### 3.2. Avaliação das propriedades organolépticas das madeiras potenciais para arco

A coloração avermelhado acastanhado do cerne de *C. echinata* é muito apreciada pelos músicos, que associam a cor vermelha da madeira à qualidade do arco. Diante disso, arcos de outras tonalidades são vistos por eles com certa desconfiança (Alves *et al.* 2008a,b). Portanto, a aceitação de cores diferentes representa uma das dificuldades para romper com o forte tradicionalismo dos tons avermelhados da madeira para arcos. Sem dúvida, além de suas outras propriedades altamente adequadas à fabricação dos arcos, a cor avermelhada da madeira de *C. echinata* também constitui um grande atrativo para arquiteiros e músicos. No entanto, a proposta de novas cores em tons mais claros e amarelados representa uma opção.

Dentre as madeiras aqui estudadas, a coloração do cerne de *Hymenaea* spp. é a que mais se aproxima daquela de *C. echinata*, com tons de vermelho acastanhado; *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp. apresentam cerne de coloração amarelada; *A. lecointei* apresenta tons de vermelho e veios mais escuros, que conferem beleza à madeira; *M. itauba* apresenta cerne amarelo esverdeado, quando recém cortado, que escurece para castanho esverdeado algum tempo após o corte; *Diploptropis* spp. apresenta cerne acastanhado. Associado às cores, soma-se o aspecto fibroso atenuado das madeiras de *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp. e aspecto fibroso acentuado de *Diploptropis* spp.

Em estudo anterior (Longui 2005) avaliou alguns parâmetros de amostras de *Handroanthus* spp. e verificou que a madeira fornece arcos de boa qualidade, que foram comercializados e tiveram boa aceitação (Daniel Lombardi, comunicação pessoal). Portanto a utilização de madeiras alternativas é viável desde que estas apresentem a qualidade necessária para a manufatura de arcos.

Além da cor, o cheiro é importante em madeiras para arco. Nas amostras de *C. echinata* o cheiro é indistinto, mas está presente nas madeiras de *M. itauba*, *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp., a primeira apresenta um odor agradável, as outras duas possuem um cheiro que assemelha-se à oliva; as demais não apresentam cheiro.

Um odor desagradável poderia ser restritivo ao uso da madeira para o arco, uma vez que o mesmo é manuseado próximo ao rosto, porém esse não é o caso de nenhuma das seis madeiras testadas.

Tabela 2. Avaliação das propriedades organolépticas das madeiras estudadas em comparação com a madeira de *Caesalpinia echinata*. A avaliação foi realizada em conjunto com o arquiteto Daniel Lombardi.

Propriedades Organolépticas	Madeiras estudadas						
	<i>Caesalpinia echinata</i>	<i>Handroanthus</i> spp.	<i>Hymenaea</i> spp.	<i>Mezilaurus itauba</i>	<i>Dipteryx</i> spp.	<i>Diploptropis</i> spp.	<i>Astronium lecointei</i>
Cor	Cerne alaranjado para avermelhado escuro	Cerne pardo acastanhado ou amarelado com reflexos mais escuros ou esverdeados aspecto fibroso atenuado	Cerne vermelho acastanhado	Cerne amarelo esverdeado, quando recém cortado, passando para castanho esverdeado escuro após um tempo	Cerne pardo acastanhado ou amarelado de aspecto fibroso atenuado.	Cerne acastanhado de aspecto fibroso acentuado	Cerne vermelho acastanhado com veios escuros e nuances dourados
Cheiro	Indistinto	Oliva	Indistinto	Agradável	Oliva	Indistinto	Indistinto
Brilho	Presente	Pouco	Pouco	Moderado	Pouco	Ausente ou irregular	Moderado
Textura	Fina a média	Média a grossa	Média a grossa	Fina a Média	Média a grossa	Grossa	Média
Grã	Direita a reversa	Direita	Direita	Ondulada a reversa	Irregular a reversa	Irregular a reversa	Direita



Figura 7. Madeira de *Caesalpinia echinata*. a. Fotomacrografia do plano transversal da madeira. b. Fotografia da superfície longitudinal tangencial dessa madeira. Comparar com as figuras 8 e 9, que mostram as respectivas imagens para as demais madeiras estudadas. Barra = 500 $\mu$ m

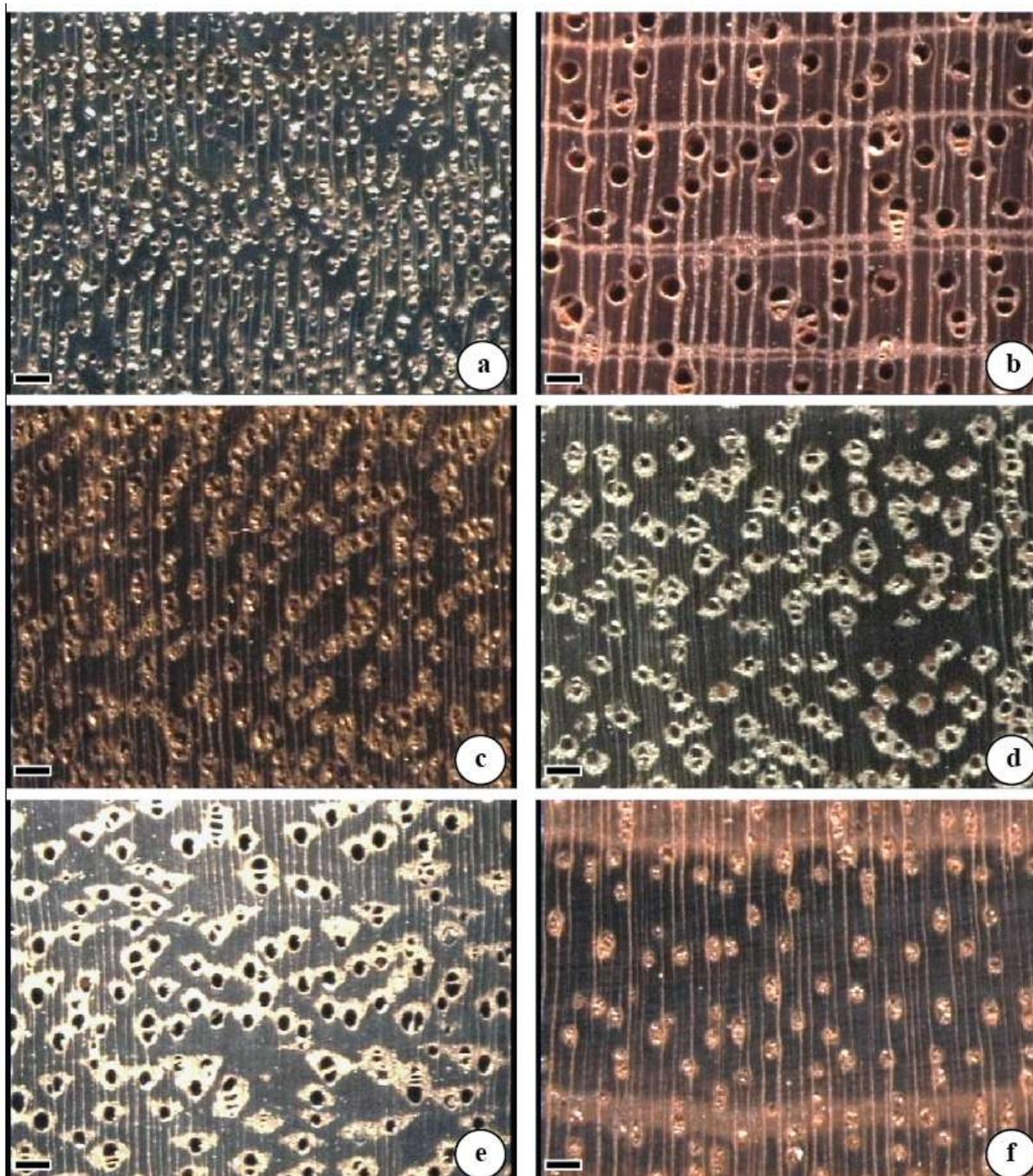


Figura 8. Fotomicrografias do plano transversal das madeiras estudadas. a. *Handroanthus* spp. b. *Hymenaea* spp. c. *Mezilaurus itauba* d. *Dipteryx* spp. e. *Diplotropis* spp. f. *Astronium lecointei*. Observar as diferenças no diâmetro dos vasos, maior abundância de parênquima axial (d,e) e a presença de parênquima marginal (b). Barra = 500 $\mu$ m

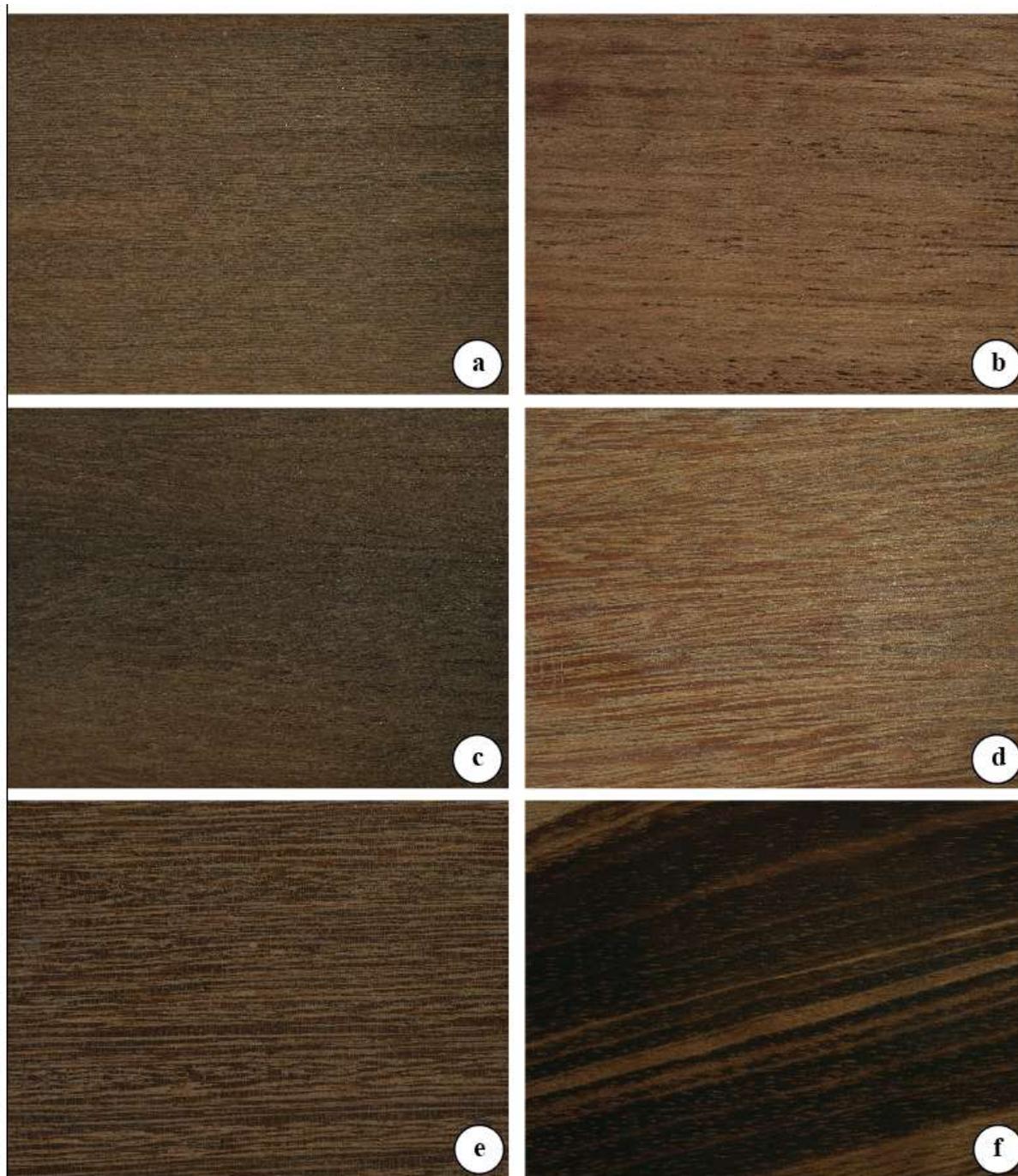


Figura 9. Fotografias mostrando superfícies longitudinais tangenciais das madeiras estudadas. Notar cor e textura nas madeiras e a qualidade da superfície lixada. a. *Handroanthus* spp. b. *Hymenaea* spp. c. *Mezilaurus itauba* d. *Dipteryx* spp. e. *Diplotropis* spp. f. *Astronium lecointei*.

### 3.3. Disponibilidade em madeiras

Com base nos resultados da pesquisa em 30 madeiras do estado de São Paulo, observou-se que *M. itauba* foi a mais frequente, ocorrendo em 60% dos locais visitados. A madeira de *Dipteryx* spp. foi encontrada em 46,66% dos locais, *Hymenaea* spp. em 43,33% e *Handroanthus* spp. em 36,66%. As menores ocorrências foram para *Diploptropis* spp. 20% e *A. lecointei* 13,33%.

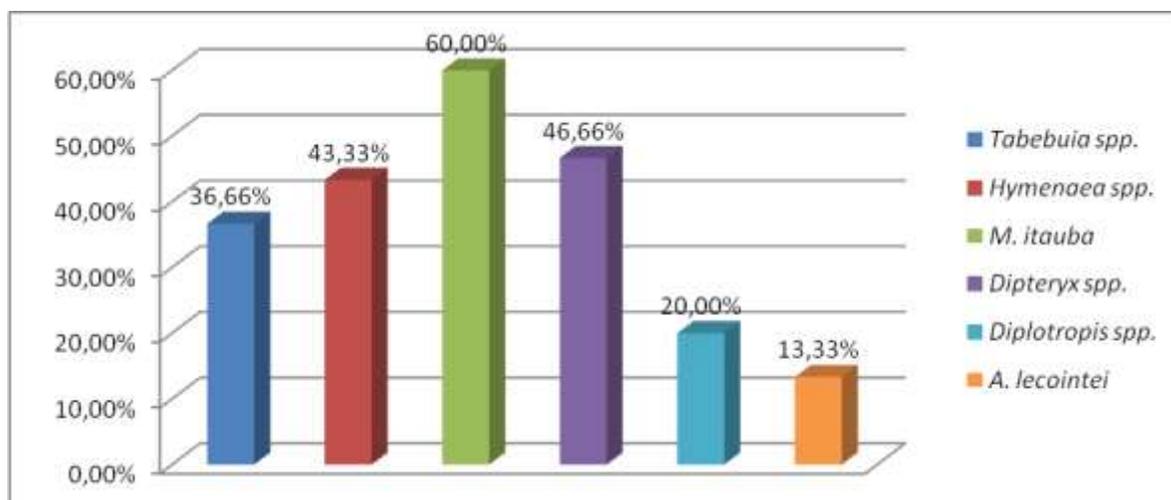


Figura 10. Disponibilidade das madeiras estudadas em 30 madeiras do estado de São Paulo.

Tabela 3. Informações sobre as madeiras visitadas e ocorrência das madeiras estudadas nas mesmas, indicadas por X.

	Madeira	Presença das madeiras estudadas					
		<i>Handroanthus</i> spp.	<i>Hymenaea</i> spp.	<i>Mezilaurus</i> <i>itauba</i>	<i>Dipterix</i> spp.	<i>Diploptropis</i> spp.	<i>Astronium</i> <i>lecointei</i>
1	Amarante Comercial Madeira Ltda. São Paulo.	X		X	X		
2	Madeira Felgueiras Indústria e Comércio de Tacos Ltda. São Paulo.	X			X		
3	Paco Madeira. São Paulo.		X				
4	Madeiras BR Ltda. São Paulo.	X	X	X			
5	Comercial de Madeiras Paulista Ltda. São Paulo.	X	X	X			X
6	Fênix Comércio de Madeiras e Ferragens Ltda. São Paulo.		X				
7	Qualimad Comércio de Madeira Ltda. São Paulo.	X	X	X		X	
8	Tapayuna Madeiras Ltda. São Paulo.			X			
9	Floresta Madeiras Ltda. São Paulo.						X
10	Madeira Mogno Ltda. Guarulhos						X
11	Valdemar Ferreira Rodrigues Junior- ME. Araçatuba.	X		X	X		
12	Mauricio F Rodrigues – ME. Araçatuba	X		X	X	X	
13	Cleusa Maria de Oliveira-ME. Marília		X	X			
14	Azoia e Rodrigues Ltda-ME. Marília						
15	H.H. Com. de Materiais de Construção Ltda-ME. Mogi das Cruzes		X	X			

16	Cedima Central Distribuidora de Madeiras. Guarujá.		X	X	X	
17	Madeira 3R. Guarujá.		X			
18	J. A. Trepicci-ME. Birigui.			X		
19	Madeira e Serraria Mato-Grosso. Birigui.		X	X	X	X
20	Comercial ZCT Ltda. São Paulo	X	X	X	X	X
21	Lucas R. Zanchet – EPP. São Paulo			X	X	
22	Madeira RD. Vargem Grande Paulista.				X	X
23	Madeira Giomar. Vargem Grande Paulista.		X	X	X	
24	Deotti indústria e comércio de móveis de madeira Ltda-ME. Vargem Grande Paulista.					
25	Dorival Matarolo Júnior-ME	X			X	
26	Madeira Castelo, Bauru.			X		
27	Madeira Floresta, Bauru.			X	X	
28	Araguaia madeiras Ltda. Campinas.	X	X			X
29	ADS Madeiras Ltda	X		X	X	X
30	Comércio e Artefatos de Madeira Ferrer e Miranda. São Lourenço da Serra				X	

#### 4. Conclusões

A madeira de *Caesalpinia echinata* apresentou maior dificuldade de ser trabalhada em comparação com as seis madeiras estudadas. No entanto, foi a que apresentou o melhor acabamento.

Apesar de existir um forte tradicionalismo em relação aos tons avermelhados na madeira para arcos, madeiras com tons amarelados como *Handroanthus spp.* e *Dipteryx spp.* ou acastanhados como *Diploptropis spp.*, desde que apresentem propriedades adequadas, podem aos poucos oferecer alternativas de cores e texturas aos músicos.

Dentre as madeiras estudadas, as que mostraram maior potencial para a fabricação dos arcos foram *Handroanthus spp.* e *Dipteryx spp.*, que podem ser usadas por músicos profissionais; as madeiras de *Hymenaea spp.* e *Diploptropis spp.* se mostraram promissoras e podem proporcionar uma opção de mercado para músicos amadores e iniciantes.

Quanto à disponibilidade, as quatro madeiras que se mostraram mais promissoras são relativamente fáceis de serem encontradas atualmente no comércio madeireiro, o que viabiliza sua utilização na fabricação dos arcos.

## Discussão geral

Aparentemente, a melhor estratégia para iniciar o processo de seleção de madeiras alternativas para a fabricação de arcos para instrumentos de corda é a escolha daquelas cujas propriedades mais se assemelham ao pau-brasil (*Caesalpinia echinata*), a madeira modelo que é empregada com muito sucesso há cerca de duzentos anos. Contudo, dentre as inúmeras características e propriedades das madeiras qual será a mais importante? Deve-se iniciar a seleção com base na estrutura anatômica? Ou a seleção deve ser baseada nas propriedades físicas, como a densidade? Nas propriedades mecânicas, como a rigidez, que atua na manutenção da curvatura do arco? Ou em parâmetros químicos, como os teores de extrativos, lignina ou hemicelulose? Ou, ainda, na trabalhabilidade das madeiras alternativas?

No presente estudo, iniciou-se a seleção de madeiras alternativas com base numa propriedade física, de determinação relativamente fácil e rápida, a densidade, uma vez que Longui (2005) e Alves *et al.* (2008a) mostraram que madeiras com qualidade para a arquetaria apresentaram densidade aparente superior à  $950 \text{ kg m}^{-3}$ .

Os resultados apresentados no capítulo 1, tabela 3, indicam que, entre as madeiras analisadas, *M. itauba* e *A. lecointei* apresentaram densidade abaixo do valor desejado ( $860$  e  $940 \text{ kg m}^{-3}$ , respectivamente). No entanto, se apenas a densidade fosse considerada, *Handroanthus* spp., com densidade abaixo desse valor (capítulo 2 - tabelas 1, 2 e 3) também não teria potencial para a arquetaria, o que não é verdadeiro, uma vez essa madeira apresentou velocidade de propagação do som acima de  $5200 \text{ m s}^{-1}$  (capítulo 2, tabela 1). Segundo Matsunaga *et al.* (1996), Longui (2005) e Alves *et al.* (2008a), embora o arco não produza som, as propriedades acústicas, dentre elas a velocidade de propagação do som, podem ser utilizadas como parâmetro para selecionar madeiras para arco e valores acima de  $5000 \text{ m s}^{-1}$  indicam alto potencial.

Alguns autores informam a importância da rigidez, uma propriedade mecânica, na seleção de madeiras para os arcos (Lucchi 1986, Follmann 1995, Matsunaga *et al.* 1996; Longui 2005, Alves *et al.* 2008a; Schimleck *et al.* 2009). A forma mais tradicional de se obter a rigidez da madeira é por meio de ensaios destrutivos, no entanto, para a produção dos arcos esse método é inviável. No entanto, métodos não destrutivos vêm sendo cada vez mais utilizados para estimar a rigidez da madeira, sendo que a eficiência do uso do ultra-som tem sido comprovada (Gonzalez *et al.* 2001; Oliveira 2001; Tsehaye *et al.* 2002; Miná *et al.* 2004). Madeiras com módulo de elasticidade acima de  $20000 \text{ MPa}$  são mais indicadas para a fabricação dos arcos de instrumentos de corda.

Além destas, outras propriedades mecânicas como a resistência à ruptura, ao cisalhamento e à compressão paralela às fibras, e ainda outra propriedade física, a retração volumétrica, também devem ser consideradas. No caso das propriedades mecânicas, a vareta do arco é exigida por todas essas forças, em menor ou maior grau, sempre que tensionada para o ajuste das crinas. Valores altos dessas propriedades são esperados em material de qualidade. Dentre as madeiras estudadas os maiores valores para essas propriedades foram encontrados em: *Hymenaea* spp. (188 MPa) para a resistência a ruptura; novamente *Hymenaea* spp. (75,1 MPa) para o cisalhamento e *Dipteryx* spp. (267,8 MPa) para a compressão paralela às fibras. Com relação à retração volumétrica, valores baixos são desejados, o que garantirá maior estabilidade dimensional e evitará o desenvolvimento de micro rachaduras em função da troca constante de umidade com o ambiente, o que pode provocar rompimento quando o arco receber alguma força de tração. Para essa propriedade, a madeira de *Hymenaea* spp. foi a que apresentou o menor valor (9,88%). Com base nestes parâmetros, as madeiras de *Hymenaea* spp. e *Dipteryx* spp. são propostas como madeiras alternativas para a fabricação dos arcos.

Quanto à trabalhabilidade, constatou-se que *C. echinata* foi a madeira que apresentou a maior dificuldade em ser trabalhada. Esse resultado pode ser explicado pela presença de grã reversa e nós, o que indica heterogeneidade da madeira. Com base nisso pode-se especular se essa heterogeneidade não seria desejada, contudo *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp., madeiras mais homogêneas e com melhor trabalhabilidade que *C. echinata*, originaram arcos de boa qualidade, comprova por músicos profissionais (Daniel Lombardi, comunicação pessoal).

Para os constituintes da parede celular, os resultados sugerem que altos teores de holocelulose contribuem para os valores mais altos das propriedades mecânicas, como a rigidez e a resistência a ruptura. O maior teor de holocelulose foi notado em *Diplotropis* spp. (62,95%). Além disso, em algumas madeiras, notou-se a contribuição dos extrativos para o aumento da densidade; contudo, em *C. echinata*, madeira com maior teor de extrativos (20,14%) e (17,92%) respectivamente para as categorias estudante e top, essa correlação não foi significativa.

Entre as características anatômicas, as dimensões e frequência, além do arranjo das diferentes células, implicam em variações nas propriedades, que podem favorecer ou influenciar negativamente a qualidade das varetas dos arcos. Em síntese, as características anatômicas associadas a varetas de melhor qualidade são:

Fibras com paredes espessas e em grande proporção contribuem para aumentar as propriedades físicas, mecânicas e a velocidade de propagação do som (Shimoyama 1990; Fujiwara *et al.* 1991, Denne & Hale 1999; Butterfield *et al.* 1993; Bucur *et al.* 2002; Huang *et al.* 2003; Longui 2005; Quilhó *et al.* 2006).

O parênquima axial também parece influenciar o desempenho acústico das madeiras, sendo que os melhores resultados foram notados em madeiras que possuem parênquima axial paratraqueal, o que está de acordo com Brancheriau *et al.* (2006a e b) e Pourtahmasi & Golpayegani (2009).

Os raios são outra característica anatômica a ser considerada, uma vez que raios curtos, homogêneos e em baixa frequência permitem maior velocidade de propagação do som (Brancheriau *et al.* 2006a, b).

Quanto aos vasos, os resultados sugerem que sua frequência tem influência maior do que seu diâmetro na propagação do som, uma vez que *Handroanthus* spp. mostrou velocidade de propagação do som menor do que aquelas encontradas em madeiras com vasos de maior diâmetro, mas em menor frequência como *Hymenaea* spp.

Como mostrado, existe uma grande variedade de características capazes de qualificar ou desqualificar amostras de madeiras para os arcos. Sob esse enfoque, determinar correlações diretas entre as diferentes propriedades nem sempre é possível, uma vez que há muitos fatores que atuam em conjunto. Em *C. echinata* há uma combinação única de características anatômicas e químicas e, conseqüentemente, das propriedades físicas, mecânicas e acústicas, que fazem com que esta madeira possibilite a confecção de arcos com alta qualidade. No entanto, quando se consideram as dimensões iniciais e finais das peças de madeira de *C. echinata*, conclui-se que são pequenas as porções que vão realmente fornecer arcos de ótima qualidade.

Dessa forma, quando se questiona qual é a característica ou propriedade da madeira que vai qualificá-la para a produção de arcos, conclui-se que não há uma, mas sim um conjunto delas. Portanto para a seleção de madeiras alternativas deve-se avaliar esse conjunto, que compreende características anatômicas, propriedades físicas, mecânicas, químicas e acústicas. Reforça-se a afirmação de que uma análise isolada das características levará a conclusões errôneas.

Para a seleção de madeiras alternativas, deve-se também considerar a disponibilidade de mercado das mesmas e de que forma são produzidas, ou seja, devem ser retiradas de forma sustentada de nossas florestas, oriundas de plano de manejo ou reflorestamento, com apresentação da nota fiscal e documento de origem florestal –

DOF, isso evitará a exploração predatória que se quer impedir para não repetir o que já ocorreu com o pau-brasil.

Na prática, uma espécie de madeira será adequada para arcos de instrumentos de corda, quando ela permitir ao arqueteiro confeccionar um arco com massa, rigidez, curvatura e equilíbrio ideais e, principalmente, quando esse arco permitir ao o músico produzir música de qualidade.

### **Conclusão geral**

Dentre as seis madeiras analisadas no presente estudo, *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp. foram as que mostraram maior potencial como madeiras alternativas à *Caesalpinia echinata*, sendo que arcos dessas duas madeiras foram adquiridos por músicos profissionais que confirmaram sua qualidade. As madeiras de *Hymenaea* spp. e *Diplotropis* spp. também se mostraram promissoras e podem fornecer arcos de boa qualidade, embora, até o momento, não tenham sido testados por músicos. *Mezilaurus itauba* e *Astronium lecointei* não apresentaram o potencial necessário para serem utilizadas na produção de arcos.

**Referências bibliográficas**

- Alves, E.S.; Longui, E.L.; Amano, E.** 2008a. Pernambuco wood (*Caesalpinia echinata*) used in the manufacture of bows for string instruments. *IAWA Journal* 29: 323--335.
- Alves, E.S.; Angyalossy, V.; Longui, E.L.; Lombardi, D.R.; Amano, E.; Vargas, A.** 2008b. O arco: arte e ciência. *In*: R.C.L.F. Ribeiro, C.J. Barbedo, E.S. Alves, M. Domingos & M.R. Braga (orgs.). *Pau-brasil, da semente à madeira conhecer para conservar*. Instituto de Botânica, São Paulo, pp.146--157.
- Angyalossy, V., Amano, E.; Alves, E.S.** 2005. Madeiras utilizadas na fabricação de arcos para instrumentos de corda: aspectos anatômicos. *Acta Botanica Brasilica* 19: 819--834.
- Araújo, H.J.B.** 2000. Agrupamento das espécies madeireiras ocorrentes em pequenas áreas sob manejo florestal do produto de colonização Pedro Peixoto (AC) por similaridade das propriedades físicas e mecânicas. Dissertação de mestrado em Recursos Florestais. Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Araújo, H.J.B.** 2007. Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras. *Floresta, Curitiba, PR*, 37 (3): 399--416.
- Askenfelt, A.** 1992. Observations on the dynamic properties of violin bows. *STL-QPSR* 36: 23-42.
- Askenfelt, A.** 1995. Observations on the violin bow and the interaction with the string *STL-QPSR* 4: 43-49.
- Askenfelt, A.** 2002. Vital statistics. *The Strad* 8: 822--827.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas.** 1997. Projeto de estruturas de madeira: projeto NBR 7190/1997. Rio de Janeiro, 107p.
- Baines, A.** 1961. *Musical Instruments Through the Ages*. Galpin Society Faber and Faber, London, Pengkin Books.
- Bergander, A. & L. Salmén.** 2002. Cell wall properties and their effects on the mechanical properties of fibers. *Journal Material Science* 37: 151--156.
- Berlyn, G.P. & J.P. Miksche.** 1976. *Botanical microtechnique and cytochemistry*. The Iowa University Press, Iowa.
- Bowyer, J.L.; Shmulsky, R.; Haygreen, J.G.** 2003. *Forest Products and Wood Science. An Introduction*. Blackwell Publishing, New York.

- Brancheriau, L.; Baillères, H.; Détienne, P.; Gril, J.; Kronland, R.** 2006a. Key signal and wood anatomy parameters related to the acoustic quality of wood for xylophone-type percussion instruments, *Journal of Wood Science*, 52: 270-273.
- Brancheriau, L.; Baillères, H.; Détienne, P.; Kronland, R.; Metzger.** 2006b. Classifying xylophone bar materials by perceptual, signal processing and wood anatomy analysis. *Annals of Forest Science* 63:73–81.
- Brito, J.O.; Barrichelo, L.E.G.** 1983. Química da madeira.. ESALQ/USP, Piracicaba.
- Brunelli, A.A.; Leal, J.J.; Longo, F.G.; (coords.).** 1997. Madeiras: material para o design. SCTDE, São Paulo, 73 p.
- Bucur, V.** 1988. Wood structure anisotropy estimated by acoustic invariants. *IAWA Bulletin, Leiden* 9: 67-74.
- Bucur, V.** 1995. Acoustics of wood. CRC Press. Boca Raton.
- Bucur, V., P. Lancelleur & B. Roge.** 2002. Acoustic properties of wood in tridimensional representation of slowness surfaces. *Ultrasonics* 40: 537--541.
- Bueno, E.** 2002. Pau-Brasil. Axis Mundi, São Paulo.
- Burguer, L. M. & Richter, H. G.** 1991. Anatomia da Madeira. Livraria Nobel S.A. São Paulo.
- Butterfield, R.P. Crook, R.P. Adams, R.; Mol'ris, R.** 1993. Radial variation in wood specific gravity, fibre length and vessel area for two central American hardwoods: *Hyeronima alchorneoides* and *Vochysia guatemalensis*: natural and plantation grown trees. *Iawa Journal, Leiden*, 14 (2): 153-161.
- Calegari, L.; Stangerlin, D.M.; Santini, E.J.; Haselein, C.R.; Longhi, S.J.; Carmo, P.I.O.; Silva Filho, L.C.P.; Gatto, D.A.** 2007. Monitoramento do teor de umidade de madeiras de *Pinus elliottii* Engelm. e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, sob diferentes temperaturas de secagem, através do ultra-som. *Ciência Florestal, Santa Maria* 17: 399-408.
- Carpita, N. & Mccann, M.** 2000. The Cell Wall. *In Biochemistry & Molecular Biology of Plants*. B. B. Buchanan, W. Gruissem, R. L. Jones (eds). American Society of Plant Physiologists, Rockville, Maryland, p. 52--109.
- Carrasco, E.V.M.; Azevedo Júnior, A.P.** 2003. Avaliação não-destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som - fundamentos físicos e resultados experimentais. *Cerne* 9: 178-191.

- Castro, F.; Williamson, G.B.; Jesus, R.M.** 1993. Radial Variation in the Wood Specific Gravity of *Joannesia princeps*: The Roles of Age and Diameter. *Biotropica* 25: 176-182.
- Carvalho, R.M.; Kubota, L.T.; Rohwe, J.J.** 1999. Fibras de carbono: aplicações em eletroanalítica como material eletrodico. *Química Nova* 22: 591-599.
- Carvalho, P.E.R.** Espécies Arbóreas Brasileiras. 2003. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo, PR: Embrapa Florestas.
- Cavalcante, M, S.** 1986. Histórico geral da preservação de madeiras. *In*: E.S. Lapage (coord.). Manual de Preservação de Madeiras, vol.1. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A – IPT, São Paulo, 9-20 pp.
- Codabow.** 2009. <http://www.codabow.com/index.html> (acesso em 10.06.2009).
- Costa, E. M.** 1996. A madeira de eucalipto na indústria moveleira. *In*: Seminário sobre processamento e utilização da madeira de reflorestamento. Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABPM/SBS, p.75-89.
- Denne, M.P.; Hale, M.D.** 1999. Cell wall and lumen percentages in relation to wood density of *Nothofagus nervosa*. *Iawa Journal* 20: 23-26.
- Desch, H. E.** 1968. Timber: Its Structure & Properties. 4 ed. Macmillan/St Martin's Press.
- Dickison, W. C.** 2000. Integrative plant anatomy. Harcourt/Academic Press. San Diego.
- Eckblad, J.W.** 1991. How many samples should be taken. *Bio Science* 41: 346-348.
- Feeney, F.E.; Chivers, R.C.; Evertsen, J.A.; Keating, J.** 1998. The influence of inhomogeneity on the propagation of ultrasound in wood. *Ultrasonics* 36: 449-453.
- Feio, A.O.; Machado, J.S.; Lourenço, P.B.** 2004. Caracterização de propriedades da madeira de castanho na direção perpendicular ao fio: recurso a técnicas destrutivas e não destrutivas de ensaio. Congresso ibérico a madeira na construção, 1, Guimarães, – “I Congresso Ibérico (CIMAD'04): a Madeira na Construção”. [S.l.: s.n., p. 353-362.
- Fengel, D. & Wegener, G.** 1989. Wood chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin: Walter de Gruyter.
- Fernandes, G.A.** 2004. Avaliação de madeiras brasileiras para utilização em guitarras elétricas, 41 f. Trabalho final de curso (Engenharia Florestal)–Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, Brasília.

- Follmann, E.V.** 1995. Consideration about the construction of bows for stringed instruments. *Instrumentenbau-Zeitschrift* 1: 45--48.
- Franco, N. & Yojo, T.** 2008. Propriedades físicas, mecânicas e acústicas da madeira de Pau-brasil. *In*: R.C.L.F. Ribeiro, C.J. Barbedo, E.S. Alves, M. Domingos & M.R. Braga (orgs.). Pau-brasil, da semente à madeira conhecer para conservar. Instituto de Botânica, São Paulo, pp146--157.
- Fujiwara, S., Sameshima, K.; Kuroda, K.; Takamura, N.** 1991. Anatomy and properties of Japanese hardwoods I. Variation of dimensions of ray cells and their relation to basic density. *IAWA Bull* 12: 419--424.
- Gonçalez J.C.; Valle, A.T.; Costa, A.F.** 2001. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). *Revista Cerne* 7: 65-80.
- Gonçalves, M.T.T.** 2000. Processamento da madeira. Bauru, SP. 242p.
- Gomide, L.J.; Demuner, B.J.** 1986. Determinação do teor de lignina em material lenhoso. Método Klason modificado.
- Grabner, M.; Müller, U.; Gierlinger, N.; Wimmer, R.** 2005. Effects of heartwood extractives on mechanical properties of larch. *IAWA Journal* 26: 211--220.
- Green, D.W., J.E. Winandy & D.E. Kretschann.** 1999. Mechanical properties of wood. *In*: Forest Products Laboratory (ed.), *Woodhandbook - Wood as an Engineering Material*. Gen. Tech. Rep. Forest Products Laboratory, Madison.
- Groose, S.O. & Olmstead, R. G.** 2007. Taxonomic Revisions in the Polyphyletic Genus *Handroanthus* s. l. (Bignoniaceae). *Systematic Botany* 32:660-670.
- Guimarães Júnior, J.B.** 2008. Painéis de Madeira de eucalipto: estudo de caso de espécies e procedências. Dissertação de mestrado em Ciência e tecnologia da madeira. Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais.
- Heywood, V.H.** 1993. Flowering plants of the world. London: B.T. Batsford LTD.
- Hoadley, B.** 2000. *Understanding Wood: A Craftsman's Guide to Wood Technology*. Taunton Press Inc; 2nd Revised edition. 280p.
- Holz, D.** 1996. Acoustically important properties of xylophone-bar materials: can tropical woods be replaced by European species. *Acta Acust* 82:878--884.
- Huang, C.L; Lindström, H.; Nakada, R.; Ralston, J.** 2003. Cell wall structure and wood properties determined by acoustics—a selective review. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Berlin/Heidelberg 61: 321—335.

- IAWA Committee.** 1989. IAWA list of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bull.* n.s. 10: 219--332.
- Jang, S.S.** 2000. Evaluation of lumber properties by applying stress waves to larch logs grown in Korea. *Forest Products Journal*, Madison 50 : 44-48.
- Jankowsky, I. P.; Chimelo, J. P.; Cavalcante, A.A.; Galina, I.C.M.; Nagamura, J.C.S.** 1990. *Madeiras Brasileiras (Volume I)*. Caxias do sul: Spectrum. v.1. 171p.
- Jeromidis, G.** 1976. The fracture of wood in relation to its structure. *In* BASS, P.; BOLTON, A. J.; CATLING, D. M. (eds). *Wood Structure in Biological and Technological Research*. Leiden University Press (Leiden Botanical Series No. 3) 280p.
- Johansen, D.A.** 1940. *Plant Microtechnique*. McGraw-Hill Book Company Inc., New York.
- Jordão, B.Q. & Andrade, C.G.T.J.** 2000. Célula Vegetal. *In* L.C. Junqueira & J. Carneiro, *Biologia Celular e Molecular*. Editora Guanabara Koogan. 7 ed. Rio de Janeiro.
- Kollmann, F. & Côté JR., W. A.** 1968. *Principles of Wood Science and Technology*, vol 1: Solid Wood. Springer, New York, 492p.
- Lehard, L.** 1974. *La Liuteria Classica e la Liuteria Moderna*. G. Zanibon. Padova.
- Lepage, E.S.** 1986. Química da madeira. *In*: LEPAGE, E.S. (Coord.). *Manual de preservação de madeiras*. São Paulo: IPT 1; 69-97.
- Logsdon, N.B. & Calil Junior, C.** 2002. Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos 18: 77-107.
- Longui, E.L.** 2005. Pau-brasil e outras espécies nativas empregadas na confecção de arcos para instrumentos de corda: um estudo comparativo. 75 p. il. Dissertação de mestrado em Biodiversidade vegetal e meio ambiente. Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, São Paulo.
- Lucas Filho, F.C.** 2004. Análise da usinagem da madeira visando a melhoria de processos em indústrias de móveis. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Lucchi, G.** 1986. The Use of Empirical and Scientific Methods to Measure the Velocity of Propagation of Sound. *J. Violin Soc.* 9:107--23.
- Lucchi, G.** 2009 (World Wide Web, [www.lucchi-n-sons.com](http://www.lucchi-n-sons.com), 26/05/09).

- Mainieri, C., J.P. Chimelo & V. Angyalossy-Alfonso.** 1983. Manual de identificação das principais madeiras comerciais brasileiras. Promocet, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo.
- Mainieri, C. & Chimelo, J.P.** 1989. Fichas de características das madeiras brasileiras. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2ª ed., Publicação IPT 1791.
- Massmann, H. L. & Ferrer, R. P.** 1993. Instrumentos musicales: artesanía y ciencia. Santiago; Dolmen Ediciones. 191p.
- Matsunaga, M.; Sugiyama, M.; Minato, K.; Norimoto, M.** 1996. Physical and mechanical properties required for violin bow materials. *Holzforschung* 50: 511--517.
- Matsunaga, M. & Minato, K.** 1998. Physical and mechanical properties required for violin bow materials II: Comparison of the processing properties and durability between pernambuco and substitutable wood species. *Journal of Wood Science* 44: 142—146.
- Milanez, A.C. & Foelkel, C.E.B.** 1981. Processos de deslignificação com oxigênio para a produção de celulose de eucalipto. *In: Congresso anual da ABCP, 14., São Paulo. Anais...* São Paulo: ABTCP. p. 37-110.
- Miller, R.B.** 1999. Characteristics and availability of commercially important woods. *In: Forest Products Laboratory (ed.), Woodhandbook - Wood as an Engineering Material. Gen. Tech. Rep. Forest Products Laboratory, Madison.*
- Miná, A.J.S.; Oliveira, F.G.R.; Calil Jr., C.; Dias, A.A.; Sales, A.** 2004. Avaliação não-destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som. *Scientia Florestalis*. 65: 188—196.
- Minato, K.; Sakai, K.; Matsunaga, M.; Nakatsubo, F.** 1997. The vibrational properties of wood impregnated with extractives of some species of Leguminosae. *Mokuzai Gakkaishi*. 43: 1035-1037.
- Morais, S.A.L.; Nascimento, E.A.; Melo, D.C.** 2005. Análise da madeira do *Pinus oocarpa* parte II – caracterização estrutural da lignina de madeira moída. *Revista Árvore* 29; 471-478.

- Mori, C.L.S.O.; Mori, F.A.; Mendes, L.M.; Silva, J.R.M.** 2003. Caracterização da Madeira de Angico-Vermelho (*Anadenanthera Peregrina* (Benth) Speng) para Confecção de Móveis. *Brasil Florestal* 23: 21-27.
- Néri, A.C.; Gonçalves, R.; Hernandez, R.E.** 2000. Forças de corte ortogonal 90-90 em três espécies de madeira de eucalipto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 4: 275-280.
- Nogueira, M.; Ballarin, A.W.** Sensibilidade dos ensaios de ultra-som à ortotropia elástica da madeira. In: Conferência Pan-Americana De Ensaio Não-Destrutivos (PANNDT), 3, 2003. Rio de Janeiro. Proceedings ... Rio de Janeiro: ABENDE, 2003.1 CD-ROM.
- Obataya, E.; Norimoto, M.; Gril, J.** 1998. The effects of adsorbed water on dynamic mechanical properties of wood. *Polymer* 39: 3059--3064.
- Oliveira, F.G.R.; Sales, A.** 2000. Propagação de Ondas Acústicas na Madeira. In: VII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, São Carlos, 2000. São Carlos, IBRAMEM/LaMEM. p.35.
- Oliveira, F.G.R.** 2001. Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaios não destrutivos utilizando equipamento de ultra-som. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos.
- Oliveira, F.G.R. & Sales, A.** 2006. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. *Bioresource Technology* 97: 2443--2446.
- Panshin, A.J. & C. De Zeeuw.** 1964. *Textbook of Wood Technology: structure, identification, properties and uses of the commercial woods of the United States and Canada.* 3rd ed. McGraw-Hill, Nova York.
- Paula, J.E.; Alves, J.L.H.** 2007. 897 Madeiras nativas do Brasil. Porto Alegre: Cinco Continentes.
- Perissotto, D.O.** 2005. Estudo comparativo das propriedades químicas de polpas Kraft convencionais e MCC de eucalipto. Tese de doutorado em Química orgânica, Universidade Federal do Paraná.
- Petterson, R.C.** 1984. The Chemical composition of Wood. In: Rowell, R.M., ed. *The chemistry of solid wood.* Advances in chemistry series 207. Washington, DC: American Chemical Society.
- Pierce, R.** 2002. The big issue. *The Strad* 8: 840–843.

- Pourtahmasi, K. & Golpayegani, A.S.** 2009. Introducing Mulberry's wood (*Morus alba* L.) used in bowl shaped musical instruments of Iran. Actes de la journée d'étude *Le bois : instrument du patrimoine musical* – Cité de la Musique.
- Planta, B.** 1980. Elemente zur wahl eines geigenbogens. Verlag das musikinstrument Frankfurt am main buchredaktion h.z. herzog. Gesamtherstellung: druckene i und verlagsanstalt konstanz am fischmarkt.
- Quilhó, T.; Miranda, I.; Pereira, H.** 2006. Within-tree variation in wood fibre biometry and basic density of the urograndis eucalypt hybrid (*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*). Iawa Journal 27; 243–254.
- Rao, R.V.; Aebischer, D.P.; Denne, M.P.** 1997. Latewood density in relation to wood fibre diameter, wall thickness, and fibre and vessel percentages in *Quercus robur* IAWA J. 18: 127--138.
- Reiterer, A.; Burgert, I.; Sinn, G.; Tschegg, S.** 2002. The radial reinforcement of the wood and its implication on mechanical and fracture mechanical properties-A comparison between two tree species. Journal of Materials Processing Technology. 37: 935-940.
- Rizzini, C.T.** 1986. Árvores e Madeiras úteis do Brasil. Manual de Dendrologia Brasileira. São Paulo: Editora Edgard Gomide Blucher.
- Rocha, Y.T. & Simabukuro, E.A.** 2008. Estratégias de conservação *in situ* e *ex situ* do pau-brasil. In: R.C.L.F. Ribeiro, C.J. Barbedo, E.S. Alves, M. Domingos & M.R. Braga (orgs.). Pau-brasil, da semente à madeira conhecer para conservar. Instituto de Botânica, São Paulo, pp102--113.
- Rosa, C.A.B.** 2003. Influência do teor de lignina da madeira de *Eucalyptus globulus* na produção e na qualidade da celulose Kraft. Dissertação de mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM-RS).
- Rymer, R.** 2004. Saving the music tree. Smithsonian, Washington, D.C.35: 52-63.
- Santos, I.D.** 2008. Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do Cerrado. Dissertação de mestrado em Ciências Florestais. Universidade de Brasília.
- Santos, S.R. & Sansígolo, C.A.** 2007. Influência da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus urophylla* na qualidade da polpa branqueada. Ciência Florestal, Santa Maria 17: 53-63.

- Sakai, K.; Matsunaga, M.; Minato, K.; Nakatsubo, F.** 1999. Effects of impregnation of simple phenolic and natural polycyclic compounds on physical properties of wood. *Journal of Wood Science*. 45: 227-232.
- Salmén, L. & Burgert, I.** 2008. The mechanical performance of wood and wood products is highly dependent on the structural arrangement and properties of the polymers within the fibre cell wall. *Holzforschung* 63: 121–129.
- Salmén, L. & Bergström, E.** 2009. Cellulose structural arrangement in relation to spectral changes in tensile loading FTIR. *Cellulose*. Publicação on-line / 13 de junho.
- Sass, J.E.** 1951. *Botanical Microtechnique*. The Iowa State College Press, Ames, 326p.
- Schimleck, L.R.; Espey, C.; Mora, C.R.; Evans, R.; Taylor, A.; Muniz, G.I.B.** 2009. Characterization of the wood quality of pernambuco (*Caesalpinia echinata* Lam.) by measurements of density, extractives content, microfibril angle, stiffness, color, and NIR spectroscopy. *Holzforschung* 6: 457-463.
- Shimoyama, V.R.S.** 1990. Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* spp. 93p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Madeira) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Shimoyama, V.R.S.** 2005. Estimativas de propriedades da madeira de *Pinus taeda* através do método não-destrutivo emissão de ondas de tensão, visando à geração de produtos de alto valor agregado. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Silva, J.C.; Matos, J.L.M.; Oliveira, J.T.S.; Evangelista, W.V.** 2005 Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. *R. Árvore* 29: 455-460.
- Silva, J.R.M.; Muñoz, G.I.B.; Lima, J.T.; Bonduelle, A.F.** 2005. Influência da morfologia das fibras na usinabilidade da madeira de *eucalyptus grandis* hill ex. maiden. *R. Árvore* 29: 479-487.
- Silveira, V.; S.C.S.; Trugilho, P.F.; Carvalho, D.; Martins, S.C.** 1999. Variação dimensional da madeira de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes espaçamentos. *Cerne* 5: 105-124.
- Slouten, H.J. van der; Souza, M.R.** 1993. Avaliação das espécies madeireiras da Amazônia selecionadas para a manufatura de instrumentos musicais. Manaus: INPA. 123 p.

- Society of Wood Science and Technology.** 2009. <http://www.swst.org/teach/teach2/properties2.pdf> (acesso em 06.05.2009).
- Souza, M.R.** 1983. Classificação de madeiras para instrumentos musicais. Série Técnica IBDF.
- Stangerlin, D.M.; Domingues, J.M.X.; Santini, E.J.; Calegari, L.; Melo, R.R.; Gatto, D.A.; Haselein, C.R.** 2008. Obtenção do módulo de elasticidade em madeiras de *Patagonula americana* e *Araucaria angustifolia* por meio do método ultra-sonoro. Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal 11: 01-15.
- Takaaki, F.; Hiroyuki, Y. Satoru, T.** 2007. Estimation of Wood Stiffness and Strength Properties of Hybrid Larch by Near-Infrared Spectroscopy. Applied Spectroscopy 61: 150-170.
- TAPPI.** 1998. T222 om-98 - Acid-insoluble lignin in wood and pulp. TAPPI Test Methods, Norcross, USA.
- Tomazello Filho, M.; Barrichelo, L.E.C.; Costa, J.C.** 1985. Análise da madeira de compressão em *Pinus oocarpa* e *Pinus strobus* var. *chiapensis*. composição química. IPEF 31: 69-73.
- Tsehaye, A.; Buchanan, A. H.; Walker, J. C. F.** 2000. Sorting of logs using acoustics. J. Wood Sci & Techn. 34: 337-344.
- Walker, J. C. F.; Butterfield, B. G.; Lang Rish, T. A. G.; Harris, J. M.; Uprichard, J. M.** 1993. Primary Wood Processing: Principles and practice. Chapman & Hall, London.
- Wang, S.Y.; Lin, C.J.; Chiu, C.M.** 2003. The adjusted dynamic modulus of elasticity above the fiber saturation point in *Taiwania* plantation wood by ultrasonic-wave measurement. Holzforschun 57: 547-552.
- Wegst, U.G.K.** 2006. Wood for sound. American Journal of Botany. 93: 1439--1448.
- Williams, R.S.** 1999. Finishing wood. In: Forest Products Laboratory (ed.), Woodhandbook - Wood as an Engineering Material. Gen. Tech. Rep. Forest Products Laboratory, Madison.
- Woodcock, D.W.; Shier, A.D.** 2002. Wood specific gravity and its radial variations: the many ways to make a tree. Trees. 16:437-443.
- Woodhouse, J.** 1993a. On the playability of violins. Part I: Reflexion function: Acustica 78: 125-136.
- Woodhouse, J.** 1993b. On the playability of violins. Part II: Minimum bow force and transients: Acustica 78: 137 -- 153.

- Yojo, T.** 2004. Discussões sobre as propriedades acústicas e sua utilização em madeira.  
In: IX Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (EBRAMEM): 11--20. Editora da Universidade Federal do Mato Grosso – EdUFMT, Cuiabá.
- Zenid, G.J.** 2009. Madeira: uso sustentável na construção civil. 2<sup>a</sup> ed. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo.

## Resumo

O pau-brasil (*Caesalpinia echinata* L.) é a árvore símbolo do Brasil e se encontra em perigo de extinção, sendo um dos motivos a retirada e a exportação ilegal de sua madeira para fabricação de arcos de instrumentos de corda. Para propor outras madeiras são necessários estudos científicos que avaliem seu potencial para confecção de arcos, bem como a fabricação de arcos testes e da comprovação dos músicos quanto à sua qualidade. Neste estudo objetivou-se investigar o potencial de seis madeiras nativas por meio da comparação de suas características anatômicas, propriedades físicas, mecânicas, químicas, acústicas e da trabalhabilidade com as encontradas na madeira de *C. echinata*, estabelecida como modelo. Objetivou-se ainda avaliar a disponibilidade de mercado das madeiras consideradas potenciais. As características avaliadas foram: 1) anatômicas (dimensões, frequência e arranjo das células); 2) propriedades físicas (densidade aparente e retração volumétrica); 3) propriedades mecânicas (módulos de elasticidade dinâmico, estático e ruptura, resistência ao cisalhamento e compressão paralela às fibras); 4) propriedade acústica (velocidade de propagação do som); 5) constituintes químicos (teores de extrativos totais, lignina e holocelulose); 6) trabalhabilidade e propriedades organolépticas; 7) disponibilidade de mercado em madeiras do estado de São Paulo. Os resultados obtidos mostraram que as características das fibras e dos raios foram as que mais contribuíram para as variações de densidade aparente; adicionalmente, as dimensões dos raios, lume e diâmetro das fibras, e a presença de parênquima axial paratraqueal influenciam positivamente a velocidade de propagação do som. Os valores do módulo de elasticidade dinâmico estão diretamente correlacionados com o lume, diâmetro das fibras e dimensões dos raios. Em geral, valores altos nas propriedades mecânicas indicam madeiras de melhor qualidade. A variação da densidade e da velocidade de propagação do som foi diferente entre as madeiras estudadas. A correlação entre a densidade e os teores de extrativos, lignina e holocelulose deve ser interpretada de maneira distinta entre as diferentes madeiras, uma vez que a influência destes constituintes variou, dependendo da madeira analisada. A madeira de *C. echinata* apresentou maior dificuldade de ser trabalhada em comparação com as seis madeiras estudadas. No entanto, foi a que apresentou o melhor acabamento. Dentre as seis madeiras analisadas no presente estudo, *Handroanthus* spp. e *Dipteryx* spp. foram as que mostraram maior potencial como madeiras alternativas, sendo que arcos dessas duas madeiras já foram adquiridos por músicos profissionais que confirmaram sua qualidade musical. As madeiras de *Hymenaea* spp. e *Diploptropis* spp. também se mostraram promissoras e podem fornecer arcos de boa qualidade. *Mezilaurus itauba* e *Astronium lecointei* não apresentaram o potencial necessário para serem utilizadas na fabricação de arcos. As quatro madeiras mais promissoras são relativamente fáceis de serem encontradas atualmente no comércio madeireiro, o que viabiliza sua utilização.

## Abstract

Pau-brasil (*Caesalpinia echinata* L.) is a symbol tree of Brazil, and is at a risk of extinction, because of illegal extractive activities and exportation for its use as bow for string instruments. Additional scientific studies are necessary to select other woods species with adequate potential characteristics allowing bow manufacture. There are also a need for test bows and confirmation by musicians of its musical qualities. In this study we aimed to evaluate six native woods by comparing anatomical, physical, mechanical, chemical characteristics, as well as the workability in relation to that observed in *C. echinata* already established as a model. We also aimed to evaluate the availability in the wood market of those woods considered as of potential applicability. The evaluated characteristics were: 1) anatomical (cell dimension, frequency and arrangement); 2) physical properties (specific gravity and volumetric shrinkage); 3) mechanical properties (dynamic and static elasticity modulus and rupture modulus, shear strength, compression parallel strength); 4) acoustic properties (speed of sound propagation); 5) chemical constitutives (total extractive content, lignin and holocellulose); 6) workability and organoleptic properties; 7) availability in the wood market. The results showed that fibers characteristics and rays represented the most important variables contributing to the specific gravity. Additionally, ray dimension, lumen and fiber diameter, as well as the presence of paratracheal axial parenchyma positively influenced the speed of sound propagation. The values of dynamic elasticity modulus are directly related to the ray dimension, fiber and lumen diameters. As a rule, high values of mechanical properties indicate best quality woods. Variability of specific gravity and speed of sound propagation were different among the studied woods. The correlation between specific gravity and the extractive contents lignin and holocellulose should be interpreted in a different ways depending on the wood species under evaluation. The *C. echinata* wood presented the highest difficulty to work on in comparison with the other six studied woods. On the other hand, *C. echinata* was the one that presented the best finishing appearance. Among the six woods included in this study, *Handroanthus* spp. and *Dipteryx* spp. were those that showed the best potential as alternative woods. The bows from these woods were already tested by professional musicians, certifying its musical quality. The woods *Hymenaea* spp. and *Diploptropis* spp. also showed promising characteristics and can be able to offer good quality bows. *Mezilaurus itauba* and *Astronium lecointei* do not presented the necessary potential. The four promising woods here described are easily available in the wood market, becoming useful for bows manufacturing.