FABRICIO GOMES GONÇALVES
ROBERTO CARLOS COSTA LELIS
WENDEL SANDRO DE PAULA ANDRADE

Engenharia MADEIREIRA: pesquisa e produção

Edur
UFRRJ

Reitor
Ricardo Luiz Louro Berbara

Vice-Reitor
Luiz Carlos de Oliveira Lima

Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação
Alexandre Fortes

Pró-Reitora Adjunto de Pesquisa e Pós-Graduação
Lúcia Helena Cunha dos Anjos

Conselho Consultivo

Adriana T. M. Lessa
Ana Maria Marques dos Santos
Ana Paula Perrota Franco
Biancca Scarpeline de Castro
Carmen Andriolli
Christian Dutilleux
Cláudia Mazza
Clézio dos Santos
Danilo Bilate
Débora Lerrer
Janaína Machado Simões
Lígia Fátima Lima Calixto
Lúcia Valadres Sartório
Luiz Alberto de Lima Leandro
Manlio Silvestre Fernandes
Márcio Rufino Silva
Maria Gracinda Carvalho Teixeira
Marta Cioccari
Rebeca Gontijo Teixeira
Simone Batista
Tania Mikaela Garcia Roberto
Vladimyr Lombardo Jorge
Yllan de Mattos Oliveira

EDUR
Editora da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Br 465, Km. 7, Seropédica – RJ - CEP: 23.890-000
Telefone: (021) 2681-4711
Site: www.editora.ufrrj.br
E-mail: edur@ufrrj.br

Engenharia MADEIREIRA: pesquisa e produção

Edur
UFRRJ

Copyright © 2017 por Editora da UFRRJ - Edur
Todos os direitos desta edição reservados à Editora da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. É proibida a duplicação ou reprodução deste volume, ou de parte dele, sob quaisquer meios, sem autorização expressa da Editora.

Título Original: Engenharia madeireira: pesquisa e produção

Editora-Chefe: Fabiane Popinigis

Conselho Editorial:

Adriana Barreto de Souza	Luiz Claudio Valente Walker de Medeiros
Affonso Henrique Vieira da Costa	Marcia Denise Pletsch
Andrea Sonia Berenblum	Marcos Gervasio Pereira
Claudia Job Schmitt	Marcos Estevão Gomes Pasche
Cláudio Maia Porto	Patrícia Reinheimer
Cristine Cardoso	Sérgio Manuel Serra da Cruz
Douglas Siqueira de Almeida Chaves	Vinicius Ferreira Baptista
Fabiane Popinigis	Marta Cioccari
Maria das Graças Santana Salgado	Pedro Campos
Jefferson Pereira Nepomuceno	Rosane Nora Castro

Coordenação Administrativa: Mariangela de Campos Dias

Vice-Coordenação Administrativa: Daniel Corban Rodrigues

Projeto gráfico e diagramação: Vinicius dos Reis

UFRRJ / Biblioteca Central / Divisão de Processamentos Técnicos

674
E57

Engenharia madeireira: pesquisa e produção
[recurso eletrônico] / [organizadores:
Fabrício Gomes Gonçalves, Roberto Carlos, Costa Lelis, Wendel Sandro de Paula Andrade]. – Seropédica, RJ: Ed. da UFRRJ, [2017?].

Inclui índice.
Bibliografia: p. 261-306. Modo de acesso: Internet.
ISBN: 978-85-8067-089-9 (E-BOOK).

1. Processamento da madeira. 2. Indústria madeireira. 3. Madeira - Utilização. 4. Madeira – Produtos. I. Gonçalves, Fabricio Gomes. II. Lelis, Roberto Carlos Costa, 1965. III. Andrade, Wendel Sandro de Paula. IV. Título.

Associação Brasileira das Editoras Universitárias

Depósito Legal na Biblioteca Nacional
Editora Filiada à ABEU

SUMÁRIO

LISTA DE AUTORES....9
INTRODUÇÃO....13
CAPÍTULO 1 - UTILIZAÇÃO DO TANINO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA....14
1. Introdução....14
2. Ocorrência e funções dos taninos na planta....15
3. Fatores associados a variações no conteúdo de taninos....15
3.2 Posição da amostra na árvore....15
3.3 Local de crescimento....15
4. Estrutura e fonte dos taninos....16
4.1 Taninos condensados....17
4.2 Taninos hidrolisáveis....19
5. Hidrólise de taninos....22
6. Principais aplicações dos taninos....23
6.1 Curtimento de peles de animais....24
6.2 Preservação de madeira....24
6.3 Propriedades farmacológicas....24
6.4 Taninos para tratamentos de água....25
6.5 Taninos na estabilização da cerveja....25
7. Taninos na produção de adesivos....26
8. Taninos na indústria madeireira....30
9. Considerações Finais....33
CAPÍTULO 2 - INTRODUÇÃO AO ESTUDO DA LIGNINA....34
1. Introdução....34
2. Biossíntese....35
3. Estrutura e principais grupos funcionais....37
4. Topoquímica....41
5. Considerações Finais....42
CAPÍTULO 3 - RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS PARA USO NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS....43
1. Introdução....43
2. As questões ambientais....44
3. Resíduos vegetais e sua caracterização....45
3.1. Origem na agricultura tradicional....48
3.2. Resíduo florestal....56
4. Considerações Finais....56
CAPÍTULO 4 - PAINÉIS RECONSTITUÍDOS À BASE DE MADEIRA DE EUCALIPTO....57
1. Introdução....57

2. A madeira de eucalipto....58
3. Tipos de painéis....59
3.1 Painéis a partir de fibras....59
3.2 Painel aglomerado....62
3.3 Painéis compensados....64
4. Considerações Finais....66
CAPÍTULO 5 - A LIGNINA COMO ADESIVO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA....67
1. Introdução....67
2. A lignina....68
2.1. Fontes de lignina....69
2.2. A obtenção da lignina....69
2.3. Preparo da lignina para adesivo....70
2.4. A lignina como adesivo para madeira....71
3. Propriedades tecnológicas e os adesivos lignificados....72
4. Considerações Finais.... 75
CAPÍTULO 6 - EMISSÃO DE FORMALDEÍDO E COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS NAS INDÚSTRIAS 76....76
1. Introdução....76
2. Emissão de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs)....78
3. Emissão de formaldeído.... 79
4. Técnicas de extração e análise de formaldeído em painéis.... 81
4.1. Método perforator....81
4.2. Método do dessecador....82
4.3. Método do frasco....83
4.4. Método da análise de gás (Gas analysis)....84
5. Limites de emissões de formaldeído para painéis derivados de madeira....87
6. Redução das emissões de formaldeído....89
7. Impactos ambientais....91
7.1. Soluções tecnológicas industriais....100
7. Considerações Finais....
CAPÍTULO 7 - TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS APLICADAS À MADEIRA SÓLIDA E AOS PRODUTOS RECONSTITUÍDOS DE MADEIRA 101....101
1. Introdução....102
2. Principais técnicas de análises não destrutivas 102
2.1. Visual....103
2.2. Ultrassom 105
2.3. Vibração transversal 108
2.4. Machine stress rate (MSR)....109
2.5. Ondas de tensão....111

2.6. Ensaios radiográficos.....111
2.7. Tomografia computadorizada.....113
2.8. Detecção termográfica.....116
3. A radiação síncrotron.....117
4. Principais desafios na utilização das técnicas não destrutivas.....120
5. Considerações Finais.....120
CAPÍTULO 8 - MADEIRA LAMINADA COLADA (MLC): PRESCRIÇÕES TÉCNICAS DE CONFECÇÃO E UTILIZAÇÃO.....121
1. Introdução.....121
2. A utilização da madeira.....122
3. Breve histórico da madeira laminada colada (MLC).....123
4. Definição.....124
5. A escolha da madeira para a colagem.....125
6. A escolha do adesivo aplicado na colagem.....126
7. Confecção de elementos de madeira laminada colada.....127
8. Pesquisas recentes.....128
9. Obras em MLC.....131
10. Considerações Finais.....133
CAPÍTULO 9 - USO DE ESTRUTURAS MISTAS DE MADEIRA E CONCRETO.....135
1. Introdução.....135
2. Panorama da utilização das estruturas mistas de madeira e concreto.....135
3. Estruturas mistas de madeira e concreto pelo mundo.....137
4. Estruturas mistas de madeira e concreto no Brasil.....144
5. Considerações Finais.....150
CAPÍTULO 10 - COMBUSTÃO E CARBONIZAÇÃO DA BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA.....151
1. Contextualização.....153
2. Combustão.....161
3. Carbonização ou pirólise lenta.....161
3.1. Definição.....162
3.2.Etapas da carbonização.....163
3.3 Balanços de massa e energia da carbonização.....167
3.4. Fatores que afetam a produção do carvão vegetal.....171
3.5. Aspectos gerais: qualidade e processos de produção do carvão vegetal.....174
4. Considerações Finais.....174
5. Agradecimentos.....175
CAPÍTULO 11 - ENERGIA DA BIOMASSA FLORESTAL.....175
1. Introdução.....175
2. Revisão de literatura.....176

2.1. A madeira e suas variações 176
2.2. A composição química da madeira 177
2.3. Panorama do uso energético da madeira no Brasil 180
2.4. Formas de uso da madeira para energia 181
2.4. Propriedades desejáveis na madeira para o uso energético 183
2.4.1. Densidade básica 183
2.4.2. Composição química 186
2.4.3. Poder calorífico 191
2.4.3. Análises térmicas 196
3. Considerações Finais 198
4. Agradecimentos 199
CAPÍTULO 12 - DETERMINAÇÃO DO RAIO ECONÔMICO DE TRANSPORTE PARA UMA USINA DE TRATAMENTO DE MADEIRA 200
1. Introdução 200
2. Situação econômica do segmento de tratamento de madeira no Brasil e no Espírito Santo 201
3. Localização de projetos de base florestal 202
3.1. Transporte rodoviário florestal brasileiro 203
4. Considerações sobre o método de obtenção e análise de dados 204
5. Análise dos resultados 208
6. Considerações Finais 211
REFERÊNCIAS 214
ÍNDICE REMISSIVO 250

LISTA DE AUTORES

1. Alexandre Monteiro de Carvalho é Engenheiro Florestal (1994), Mestre em Ciência e Tecnologia de Madeiras (2000) pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" e Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais (2004) pela Universidade de São Paulo. Atualmente é Professor Associado na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. E-mail: mcarvalho@ufrrj.br

2. Antônio Alves Dias é Engenheiro Civil (1982), Mestre (1987) e Doutor em Engenharia Civil (1994) pela Universidade de São Paulo. Atualmente é Professor Assistente na Escola de Engenharia de São Carlos. E-mail: dias@sc.usp.br

3. Ânderson Siqueira Teodoro é Engenheiro Florestal (2005) e Mestre em Ciências Ambientais e Florestais (2008) pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Atualmente é Professor no Colégio Integrado de Caratinga. E-mail: newanders1@yahoo.com.br

4. Brunela Pollastrelli Rodrigues é Engenheira Florestal (2010), Mestra (2013) e Doutoranda em Ciências Florestais pela Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: brunelapollastrelli@yahoo.com.br

5. Claudinéia Olímpia de Assis é Engenheira Florestal (2004), Mestra em Engenharia Florestal (2007) e Doutora em Ciência e Tecnologia da Madeira (2013) pela Universidade Federal de Lavras. E-mail: claudineia21@yahoo.com.br

6. Cristiano Jorge Gomes Pinheiro é Físico (2002), Mestre (2004) e Doutor em Engenharia Nuclear (2008) pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia e pelo ICTP Abdus Salam Itália. Atualmente é Professor Adjunto na Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: christiano.pinheiro@ufes.br

7. Deise Amaral de Deus é Engenheira Florestal (2007), Mestra em Ciências Ambientais e Florestais (2010) pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e Doutora (2014) em Engenharia Florestal pela Universidade Federal do Paraná. E-mail: deiseflora@hotmail.com

8. Dercílio Junior Verly Lopes é Engenheiro Industrial Madeireiro (2012), Mestre em Ciências Florestais (2014) pela Universidade Federal do Espírito Santo e Doutorando em Recursos Florestais na Mississippi State University, Estados Unidos. E-mail: derciliolopes@hotmail.com

9. Djeison César Batista é Engenheiro Florestal (2006), Mestre (2009) e Doutor em Engenharia Florestal (2012) pela Universidade Federal do Paraná. Atualmente é Professor Adjunto na Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: djeison.batista@ufes.br

10. Edvá Oliveira Brito é Engenheiro Florestal (1980), Mestre (1984) e Doutor em Engenharia Florestal (1995) pela Universidade Federal do Paraná. Atualmente é Professor Associado na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. E-mail: edva@ufrrj.br

11. Elizabeth Neire da Silva Oliveira de Paula é Engenheira Florestal (2005), Mestra (2008) e Doutora em Ciência Florestal (2011) pela Universidade Federal do Espírito Santo. Atualmente é Vice-Diretora da Agroflor Engenharia e Meio Ambiente, em Viçosa, Minas Gerais. E-mail: elizabeth@agroflor.com.br

12. Fabricio Gomes Gonçalves é Engenheiro Florestal (1998), Mestre em Produção Vegetal (2006) pela Universidade Federal do Espírito Santo e Doutor em Ciências Ambientais e Florestais (2012) pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Atualmente é Professor Adjunto na Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: fabricio.goncalves@ufes.br

13. Héber dos Santos Abreu é Engenheiro Florestal (1977), Mestre em Química Orgânica (1985) pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e Doutor em Química Orgânica (1990) pela Universidade de São Paulo com Estágio Sanduíche na Universitat Hamburg. In memorian.

14. Isabel Cristina Nogueira Alves de Melo é Engenheira Florestal (2007), Mestra em Ciência Florestal (2010) pela Universidade Federal de Viçosa e Doutora em Ciência e Tecnologia da Madeira (2013) pela Universidade Federal de Lavras. E-mail: isabelnogueiraalves@gmail.com

15. Juarez Benigno Paes é Engenheiro Florestal (1984), Mestre em Engenharia Florestal (1991) pela Universidade Federal do Paraná e Doutor em Ciência Florestal pela Universidade Federal de Viçosa (1997). Atualmente é Professor Associado na Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: juarez.benigno@pq.cnpq.br

16. José Antonio Matthiesen é Engenheiro Civil (1975), Mestre (1981) e Doutor em Engenharia de Estruturas (1987) pela Escola de Engenharia de São Carlos. Atualmente é Professor na Faculdade Integrada Rui Barbosa. E-mail: matth@dec.feis.unesp.br

17. Lucas Fonseca do Amaral é Engenheiro Industrial Madeireiro (2013) pela Universidade Federal do Espírito Santo, Mestre (2016) e Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. E-mail: lfamaral28@gmail.com

18. Luciana Ferreira da Silva é Agrônoma (2009) pela Universidade Federal do Espírito Santo, Mestra (2011) e Doutoranda em Ciências Florestais pela Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: lu.ferreira1@hotmail.com

19. Luisa Maria Hora de Carvalho é Engenheira Química, Mestra em Ciência da Madeira pela

Université Nancy I Henri Poincaré, no Canadá, e Doutora em Engenharia Química pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. Atualmente é Professora e Coordenadora na Escola Superior de Tecnologia do Instituto Superior Politécnico de Viseu, em Portugal. E-mail: lhcarvalho@estv.ipv.pt

20. Lorenzo Lube dos Santos é Engenheiro Industrial Madeireiro (2011), Mestre em Engenharia Civil (2014) pela Universidade Federal do Espírito Santo e Doutorando em Engenharia de Estruturas pela Universidade de São Paulo. E-mail: lorenzolube@yahoo.com.br

21. Macksuel Soares de Azevedo é Engenheiro Civil (2003), Mestre (2005) em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Espírito Santo e Doutor (2009) em Engenharia de Estruturas pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Atualmente é Professor Adjunto na Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: macksuel.azevedo@gmail.com

22. Magda Aparecida Nogueira Andrade é Zootecnista (1999), Mestra (2002), Doutora em Economia Aplicada (2005) pela Universidade Federal de Viçosa. Atualmente é Professora Adjunta na Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: magdanogueira@hotmail.com

23. Marina Donária Chaves Arantes é Engenheira Florestal (2004), Mestra (2007) em Engenharia Florestal e Doutora em Ciência e Tecnologia da Madeira (2009) pela Universidade Federal de Lavras. Atualmente é Professora Adjunta na Universidade Federal de Sete Lagoas. E-mail: mdonariac@hotmail.com

24. Michel Cardoso Vieira é Engenheiro Florestal (2007), Mestre (2010) e Doutor em Ciências Ambientais e Florestais (2014) pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. E-mail: mceflorestal@ig.com.br

25. Natália Dias de Souza é Engenheira Florestal (2005), Mestra (2008) e Doutora em Ciências Ambientais e Florestais (2015) pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Atualmente é Professora Adjunta na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. E-mail: natdias@hotmail.com

26. Paulo Fernando Trugilho é Engenheiro Florestal (1984), Mestre (1987) e Doutor em Ciência Florestal (1995) pela Universidade Federal de Viçosa. Atualmente é Professor Titular na Universidade Federal de Lavras. E-mail: trugilho@dcf.ufla.br

27. Pedro Alcântara Gutemberg Segundinho é Engenheiro Civil (2002), Mestre em Engenharia Civil (2005) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho e Doutor em Ciências (2010) pela Universidade de São Paulo. Atualmente é professor adjunto na Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: p_gutemberg2001@yahoo.com.br

28. Roberto Carlos Costa Lelis é Engenheiro Florestal (1988), Mestre (1992) em Ciência Florestal dos Trópicos e Subtrópicos pela Universitaet Goettingen, Alemanha, e Doutor em Ciência Florestal (1995) pela Universitaet Goettingen, Alemanha. Atualmente é Professor Titular na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. E-mail: lelis@ufrrj.br

29. Sabrina Barros Santiago é Engenheira Florestal (2014) e Mestra (2016) em Ciências Florestais pela Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: sabrina_santiago19@hotmail.com

30. Sara Freitas de Sousa é Engenheira Florestal (2014) e Mestra (2016) em Ciências Florestais pela Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: sara_freitas_stm@hotmail.com

31. Selma Lopes Goulart é Bióloga (2000) pela Fundação Educacional de Machado, Mestra em Ciências Biológicas (2006) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho e Doutora em Ciência e Tecnologia da Madeira (2010) pela Universidade Federal de Lavras (2010). Email: selma.goulart@ufra.edu.br

32. Thiago de Paula Protásio é Engenheiro Florestal (2013), Mestre (2014) e Doutor em Ciência e Tecnologia da Madeira (2016) pela Universidade Federal de Lavras. Atualmente é Professor Adjunto na Universidade Federal Rural da Amazônia. E-mail: depaulaprotasio@gmail.com

33. Vinícius Peixoto Tinti é Engenheiro Industrial Madeireiro (2012) e Mestre em Ciências Florestais (2015) pela Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: viniciustinti_madeireiro@hotmail.com

34. Wendel Sandro de Paula Andrade é Engenheiro Agrônomo (2000), Mestre (2002) e Doutor em Economia Aplicada (2005) pela Universidade Federal de Viçosa. Atualmente é Professor Adjunto na Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: wendelandrade@hotmail.com

INTRODUÇÃO

Esta obra é resultado dos esforços de diferentes profissionais, dentre eles professores e pesquisadores, que trabalham diretamente com a formação profissional nas diversas áreas pertencentes ao setor madeireiro e desenvolvem pesquisas científicas que muito têm contribuido para a dinamização deste setor brasileiro. Desta forma, entende-se que obras como esta possuem características que as permitem ser mais do que sistematizadoras do conhecimento, passando a assumir o papel de catalisadoras do desenvolvimento setorial. Com isso, o setor caminha de forma mais acelerada no sentido do aumento da competitividade e da consolidação de suas atividades, tanto no mercado interno quanto externo.

Este material tem como público-alvo discentes dos cursos técnicos, de graduação e de pós-graduação diretamente relacionados com o estudo da madeira, especificamente os cursos de Engenharia Industrial Madeireira e Engenharia Florestal. Os temas aqui desenvolvidos em suas respectivas formas de abordagem tornam também este livro um excelente material de consulta para professores, pesquisadores e profissionais da área.

Os capítulos apresentados atendem a uma proposta central, a qual está retratada no título desta obra, "Engenharia MADEIREIRA: pesquisa e produção", e consistem em pesquisas realizadas com foco na aplicação de seus resultados e conclusões no setor produtivo. O livro concentra-se em analisar soluções para os problemas, tais como aplicações de produtos madeireiros; utilização de subprodutos da indústria madeireira; emissão de poluentes na indústria madeireira; geração de energia de fontes renováveis; métodos de avaliação da qualidade de produtos de madeira; e logística para madeira tratada. Em síntese, aborda inovações na indústria madeireira de forma eficiente e sustentável.

Espera-se que leitores deste material compartilhem com os autores do aprendizado por estes conquistado, o qual nunca se encerra naquele que o gerou, mas, sim, tem continuidade em todos os que o conduzir à posteridade.

Os Organizadores

UTILIZAÇÃO DO TANINO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA

Fabricio Gomes Gonçalves, Roberto Carlos Costa Lelis e Michel Cardoso Vieira

1. Introdução

O processo de adesão está entre as tecnologias mais antigas da humanidade. Já na Idade da Pedra, nossos antepassados fizeram ferramentas mediante o uso de cola mineral também com base no breu, que é à base de madeira (HOUWINK; SALOMON, 1965). Na construção da Torre de Babel utilizou-se betume à base de petróleo. No Egito Antigo, era habitual o uso de colas à base de animais para chapear mobília. Na Roma Antiga, utilizava-se farinha como adesivo. Na China era comum o uso da extração do breu de algumas espécies madeireiras.

Com o desenvolvimento dos setores de química por volta do início do século XX, a tecnologia de adesivos começou a crescer. Os adesivos naturais clássicos foram gradativamente substituídos pelas resinas fenólicas por volta de 1900; pelas resinas melamínicas e resina uréica por volta de 1930; e pelas resinas epóxi em 1938, além de uma enormidade de agentes ligantes, o que foi um avanço tecnológico no desenvolvimento de peças em que eram necessários processos de ligações mais avançados.

Pesquisas realizadas a partir dos anos 50 em todo o mundo priorizavam os adesivos naturais, em especial os taninos, destacando-se a Austrália, Índia, Venezuela, Estado Unidos da América e Indonésia, o que ocorreu em larga escala após a crise mundial do petróleo, em meados da década de 70. Neste sentido, destaca-se a África do Sul, do ponto de vista industrial, devido à grande abundância dos taninos da casca de *Acacia mearnsii*, cultivada para a produção de taninos visando o uso em curtumes e associada ao elevado preço naquele país dos produtos químicos derivados de petróleo, precursores dos adesivos comerciais.

De uma forma geral, os adesivos são definidos como substâncias capazes de unir superfícies de materiais não metálicos pelo processo de adesão e coesão. Logo, adesivo é um termo genérico, assim como outros nomes comuns, tais como cola, pasta, goma e adesivo cimentante. Os taninos, por sua vez, são substâncias naturais produzidas pelas plantas e que possuem a função de proteção contra ataques de agentes bióticos como insetos, microorganismos e outros herbívoros. Os taninos se encontram presentes em concentrações variáveis em distintas partes dos vegetais como em folhas, frutos, ramos e troncos (PAES et al., 2010), sendo que as quantidades podem variar também de acordo com o gênero e a espécie de plantas, o que exatamente pode conferir maior ou menor resistência ao ataque de patógenos ou pragas. Ocorre naturalmente em cascas e na madeira de algumas espécies, sendo, portanto originados de fonte renovável de menor custo de obtenção e, de acordo com Pizzi (1980), usados como substitutos do fenol ou outros compostos sintéticos.

Os compostos fenólicos são, de acordo com Chang (2000), estudados há bastante tempo através de análises de ordem qualitativa e quantitativa. Algumas das técnicas mais atuais utilizadas para suas análises são a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa, a cromatografia líquida de alta eficiência e a ressonância magnética nuclear.

2. Ocorrência e funções dos taninos na planta

Os taninos podem ocorrer em quase todas as partes de uma planta-raiz, tronco, casca, folhas e fruto. Podem, ainda, ocorrer em células individuais isoladas, em grupos ou cadeias de células (o mais comum) ou em cavidades especiais. Nos tecidos de planta viva, os taninos estão principalmente presentes em soluções nos vacúolos. Com o envelhecimento da célula e a consequente perda de seu conteúdo protoplasmático, os taninos são absorvidos comumente na parede da célula.

Certas estruturas especiais da planta podem ser ricas em taninos, particularmente aquela associada com movimentos de fluidos. Os taninos são encontrados frequentemente em células de glândula, nas células de pulvino (base do ramo de folhas) e em tecidos surgidos por infecções patológicas, como por exemplo os calos da planta. Certos calos constituem a fonte mais rica de taninos no reino vegetal. O tecido jovem e ativamente crescente das plantas também pode ser rico em taninos. Algumas espécies podem conter 50% de tanino em material jovem seco, porém, em geral, a maior concentração de taninos em plantas saudáveis normais ocorre na casca. A presença dos taninos nas plantas está relacionada aos sistemas de proteção contra animais e microrganismos patógenos. Os taninos deixam o material amargo ou adstringente ao paladar dos animais e, então, menos predado, o que pode ser explicado pelo fato de os taninos se associarem às glucoproteínas salivares (SILVA, 2001).

3. Fatores associados a variações no conteúdo de taninos

3.1 Idade da árvore

Árvores velhas contêm mais extrativos no cerne do que árvores jovens da mesma espécie. Na casca, o conteúdo não aumenta na mesma proporção do aumento de idade. A quantidade de taninos na madeira e casca de uma árvore de *Robinia pseudoacacia* com 9-10 anos de idade está entre 1,5 e 1,6%, respectivamente; em árvores com 85 anos de idade entre 3,6-5,0 e 2,7-4,4%, respectivamente (HILLIS, 1962).

3.2 Posição da amostra na árvore

A quantidade de substâncias extraídas com éter e metanol de várias seções de Tectona grandis aumenta gradualmente do alburno para o cerne. Quando o conteúdo de extrativos é relacionado com a taxa de crescimento, ocorre um aumento acentuado nos extrativos quando a taxa de crescimento é reduzida. O conteúdo de taninos da casca do topo geralmente é menor que a quantidade de taninos da casca da base da árvore, como no caso de *Castanea mollissima*, *Quercus laevis*, *Quercus pedunculata*, *Pinus ponderosa*, *Pinus radiata e Acacia mollissima* (HILLIS, 1962).

3.3 Local de crescimento

O conteúdo de taninos de árvores da mesma espécie, cultivadas em locais diferentes, pode ser distinto. Numerosos fatores como clima, solo e variações sazonais podem ser responsáveis por esta colocação. *Castanea sativa*, do norte da Europa, contém 7-8% de taninos no cerne, enquanto árvores

cultivadas no sul da Europa contêm cerca de 10-11%. Diferenças mais acentuadas são relatadas sobre o conteúdo de extrativos da casca. O conteúdo médio de taninos da casca de árvores de *Rhizophora mucronata* na Ásia é significativamente menor que o daquelas cultivadas no leste africano. O teor de taninos da casca de *Quercus sessiflora* varia de acordo com a posição geográfica e o nível de exposição solar, enquanto o conteúdo de outros extrativos permanece relativamente constante. A casca de árvores de Quercus pedunculata desenvolvidas em diferentes locais contém diferenças significativas na quantidade de taninos (HATHWAY, 1959 apud HILLIS, 1962).

A casca de árvores de *Acacia mollissima* que se desenvolvem em áreas bastante chuvosas pode conter menos taninos que a casca daquelas com desenvolvimento em áreas menos úmidas. Alguns relatos mostram, ainda, que a porcentagem de não taninos decresce com o aumento das chuvas e a taxa de taninos para não taninos varia diretamente com a ocorrência de chuvas (SILVA, 2001).

A variação sazonail na quantidade de polifenóis no alburno e no cerne de algumas espécies não são muito aparentes e facilmente detectadas, mas variações têm sido observadas. O conteúdo de taninos e não taninos da casca de Tsuga heterophylla varia durante o ano. Variações similares também já foram observadas em cascas de Quercus laevis e Picea sitchensis e Quercus pedunculata (HATHWAY, 19591 apud HILLIS, 1962). Mudanças de alguns taninos para formas insolúveis em água durante o outono e inverno podem ser responsáveis pelo decréscimo do conteúdo de taninos (HILLIS, 1962).

4. Estrutura e fonte dos taninos

Taninos são compostos polifenólicos de alto peso molecular, mais reativos que o fenol (FRIHART, 2005; MOSIEWICKI, 2007), utilizados para diferentes finalidades. Dentre estas finalidades, temos seu uso como agente dispersante no controle da viscosidade de argilas na perfuração de poços de petróleo (PANSHIN et al., 1962 apud PAES et al., 2010), na fabricação de tintas (TRUGILHO et al., 1997), no tratamento de águas residuárias (SILVA, 1999), na produção de adesivos (MORI et al., 2000), como inibidor de corrosão (BISANDA et al., 2003) e ainda para curtimento de couro (PAES et al., 2006).

As plantas ainda possuem uma capacidade de repelir seus inimigos naturais como mecanismo de defesa e esta habilidade poderia também estar associada à presença de taninos, conforme afirmado por Zucker (1983). Os taninos hidrolisáveis são responsáveis pela defesa das plantas contra os herbívoros e os taninos condensáveis por assegurarem a defesa contra microorganismos patogênicos (ZUCKER, 1983). Quanto à ação dos taninos hidrolisáveis sobre os herbívoros, Metche (1980) relatou que estes compostos estariam implicados no processo digestivo destes animais, dificultando-o em decorrência da complexação dos taninos com certas proteínas ligadas à produção de enzimas digestivas.

Na forma não oxidada, os taninos reagem com proteínas através de pontes de hidrogênio ou ligações hidrofóbicas. Quando não oxidados, se transformam em quinonas, as quais formam ligações covalentes com alguns grupos funcionais das proteínas, principalmente os grupos sulfídricos da cisteína e amino da lisina. Os taninos não interferem no metabolismo da planta, somente após lesão ou

morte da planta agem e têm metabolismo diferenciado (NOZELA, 2001).

Os compostos polifenólicos de algumas espécies florestais contidas na madeira e na casca possuem um grande poder de ligação. Essas substâncias podem formar uma resina através da condensação com o formaldeído sob determinado valor de pH (GONÇALVES, 2000). Pode-se ainda dizer que os taninos são substâncias polifenólicas que aparecem em quase todas as plantas superiores (folhosas e coníferas) em diferentes quantidades, estando presentes na madeira e predominantemente na casca (PIZZI, 2003). As coníferas, com exceção de suas cascas, apresentam pequena quantidade de tanino, no entanto, de acordo com Vieira (2010), na casca de *Pinus oocarpa* var. *oocarpa* pode-se encontrar até 28% de tanino. Ferreira (2004) encontrou tanino nas cascas de *Pinus caribaea* var. *bahamensis*, *Pinus oocarpa* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* nas proporções de 23,60%, 31,63% e 19,32%, respectivamente, com extrações realizadas com água e sulfito de sódio (NaSO3) a 5%.

Em folhosas, Haslam (1966) encontrou nas cascas de *Eucalyptus astringens* e na casca e cerne de *Eucalyptus wandoo* 45% e 14% de taninos, respectivamente. Trugilho et al. (2003) encontraram taninos nas proporções de 40,31% para *Eucalyptus cloeziana* e 16,03% para *Eucalyptus paniculata*.

Tecnicamente, o termo tanino está associado aos produtos naturais e fenólicos baseados no ácido gálico, conhecidos como taninos hidrolisáveis, ou nos poliflavonóides, chamados de taninos condensados (HEMINGWAY, 1989; PIZZI, 1994). Os taninos hidrolisáveis estão presentes em cascas e madeiras de árvores pertencentes aos gêneros Terminalia, Phyllantus e Caesalpinia, dentre outros (HERGERT, 1989).

As principais características dos taninos são as seguintes: solubilidade em água, exceto aqueles de elevado peso molecular; e habilidade de ligar-se a proteínas e combinar-se com celulose e pectina para formar complexos insolúveis (PINTO, 2003).

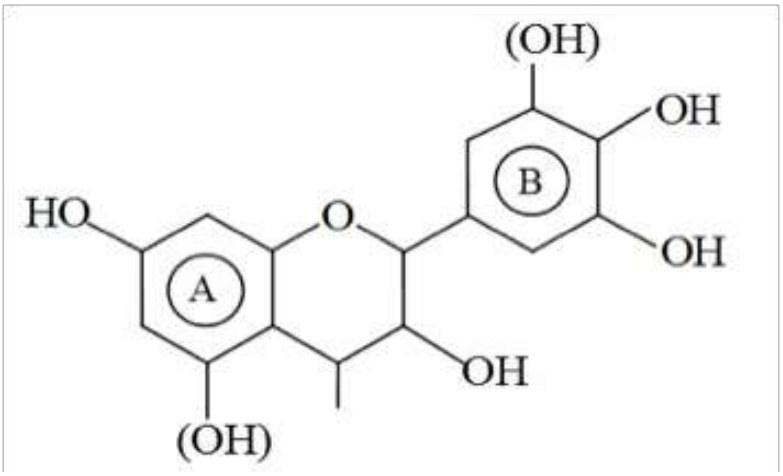
Chang (2000), em estudo conduzido sobre taninos em madeira de *Eucalyptus urophyllae* de *Eucalyptus grandis*, menciona que os mesmos apresentaram os taninos hidrolisados (galotaninos e elagitaninos), condensados e também flavonóides.

4.1 Taninos condensados

Os taninos condensados são polifenóis que possuem um esqueleto de carbono do tipo C6C3C6. São conhecidos também como proantociadininas e responsáveis pelas características de adstringência e precipitação de proteínas. Os taninos condensados são formados por unidades de flavonóide (flavan 3-4 diol (leucoantocianidinas) e flavan 3-ol (catequina)) em vários graus de condensação (PEÑA et al., 2006), o que depende do tipo e da origem do tanino, não sofrem hidrólise e se precipitam com formaldeído e ácido clorídrico, segundo a reação de Stiasny (WISSING, 1955). De acordo com Monteiro et al. (2005), as proantocianidinas são assim denominadas provavelmente pelo fato de apresentarem pigmentos avermelhados da classe das antocianidinas, como cianidina e delfinidina, e porque apresentam uma rica diversidade estrutural, resultante de padrões de substituições entre unidades flavânicas, da diversidade de posições entre suas ligações e da estereoquímica de seus compostos. De acordo com Schofield et al. (2001), este tipo de tanino é dificilmente avaliado e identificado devido à complexidade estrutural de seus componentes.

A estrutura flavonóide que constitui o monômero principal dos taninos condensados é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Estrutura do flavonóide de tanino condensado.



Fonte: Pizzi (1994).

Os taninos quando reagidos com formaldeído para confecção de adesivos produzem uma polimerização através de pontes metilênicas nas moléculas do flavonóide, em posições específicas no anel A.

As principais fontes de taninos condensados do tipo catequim são as madeiras de quebracho (até 25%), de carvalho (até 15%), de *Eucalyptus astringens* (até 50%), de castanheira e as cascas (e madeira) de acácia (até 40%), mas estes polifenóis também ocorrem nas cascas de outras espécies de eucalipto e bétula. Apesar de não serem todas exploradas comercialmente, Pizzi (1983), cita os gêneros Tsuga, Pseudotsuga, Rhus e as espécies de *Pinus radiata, Pinuselliotii, Pinustaeda, Pinus aleppensis, Pinus sylvestris, Pinus patula* e *Pinus pinaster.*

A casca da espécie *Acacia mearnsii* apresenta, aproximadamente, 70% de seus taninos formados por flavonóides cujo anel A é resorcinólico e o anel B pirogalol, além de que cerca de 25% dos taninos também possuem o anel A resorcinólico e o anel B catecol (PIZZI, 1994). Nas folhas e cascas mais novas de acácia ocorrem taninos constituídos de flavonóides, cujo anel A é floroglucinólico e anel B pirogalol e, ainda, anel A floroglucinólico e anel B catecol.

Nas moléculas de tanino condensado, o anel A das unidades flavonóides mantém um centro nuceofílico altamente reativo, sendo a outra parte da unidade flavonóide responsável pelas pontes interflavonóides.

Nos taninos de pinus apenas dois modelos polifenólicos são encontrados. O primeiro é representado pelo anel A florogluinólico e anel B fenólico (PIZZI, 1983). De acordo com Pizzi (1994), essa estrutura torna-se mais reativa com o formaldeído do que com aquelas resorcinólicas, por exemplo no caso da *Acacia mearnsii*, o que é importante quando se pensa na formulação de adesivos.

Segundo Gonçalves e Lelis (2009), os taninos condensados são utilizados como substitutos de resinas sintéticas devido à sua característica de precipitar-se com formaldeído, formando assim um polímero de estrutura rígida. Ayrilmis et al. (2009) também ilustram que o tanino condensado, devido à sua natureza de fenólica, pode reagir com formaldeído presente na resina uréica, podendo, assim, reduzir a emissão de formaldeído nos processos de colagem da madeira e suas variações.

Os extrativos da casca de *Acacia mearnsii* e da madeira do *Schinopsis* sp são os mais importantes taninos condensados produzidos industrialmente. Os taninos condensados constituem mais de 90% da produção mundial de taninos comerciais ultrapassando a marca de 350.000 t ano^{-1} (GUAN-

GCHENG et al., 1991). A Tabela 1 ilustra o rendimento em taninos condensados a partir da casca ou cerne de algumas espécies florestais.

Tabela 1 - Famílias e respectivos rendimentos médios (%) em taninos condensados de algumas espécies florestais.

Família	Espécie	Local de avaliação	Rendimento (%)
Anacardiaceae	*Schinopsis balansae*	(cerne)	23
	Schinopsis lorentzii		15
Fagaceae	*Castanea sativa*	(casca)	11
	Quercus robur		14
Leguminosae	*Acacia catechu*	(casca)	15
	Acacia mearnsii		37
	Acacia parramatensis		42
	Robinia pseudoacacia		7
Myrtaceae	*Eucalyptus astringens*	(casca)	45
	Eucalyptus wandoo	(casca e cerne)	13
	Eucalyptus sideroxylon	(casca)	50
Pinaceae	*Picea abies*	(casca)	13
	Pinus sylvestris		16
	Larix decidua		14
Rhizoporaceae	*Rhizophora candelaria*	(casca)	27
	Rhizophora mangle		25

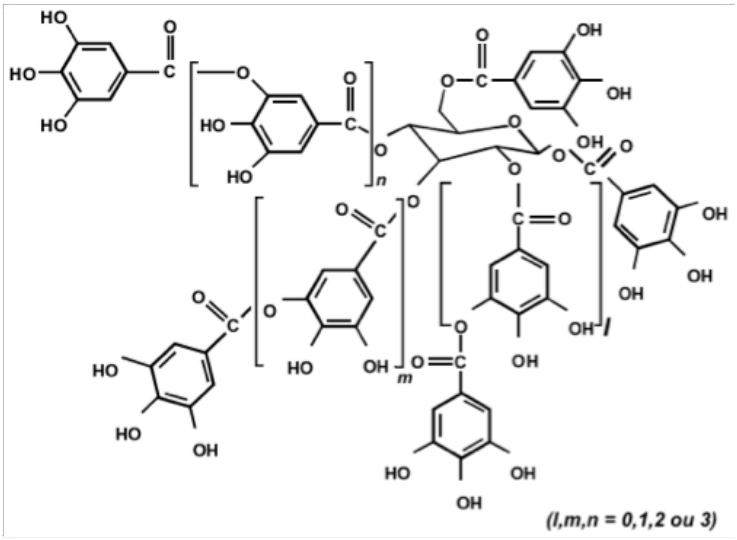
Fonte: Modificado de Haslam (1966).

A qualidade da colagem com taninos é influenciada pelos componentes químicos não fenólicos contidos nos extrativos, como, por exemplo, nos açúcares, pectinas e aminoácidos (COPPENS et al., 1980; WEISSMANN, 1985). Esta qualidade é dependente dos produtos químicos utilizados na extração (GONÇALVES, 2000), principalmente dos teores de sais como os sulfitos. Alguns componentes químicos, como açúcares presentes nos extrativos, podem, de acordo com Hillis (1981), influenciar o comportamento da viscosidade da resina.

4.2 Taninos hidrolisáveis

Os taninos hidrolisáveis estão presentes em folhas, galhos, cascas e madeiras de várias árvores, tais como Terminalia, Phyllantus e Caesalpina, dentre outros gêneros. Para Metche (1980), os taninos hidrolisáveis podem ser considerados como poliésteres da glucose, podendo ser classificados em duas categorias: (a) os galotaninos, que por hidrólise ácida liberam o ácido gálico e seus derivados; e (b) os elagitaninos, que por hidrólise liberam o ácido elágico e ácido valônico, sendo o ácido elágico o mais importante. Os taninos hidrolisáveis são unidos por ligações éster-carboxila, sendo prontamente hidrolisáveis em condições ácidas ou básicas (HAGERMAN; BUTLER, 1981). A unidade básica estrutural desse tipo de tanino é um poliol, usualmente D-glucose, com seus grupos hidroxilas esterificados pelo ácido gálico (galotaninos) ou pelo hexadihidroxifênico (elagitaninos). A Figura 2 mostra a estrutura química do ácido tânico (tanino hidrolisável).

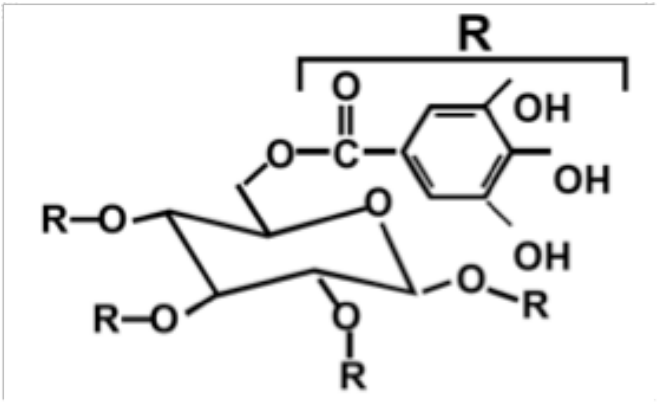
Figura 2 - Estrutura química de tanino hidrolisável.



Fonte: Nakamura et al. (2003).

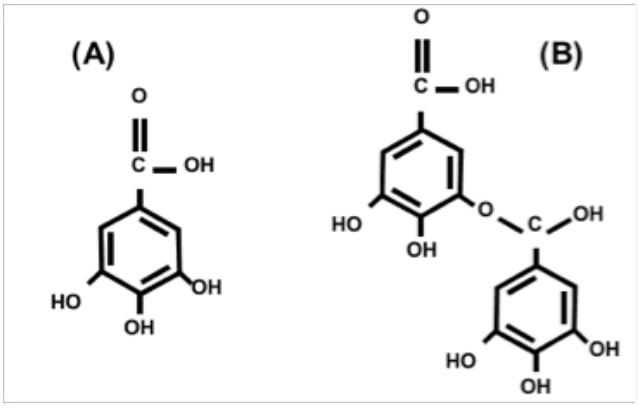
A Figura 3 mostra a estrutura química dos galotaninos. Os grupos fenólicos que esterificam o núcleo glicosídico são constituídos por ácido gálico (ou galoil), seu dímero ou um oligômero (Figura 4). As moléculas são usualmente compostas de um núcleo de glicose e 6 a 9 grupos galoil. O mais comum dos galotaninos é o ácido tânico (PINTO, 2003).

Figura 3 - Estrutura molecular de galotaninos



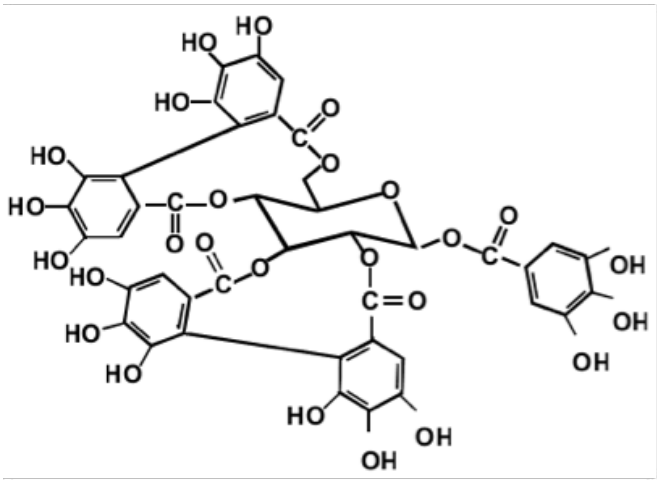
Fonte: Bath et al. (1998).

Figura 4 - Estruturas moleculares dos ácidos gálico (A) e digálico (B).



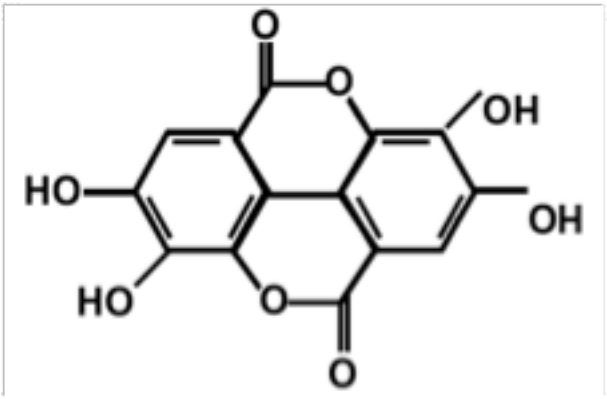
Fonte: Bath et al. (1998).

A Figura 5 mostra a estrutura molecular de elagitaninos. Nesta classe de taninos, os grupos fenólicos utilizados são moléculas de ácido hexahidroxidifênico, que pode espontaneamente se reidratar para formar sua dilactona estável, o ácido elágico, conforme mostra a Figura 6.



Fonte: Bath et al. (1998).

Figura 6 - Estrutura molecular do acido elágico.



Fonte: Bath et al. (1998).

O ácido tânico é um típico tanino hidrolisável, que é quebrado por enzimas a glicose e ácido gálico (HELBIG, 2000). O Quadro 1 apresenta os taninos hidrolisáveis que são sintetizados por uma ampla variedade de vegetais e árvores e muitos desses têm sido usados como alimentação animal (HARVEY, 2001).

Quadro 1 - Ocorrência de taninos hidrolisáveis em vegetais e árvores.

Família	Espécie	Tipo
Anacardiaceae	*Rhus* sp	Galotaninos, elagitaninos
Leguminosae	*Caesalpinia* sp	Galotaninos, elagitaninos
	Acacia sp	Galotaninos, catequina
Fagaceae	*Quercus* sp	Galotaninos, elagitaninos
	Castanea sp	Elagitaninos
Combretaceae	*Terminalia* sp	Elagitaninos
Myrtaceae	*Eucalyptus* sp	Elagitaninos

Fonte: Modificado de Harvey (2001).

Os taninos hidrolisáveis apresentam um baixo caráter nucleofílico, uma baixa reatividade com o formaldeído, além de possuir uma baixa produção mundial e apresentar um comportamento químico similar aos fenóis substituídos (PIZZI, 1994). Podem também ser utilizados como substitutos parciais do fenol na fabricação de adesivos à base de fenol-formaldeído.

São exemplos de plantas que possuem taninos hidrolisáveis *Stryphynodendron adstringens* (barbatimão), *Maytenusi licifolia* (espinheira santa), *Phyllanthus ninuri* (quebrapedra) e *Eugenia uniflora* (pitangueira). Hergert (1989) mencionou que o grupo dos taninos hidrolisáveis é encontrado em extratos de cascas e madeiras das árvores de Terminalia e Caesalpina, os quais são constituídos de misturas de fenóis simples, como pirogalol e ácido elágico, e também de ésteres do ácido gálico ou digálico com açúcares, principalmente glucose.

5. Hidrólise de taninos

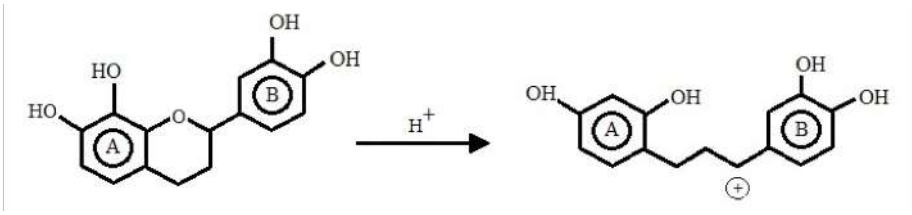
A aplicação da hidrólise para produção de adesivos à base de taninos permite reduzir sua viscosidade através da hidrólise das gomas hidrocoloidais de alto peso molecular e dos açúcares, permitindo, desta forma, o rompimento das ligações interflavonóides e a abertura do anel heterocíclico da unidade flavonóide (PIZZI, 1983).

Na prática, se produz adesivos por hidrólise ácida, alcalina (refluxo alcalino) e ácida seguida de alcalina. De acordo com Keynert e Wolf (1984), para a hidrólise ácida dos taninos normalmente são utilizados anidrido acético e ácido acético e, para a alcalina, o hidróxido de sódio, na maioria das vezes sob refluxo.

Bisanda (2003) hidrolisou os taninos das cascas de acácia com 33% de hidróxido de sódio sob agitação por um período de 3 horas, a uma temperatura de 90°C, produzindo em seguida chapas de partículas utilizando casca de café. Os valores para absorção de água e inchamento foram menores para aquelas chapas coladas com taninos hidrolisados em relação às chapas coladas com ureia-formaldeído.

Para Sowunmi et al. (2000), a hidrólise ácida (Figura 7) tem sido aplicada para quebrar as ligações interflavonóide e também abrir o anel heterocíclico, ocorrendo assim a formação de um 'carboncátion' com capacidade de reagir com outros nucleofílicos presentes.

Figura 7 - Mecanismo de hidrólise ácida dos taninos.



Fonte: Sowunmi et al. (2000).

Após tratamento com anidrido acético e posterior tratamento alcalino, Pizzi e Stephanou (1998 apud CARNEIRO, 2006), afirmam a ocorrência de uma melhora na performance dos adesivos à base de taninos de mimosa não fortificado. Os autores sugeriram o acontecimento das seguintes reações: a) abertura do anel heterocíclico ligado ao anel (A e B) da unidade flavonóide (Figura 1), formando compostos mais

flexíveis, reduzindo a rigidez da molécula de tanino e, por consequência, uma redução da fragilidade dos adesivos; b) clivagem das ligações interflavonóides, resultando em flavonóides menores; e c) hidrólise das gomas hidrocoloidais, que são hidrofóbicas e muito viscosas, até mesmo em baixas concentrações.

Carneiro et al. (2002) produziram adesivos tânicos de eucalipto a partir de taninos hidrolisados com ácido acético e verificaram que a viscosidade do adesivo foi reduzida a níveis aplicáveis para chapas de aglomerado, com valores de resistência à tração perpendicular superior ao mínimo exigido por normas internacionais.

Mori (2000) verificou que os adesivos de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urophylla* ficaram com viscosidade menor após a reação de sulfitação e hidrólise ácida, viscosidade esta comparada com a dos adesivos à base de taninos obtidos de acácia-negra. Esta diminuição na viscosidade melhorou a reatividade dos taninos diante do paraformaldeído e também a aplicabilidade deste adesivo na madeira. Carneiro (2002), estudando tempo de reação, porcentagem de sulfito anidro e pH, verificou que os adesivos de taninos de eucalipto com pH igual a 2 apresentaram os piores resultados, enquanto os adesivos produzidos com pH igual a 3 melhoraram as propriedades dos adesivos.

A hidrólise, de acordo com Sowunmi et al. (2000), faz com que o componente flavonóide passe a ter um menor tamanho molecular. Assim, as moléculas ficam com maior mobilidade e os extratos tânicos ficam livres de gomas, o que reduz a viscosidade dos adesivos, aumentado a resistência da umidade. Consequentemente, a adesão química torna-se mais eficiente entre as moléculas polifenólicas e o agente ligante, formaldeído ou paraformaldeído (SOWUNMI et al., 2000).

Mori (2000) determinou o peso molecular após sulfitação e hidrólize ácida de taninos extraídos das cascas de Eucalyptus grandis, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urophylla*, extraídos com água e 3% de sulfito à temperatura de 70ºC durante três horas. O autor verificou que, para as três espécies estudadas, a reação de sulfitação diminuiu o peso molecular quando os taninos foram submetidos a uma reação de sulfitação e hidrólise ácida. O mesmo autor verificou que os polímeros de taninos da casca das três espécies de eucaliptos são polidispersos, ou seja, os polímeros que constituem os taninos apresentam cadeias de comprimentos diferentes.

Sowunmi et al. (2000) hidrolisaram os taninos de cascas de árvores de mangue com hidróxido de sódio a 33% por um período de 1 a 5 horas, mantendo-se o pH em valor próximo de 8. Outro tratamento foi a hidrólise com ácido acético por um período de 1 a 3 horas. Estudaram-se os parâmetros cinéticos a partir da técnica de DSC (calorimetria diferencial exploratória). O estudo foi realizado para comparar a efetividade da extensão da hidrólise dos taninos, monitorando a resposta de cura relativa da reação do formaldeído com os taninos hidrolisados e não hidrolisados, sendo verificado que a energia de ativação dos taninos hidrolisados foi menor que a energia de ativação dos taninos não hidrolisados.

6. Principais aplicações dos taninos

No passado, os taninos eram empregados somente para o curtimento de couros. Atualmente, são também empregados na perfuração de poços de petróleo e na fabricação de adesivos, sendo também úteis como antioxidantes e produtos farmacêuticos, o que demonstra sua potencialidade como matéria-prima para inúmeras utilizações.

6.1 Curtimento de peles de animais

A aplicação mais antiga dos taninos vegetais consiste no curtimento de peles de animais (*tanning*) (SLABBERT, 1992; COVINGTON, 1997), aproveitando a sua capacidade de complexação e polimerização com proteínas, nomeadamente o colagénio das peles, para conferir resistência e impermeabilização a estas, de forma a obter couro. Os extratos de taninos naturais são aplicados desde a antiguidade nesta atividade. A preferência inicial em relação aos taninos do tipo hidrolizável foi provavelmente ditada pela sua disponibilidade local e a sua adstringência relativamente baixa em comparação com os taninos condensados. No entanto, com o advento da industrialização e devido às necessidades cada vez maiores de matérias-primas de modo a fazer face a produções crescentes, foi dada uma maior ênfase à aplicação de taninos condensados (PIZZI, 1983). Este fato deve-se, essencialmente, à grande abundância de fontes ricas em taninos condensados, tanto a partir de florestas naturais como de políticas de reflorestamento industrial, e do desenvolvimento de processos de curtimento que permitiram que os problemas relacionados com a adstringência elevada fossem ultrapassados.

Os extratos economicamente mais importantes para aplicação no curtimento são os de casca de acácia, de cerne de quebracho e de casca de castanheiro. O extrato de casca de pinheiro, que apresenta uma estrutura essencialmente floroglucinólica, confere uma cor avermelhada ao couro, podendo proporcionar propriedades diferentes das dadas pelos outros extratos.

6.2 Preservação de madeira

Quanto ao uso de taninos em tratamentos para preservação de madeira, Shimada (1998) afirma que os taninos possuem propriedades germicidas. Assim, acredita-se que sejam grandes responsáveis pela durabilidade natural de algumas madeiras. Porém, sua baixa toxicidade relativa impede seu uso como preservativo na própria madeira, podendo ser usado como fixante de biocidas devido às suas excelentes propriedades de adesão. A co-impregnação em um tratamento com cobre, zinco e boro com taninos já foi examinada e a madeira tratada satisfez o padrão de proteção europeu contra putrefações (SCALBERT et al., 1998). O uso de ácido bórico e extrato de taninos em um processo de fixação também foi estudado, comprovando serem os taninos substâncias importantes no processo de preservação (THEVENON et al., 1998). Isto mostra o interesse que ainda é gerado pelos taninos e suas múltiplas aplicações. Segundo Matamala (1989), os taninos extraídos da casca de *Pinus radiata* podem também ser utilizados como anticorrosivos e inibidores de ferrugem.

6.3 Propriedades farmacológicas

O uso de medicamentos com taninos está relacionado às suas propriedades adstringentes, sendo empregado como antidiarréico, antisséptico e cicatrizante na proteção da pele e mucosas (MONTEIRO et al., 2005).

Ao precipitar proteínas, os taninos propiciam efeito antimicrobiano e antifúngico. Ainda são hemostáticos e, como precipitam alcalóides, podem servir de antídoto em casos de intoxicações (BRUNETON, 2001).

Outras atividades atribuídas aos taninos, como ação bactericida, fungicida, antiviral e moluscicida (BRUYNE et al., 1999; BRUNETON, 2001) têm sido atribuídas, em parte, à capacidade de complexação ou à captação de radicais livres por parte dos taninos. Dessa forma, originam radicais

estáveis, inibindo a peroxidação de lipídios e outras substâncias (GUENDEZ et al., 2005). A eficácia como cicatrizante de feridas, queimaduras e inflamações da pele, assim como a proteção da mucosa em casos de úlcera gástrica, parece estar relacionada à formação de um complexo tanino-proteína ou tanino-polissacarídeo (MONTEIRO et al., 2005).

De forma geral, os taninos são inibidores enzimáticos devido à capacidade de se ligarem às proteínas. Os taninos inibem a 5-lipoxigenase, a enzima conversora de angiotensina, e as glicosil transferases de microorganismos implicados na formação das cáries e na inflamação da gengiva (BRUNETON, 2001).

Os taninos têm demonstrado ainda atividade contra o vírus da imunodeficiência humana – HIV. Os galotaninos demonstraram atividade inibitória somente em concentrações tóxicas. Os elagitaninos e taninos condensados inibiram fracamente a replicação viral e os taninos complexos mostraram potente atividade contra a replicação do HIV. Verificou-se que a atividade anti-HIV exibida por taninos é devida à inibição da transcriptase reversa, dificultando assim a replicação viral (KILKUSKIE et al., 1992).

Devido à capacidade de formar complexos com proteínas, outras macromoléculas e íons metálicos, os taninos também apresentam efeitos tóxicos. Estudos têm demonstrado efeitos nocivos em animais e humanos (LIAO et al., 2003; MONTEIRO et al., 2005). Em herbívoros, os taninos promovem efeitos negativos no apetite e na utilização de nutrientes devido à sua capacidade de precipitar proteínas, inibir enzimas digestivas e afetar a utilização de vitaminas e de sais minerais (SILANIKOVE et al., 2001; LIAO et al., 2003; MAKKAR, 2003; MONTEIRO et al., 2005). Existem estudos indicando a maior toxicidade dos taninos hidrolisáveis em relação aos taninos condensados. Isso ocorre porque os taninos hidrolisáveis, como o ácido tânico, podem ser facilmente degradados nos sistemas biológicos e os produtos da hidrólise podem chegar a órgãos como fígado e rins. Os taninos condensados não são hidrolisados nos sistemas biológicos e, portanto, não chegam à corrente sanguínea (LIAO et al., 2003).

6.4 Taninos para tratamentos de água

De acordo com Silva (1999), o tanino forma sais complexos com todos os metais, tendo assim a propriedade de um polímero, posteriormente um floculante. A obtenção de polímeros adequados para uso em tratamento de água e esgoto necessita de características como solubilidade em água, propriedades eletrolíticas e peso molecular adequado. Os grupos condensadoss unem-se mais aos cátions metálicos, como íons férricos, formando quelatos, que se caracterizam pela sua estabilidade e propriedades redutoras, além de seus extratos possuírem um caráter ácido. Isto permite a diluição do metal existente nas camadas de óxidos superficiais para a formação dos quelatos.

A grande vantagem dos taninos vegetais é possuir a propriedade de adsorver metais dissolvidos em água, aglutinando-os por precipitação no meio. Além disso, eles podem eliminar ou diminuir a toxidez existente na água oriunda de fontes como cianofíceas ou bactérias clorofiladas (SILVA, 1999).

6.5 Taninos na estabilização da cerveja

A cerveja é um produto de origem vegetal, suscetível a alterações em sua composição e estabilidade físico-química e que contém gás carbônico (CO2), álcool etílico, diversos sais inorgânicos e, aproximadamente, 800 compostos orgânicos. Um método para reduzir a concentração protéica na cerveja é a utilização de ácido tânico (tanino hidrolisável). A quantidade de ácido tânico a ser dosada depende de vários parâ-

metros, tais como as matérias-primas empregadas, o conteúdo de proteínas ácidas, o número de células de levedura, o tempo de maturação e temperatura, o teor de oxigênio e as especificações de qualidade (tempo de prateleira - *shelf life*, estabilidade contra turvação e estabilidade organoléptica). O objetivo é reduzir a concentração de proteínas através de precipitação como complexos tanino-proteicos, que são retirados da cerveja através de sedimentação ou centrifugação/filtração (REINOLD, 1997).

7. Taninos na produção de adesivos

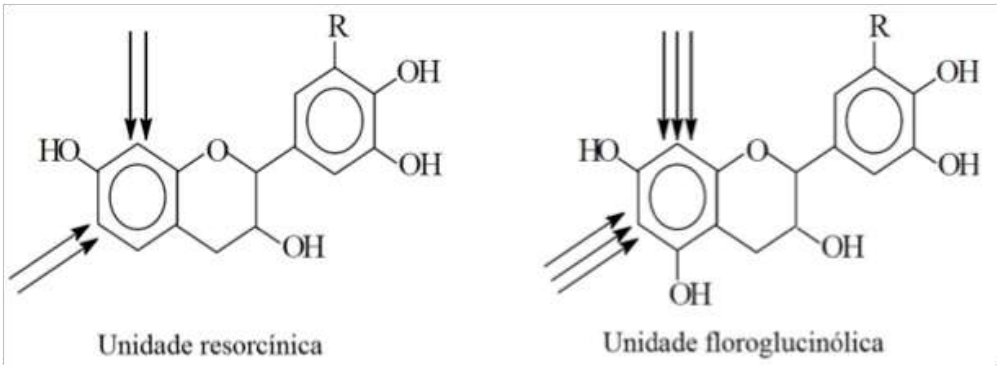
O tanino representa um dos melhores substitutos para as colas fenólicas porque o adesivo dele derivado é também resistente à umidade. Desde a década de oitenta o interesse no emprego de polifenóis naturais (taninos) como adesivos em chapas de madeira aglomerada e compensados vem crescendo efetivamente. Isso se dá em razão da grande rapidez com que os polifenóis se ligam ao formaldeído, possibilitando, assim, a sua utilização na indústria de painéis de madeira sob condições normais de colagem e prensagem (PRASETYA; ROFFAEL, 1991).

Do ponto de vista acadêmico, inúmeras são as pesquisas com taninos visando colagem em compensados (SANTANA; BAUMANN, 1996; MOUBARIK et al., 2009), aglomerados (GONÇALVES et al., 2008; CARNEIRO et al., 2009; MOUBARIK et al., 2010), OSB (TEODORO, 2008; VIEIRA, 2010) e madeira sólida (TEODORO; LELIS, 2005).

Os taninos constituem uma fonte renovável de menor custo de obtenção e toxicidade e são empregados na substituição do fenol ou outros compostos sintéticos em processos de colagem com madeira (PIZZI, 2003). Segundo Carneiro et al. (2004), isto pode favorecer bastante a solução de problemas ambientais no que se refere à utilização das cascas pelas indústrias madeireiras através da extração de taninos.

Os adesivos à base de taninos, conhecidos como tanino-formaldeído, são obtidos por reação de flavonóides poliméricos naturais com formaldeído. Estes compostos reagem com o aldeído para produzir uma polimerização por meio de pontes metilênicas nos carbonos C6 ou C8 do anel aromático A (Figura 1). Estas posições das unidades flavonóides constituem os sítios reativos com formaldeído em função do seu forte caráter nucleofílico (CARNEIRO et al., 2001; PIZZI, 2003). A Figura 8 ilustra os dois tipos de unidades flavonóides componentes dos taninos, indicadas pelas setas que mostram os sítios reativos com o formaldeído.

Figura 8 - Posições de reação do formaldeído com as unidades flavonóides.



Fonte: Carneiro et al. (2001).

A velocidade de reação dos taninos condensáveis com o formaldeído é 10 a 15 vezes maior que a reação do fenol com formaldeído (PIZZI, 2003). Tal afinidade de reação, segundo Carneiro et al. (2001), favorece a produção de resina à base de tanino-formaldeído para utilização na fabricação de painéis de madeira. Por outro lado, esta reatividade ocorre a uma taxa de 10 a 50 vezes mais rápida do que quando se utiliza apenas adesivos químicos (KIM et al., 2003). Por causa desta característica, a emissão de formaldeído é menor quando se usa o fenol-formaldeído e ureia-formaldeído, por exemplo.

Os adesivos produzidos à base de taninos podem ter sua qualidade influenciada pelos componentes químicos não fenólicos, tais como açúcares, gomas, aminoácidos e pectinas, e também pelos componentes químicos utilizados na extração do tanino. Tais componentes influenciam na viscosidade da resina, reduz a vida útil e evita a formação de ligações cruzadas intramoleculares, diminuindo, assim, a resistência da linha de cola (PIZZI, 2003).

Normalmente, os taninos são obtidos através da extração da casca ou madeira em água, sendo que as condições de extração devem ser otimizadas para a produção de taninos com propriedades adequadas à síntese de adesivos. No processo de extração são adicionados sais inorgânicos como sulfito de sódio (Na^2SO^3), carbonato de sódio (Na^2CO^3) e bissulfito de sódio ($NaHSO^3$) (PIZZI, 1983). A extração aquosa de taninos condensados na presença de sulfito de sódio é chamada sulfitação, sendo especialmente adequada para a produção de extratos tânicos destinados à síntese de adesivos. Com a sulfitação, podem ser obtidos taninos mais solúveis em água e extratos com viscosidade mais baixa.

Uma pressuposição importante para o emprego de extrativos vegetais como adesivo para painéis de madeira é seu teor de componentes fenólicos reativos. Na determinação do teor de polifenóis emprega-se a reação de Stiasny, isto é, a precipitação dos taninos do tipo flavanol através de condensação com formaldeído em meio ácido.

A utilização dos extratos como adesivo só é possível se houver uma reação dos mesmos com um produto ligante (formaldeído, por exemplo), já que eles próprios não apresentam nenhuma capacidade de ligação. O formaldeído prende-se aos átomos de carbono do anel A sob a formação de grupos metilol. Esses grupos metilol são capazes de reagir promovendo a ligação entre as moléculas de tanino através da formação de grupos metilênicos (DIX; MARUTZKY, 1987).

Para obtenção de composições adesivas, os taninos condensados são normalmente misturados com paraformaldeído, formaldeído ou hexametilenotetramina. Até o momento da colagem, os taninos são estocados sob a forma de pó ou suspensões aquosas concentradas, permanecendo não reativos até que seja feita a mistura com o agente ligante ou endurecedor.

Além da reatividade, o grau de condensação dos taninos apresenta uma grande importância na fabricação de adesivos, já que influencia a viscosidade da solução com extratos e a ligação (entrelaçamento) das moléculas de tanino. O grau de condensação varia para as diferentes espécies, sendo também influenciado pela idade e local de crescimento das árvores.

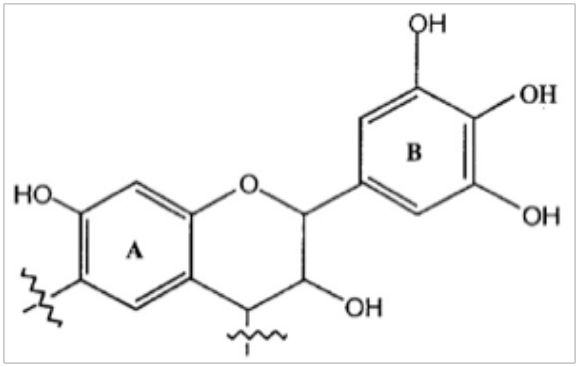
A qualidade da colagem com taninos é influenciada pelos componentes químicos não fenólicos presentes nos extrativos como açúcares, aminoácidos, pectinas, etc. (WEISSMANN, 1985; HILLIS, 1981). Esta qualidade também é influenciada pelos produtos químicos utilizados na extração (GONÇALVES, 2000).

Keinert e Wolf (1984) mencionam as seguintes técnicas para permitir que os adesivos à base de tanino tenham suas propriedades melhoradas: i) reduzir o tamanho das moléculas tânicas com

um pré-tratamento mediante refluxo alcalino; ii) sulfitar os taninos para melhorar a viscosidade do extrato tânico; iii) introduzir substâncias com características ligantes para conseguir uma melhor ramificação; e iv) substituir o formaldeído pelo paraformaldeído.

No Brasil, a produção de extratos tanantes vegetais é realizada a partir de casca da espécie *Acacia mearnsii* (Figura 9), com o nome comercial de Phenotan para fabricação de aglomerado, compensado, OSB (*Oriented strand board*) e MDF (*Medium density fiberboard*). É um produto que se apresenta na forma líquida (solução aquosa à 45 % de sólidos totais) ou na forma de um pó marrom (TANAC, 2010).

Figura 9 - Estrutura química do tanino de *Acacia mearnsii*.

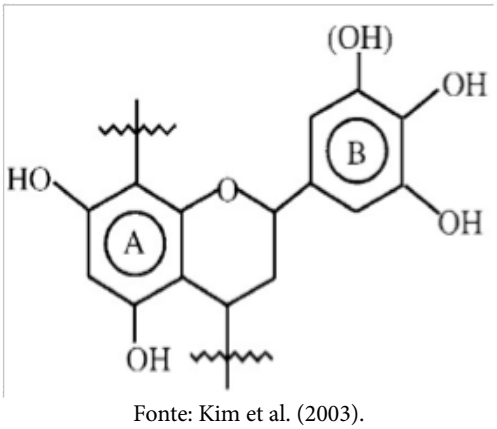


Fonte: Bisanda et al. (2003).

Adesivos à base de tanino são alvo de pesquisas já há bastante tempo. Gonçalves e Lelis (2009) avaliaram as modificações dos adesivos fenólicos e uréicos com uma solução de tanino a 50%, sendo que ambas as resinas avaliadas apresentaram comportamentos gerais diferenciados, destacando-se a resina com alto teor de formol livre aquela com menor viscosidade, mantendo-se inalterada em relação ao teor de sólidos, o que lhe pode conferir uma maior vida útil, além de preferível para formulação de adesivos para uso em painéis.

O tanino está presente predominantemente por meio de anéis aromáticos, na forma de resorcinóis nos anéis A e/ou pirogalol nos anéis B (Figura 1). As estruturas dos taninos possuem diferenças pequenas, mas importantes, entre as espécies. A Figura 10 ilustra a estrutura básica do tanino de pinus. A presença do anel nucleofílico é importante na reação com o formaldeído, o que permite a formulação de adesivos. Jorge et al. (2002) afirmam que a formulação de adesivos com taninos extraídos de pinus é dificultada por várias razões, entre elas o elevado peso molecular, o que causa uma elevação da viscosidade e uma baixa eficiência na reação com o formaldeído.

Figura 10 - Estrutura química do tanino de Pinus.



Fonte: Kim et al. (2003).

Os taninos presentes na casca de pinus, de forma geral, excetuando o *Pinus ponderosa*, apresentam unidades flavonóides nos anéis A e B. As demais espécies de pinus estudadas apresentam apenas dois tipos principais como unidades componentes dos taninos condensados. O tipo principal é representado por monoflavonóides com anel A floroglucinólico e anel B tipo catecol (catequina). O outro padrão (afzelequina), presente em pequenas quantidades, apresenta anel A floroglucinólico e anel B fenólico (PIZZI, 1983).

Os adesivos à base de tanino, como os extraídos de plantas de mangue, são substitutos potenciais para adesivos sintéticos derivados do petróleo, como o fenol-formaldeído nos processos de colagem da madeira (SOWUNMI et al., 2000), além, é claro, de ser um produto natural e renovável.

A seguir estão relacionadas algumas vantagens da utilização de resinas à base de tanino-formaldeído, conforme Dix e Marutzky (1982) e Roffael e Dix (1994 apud VIEIRA, 2010):

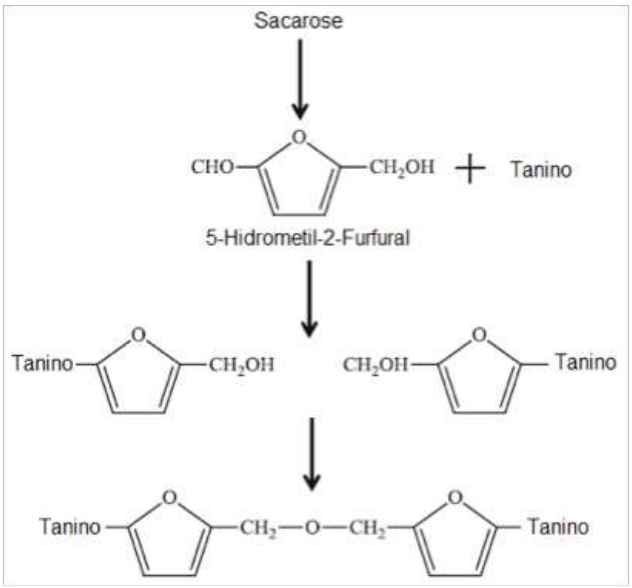
- Algumas resinas à base de tanino-formaldeído, como por exemplo tanino-quebracho-formaldeído, podem endurecer mais rápido do que a resina alcalina fenol-formaldeído. Dessa forma há um aumento da capacidade de produção na fabricação de painéis;

- As resinas tanino-formaldeído endurecem em meio levemente alcalino. Assim, os materiais de madeira colados com esta resina não contêm quase nenhum álcali;

- Na fabricação de painéis de madeira aglomerada, as partículas não precisam estar totalmente secas. Elas podem apresentar um teor de umidade entre 7 a 8%, o que significa economia de energia na fase de secagem;

- Os taninos são produtos extraídos de fonte natural e renovável existente em grande quantidade. O uso de tanino adicionado à sacarose (Figura 11) foi alvo de pesquisas de Zhao e Umemura (2014), nas quais foi demonstrado que a combinação de ambos pode ser aplicada na fabricação de painéis aglomerados de partículas para fins industriais com padrões aceitáveis, atendendo ao especificado na norma japonesa JISA590818. Há, porém, a necessidade de estudos complementares no que se refere à absorção de água.

Figura 11 – Possíveis reações entre o tanino e a sacarose.



Fonte: Alterado de Zhao e Umemura (2014).

8. Taninos na indústria madeireira

A utilização de adesivos químicos associados ao tanino, de acordo com Bisanda et al. (2003), promove a redução do chamado tempo de panela, pois ocorre uma cura do adesivo de forma mais rápida, o que, de certa forma, é vantajoso economicamente. Esta informação é condizente com o encontrado por Gonçalves et al. (2008) em seu estudo, no qual os autores adicionaram tanino modificado em diferentes proporções na resina ureia-formaldeído, fazendo com que o tempo de formação de gel fosse decrescente.

Pizzi e Sthepanou (1994) defendem a utilização de extratos tânicos provenientes da casca de pinheiro sem modificação como adesivos em aglomerados, levando em conta que a cura é baseada na condensação dos taninos e o pH ácido deste extrato ser uma característica determinante para obtenção de bons resultados. Adesivos produzidos somente com tanino evitam a emissão de formaldeído, apresentam boa tolerância à umidade e ciclos pequenos de prensa. Os taninos de casca de pinheiro ou da casca da noz pecã apresentam melhores resultados na formulação que taninos de casca de *Acacia mearnsii* e da madeira de quebracho (PIZZI et al., 1994). No caso do tanino com noz de pecã e casca de pinheiro, o substrato lenho celulósico funciona como catalisador induzido pelo pH, além disso, para taninos de quebracho e da casca de *Acacia mearnsii*, é necessária a adição de um catalisador (PIZZI et al., 1994).

Algumas pesquisas estão sendo desenvolvidas mediante a utilização de adição de outros produtos naturais ao tanino para fabricação de painéis com madeira reconstituída, como o trabalho realizado por Moubarik et al. (2009). Os autores adicionaram maisena ao tanino de quebracho na preparação do adesivo à base de fenol-formaldeído na confecção de compensado. Os resultados mostraram que o painel compensado confeccionado com tanino-maisena-fenol-formaldeído na proporção de 5:15:80 exibiu melhores propriedades mecânicas que a madeira compensada somente com adesivo fenólico puro. A introdução de pequenas quantidades de maisena e tanino à resina sintética também proporcionou melhorias em relação à absorção de água. Os autores ainda afirmam haver uma redução significativa na emissão de formaldeído nos compensados com este tipo de cola modificada.

Moubarik et al. (2010) avaliaram a eficiência do uso do tanino de *Acacia mearnsii* em compensados em misturas com adesivos comerciais, encontrando bons resultados. Produtos colados com adesivos à base de taninos ainda possuem a vantagem de redução da emissão do formaldeído, permitindo, assim, seu uso em produtos ecoeficientes.

A condensação do tanino com o formaldeído, através de bases ácidas ou bases alcalinas, resulta em um produto com boa formulação adesívica. Além das considerações financeiras, muitos adesivos de tanino limitam a aplicação industrial devido a algumas desvantagens gerais, tais como uma pobre adesão, uma rápida reatividade e, ainda, uma fragilidade pós-colagem (BARBOSA et al., 2000; SOWUNMI et al., 2000). Estas características indesejáveis podem surgir da dificuldade de formar ligações metilênicas cruzadas durante a cura com formaldeído. Sowunmi et al. (2000) ainda mencionaram que isto se deve a sua elevada reatividade e características estruturais.

Tostes et al. (2006) compararam as propriedades de flexão estática (módulo de ruptura e módulo de elasticidade), o inchamento em espessura e a absorção de água em chapas de partículas produzidas com adesivo fenol-formaldeído puro e modificado com 10% e 20% de tanino de *Eucalyptus*

pellita. Os resultados mostraram que a adição de extrato tânico ao adesivo fenólico não alterou significativamente a propriedade de flexão estática (Módulo de Ruptura – MOR e Módulo de Elasticidade – MOE). Por outro lado, a ligação interna e a estabilidade dimensional das chapas foram prejudicadas pela adição de tanino ao adesivo fenólico.

Vital et al. (2004) observaram o potencial de adesivos produzidos a partir de taninos de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus pellita* para a produção de chapas de flocos de madeira. Os resultados mostraram que os painéis produzidos com o adesivo à base de tanino apresentaram propriedades superiores ao mínimo exigido pela norma americana.

O aproveitamento de tanino da casca de *Eucalyptus pellita* foi estudado como substituto parcial da resina sintética ureia formaldeído em chapas de madeira aglomerada por Tostes et al. (2004). Os autores encontraram resultados satisfatórios nas propriedades físico-mecânicas das chapas contendo resina modificada a 10 e 20% de tanino.

Em estudo sobre a cinética de cura de adesivos à base de tanino de espécies de eucalipto, de acácia negra e fenol formaldeído por intermédio do processo de calorimetria diferencial exploratória, Mori et al. (2002) afirmaram que os adesivos de taninos provenientes do *Eucalyptus urophylla* é o mais apropriado para a colagem. Os autores ainda mencionaram que estes adesivos exigem menor tempo de prensagem, utilizando menor energia para o processo de polimerização.

Sowunmi et al. (2000) avaliaram, através da calorimetria diferencial exploratória, o potencial tânico em árvores de mangue mediante uso da cinética anidrido acético sucessiva e da hidrólise cáustica. Os resultados indicaram mudanças significativas no comportamento cinético de reação de tanino quando usado o paraformaldeído. Além disso, ocorreu a reatividade inicial e a gelatinização prematura do adesivo de tanino. Isto assegurou um aumento no calor de reação de cura, ocorrendo, ainda, a redução da energia de ativação pelo processo de hidrólise.

O teor de tanino extraído em água quente e em sequência de tolueno e etanol em 25 espécies de eucalipto foi estudado por Trugilho et al. (2003). De acordo com os autores, o último método de extração foi o que obteve melhores resultados, encontrando-se diferenças significativas entre as espécies. Dentre estas, o *Eucalyptus cloeziana* foi o que apresentou maior potencial como fonte de taninos, fornecendo resultados muito bons pelas duas formas de extração: 31% (sequência tolueno e etanol) e 40,31% (água quente). As extrações de taninos de *Eucalyptus tereticornis* e de *Eucalyptus paniculata* sob o método de sequência tolueno e etanol foram de 22,83% e de 17,64%, respectivamente, também consideradas promissoras.

Onifade (2001) encontrou teores de tanino em cascas de *Eucalyptus camaldulensis*, variando entre 5 a 12 %, utilizando solvente aquoso. O autor observou que a quantidade de taninos variou de acordo com a espessura e o volume da casca.

Ferreira (2004) avaliou o potencial de extração dos taninos da casca de oito espécies de pinus (*Pinus caribaea var. bahamensis, Pinus caribaea var. caribaea, Pinus caribaea var. hondurensis, Pinus elliotti var. densa, Pinus elliotti var. elliotti, Pinus kesiya, Pinus oocarpa e Pinus strobus var. chiapensis*) com água e água sob adição de sais de sulfito de sódio e carbonato de sódio para serem utilizados na confecção de adesivos para colagem de madeira. Os resultados mostraram que as cascas da espécie *Pinus oocarpa* apresentaram os maiores rendimentos em taninos, independente da

adição de sal, sendo assim a espécie de maior potencial de extração de taninos entre as estudadas.

Teodoro e Lelis (2005) estudaram a colagem de madeira sólida utilizando taninos de *Eucalyptus pellita* puro e adicionados ao tanino de *Acacia mearnsii*. Os resultados indicaram boas propriedades de colagem, demonstrando que podem ser utilizados na confecção de adesivos. A adição de extratos tânicos da casca de *Eucalyptus* ao extrato da acácia negra influenciou grandemente as propriedades químicas do tanino de acácia, não desfavorecendo sua qualidade. Destaca-se, assim, que é possível utilizar o tanino da casca de *Eucalyptus pellita* para colagem, a frio, de juntas de madeira.

Sartori (2012) menciona que em árvores com diâmetros à altura do peito entre 22,5 a 32,5 é a faixa mais indicada para produção de taninos visando adesivos, apresentado melhores rendimentos em taninos condensados (maiores valores para índice de Stiasny e menores valores de compostos não tânicos).

Silva (2012) afirmou que é possível substituir o adesivo fenol formaldeído por tanino de *Pinus* oocarpa em até 20% sem alterar os valores do módulo de ruptura paralelo e perpendicular à grã em compensados.

A Tabela 3 apresenta algumas das principais propriedades avaliadas em formulação com taninos e adesivos comerciais.

Tabela 3 - Propriedades dos principais adesivos químicos utilizados em processos de colagem em madeiras e painéis reconstituídos.

Adesivos	**Propriedades**					**Fonte**
	Viscosidade (cP)	**Tempo de Gel (seg)**	**Teor de Sólidos (%)**	**pH**	**Densidade (g ml^{-1})**	
TF*	>6.000,0	21,0	51,00	5,2	-	Vital et al. (2004)1
	1.526,0	-	54,20	4,4	-	Mori (1997)1
	150,0	557,0		4,2		Pizzi (1994)1
TF (50%)**	235,16	-	45,00	-	1,07	Gonçalves e Lelis (2009)2
TF (45%)	188,22	730,0	46,06	4,6	-	Teodoro e Lelis (2005)2 e 3
TF (45%)	826,50	62,0	45,87	3,9	-	Teodoro e Lelis (2005)2 e 3
UF	250,00	55,0	61,35	8,0		Vital et al. (2004)
	986,14	159,7	61,68	-	1,23	Gonçalves e Lelis (2009)
	380,00	132,0	64,74	7,5	-	Tostes et al. (2004)
	705,47	75,0	63,90	-	1,37	Gonçalves et al. (2008)
	524,45	124,0	76,93	8,0		Vieira (2011)
FF	540,00	2.178,0	48,80	11,3	-	Tostes et al. (2006)
	776,60	2.640,0	58,86	12,8	-	Vieira (2011)
	308,00	265,0	46,00	12,8	-	Mori (1997)

1*Eucalyptus grandis; 2Acacia mearnsii; 3Eucalyptus pellita*; *TF – Tanino formaldeído, UR – ureia-formaldeído, FF – Fenol-formaldeído; **Diluição do tanino em água destilada a 45 e 50%, respectivamente.

9. Considerações Finais

Técnicas que permitam uma avaliação aprofundada do tanino para utilização na indústria madeireira estão sempre sendo estudadas. Apesar dos avanços nos estudos deste ramo, ainda há dificuldades de sua implementação na rotina de algumas empresas, haja vista a própria dificuldade em se obter informações de cunho prático, quiçá técnico.

No entanto, novas oportunidades devem ser buscadas visando, sobretudo, a redução de custos operacionais e, ainda, a redução de elementos tóxicos ao ser humano, prevalecendo, desta forma, aqueles naturais como os taninos.

INTRODUÇÃO AO ESTUDO DA LIGNINA

Heber dos Santos Abreu – In memorian, Deise Amaral de Deus

1. Introdução

O termo lignina, originário do latim *lignum*, que significa madeira, foi originalmente proposto por F. Schulze em 1865 (ADLER, 1977) e tem sido utilizado para se referir a um grupo de substâncias que apresenta alta massa molecular natureza fenólica altamente insolúvel em água. Este grupo de substâncias não possui atividade ótica, sendo essencialmente amorfo e apresentando propriedades que marcam a evolução das plantas, o que contribui com as atividades fisiológicas (condução de água) das plantas e tem como principal papel a função de aglutinante entre células. Todas essas características contribuíram para a adaptação das plantas aquáticas ao ambiente terrestre há milhões de anos atrás (BARCELÓ, 1997; INOUE et al., 1998; MONTIES, 1989). Na madeira a lignina contribui com as propriedades de elasticidade, resistência a esforços de compressão, redução da permeabilidade e estabilidade dimensional (FENGEL; WEGENER, 2003).

Dentro da parede celular, as moléculas de lignina se entrecruzam com outras substâncias da parede celular numa espécie de rede de ligações, originando um sistema complexo multimolecular depositado sobre uma matriz de polissacarídeos. O polímero ou copolímero de lignina tem sido referido à macromolécula quando as mesmas são formadas por apenas um dos três precursores monolignóis, enquanto os copolímeros são formados por uma mistura desses precursores. A constatação de existência de polímeros e/ou copolímeros de lignina parece estar distante de uma prospecção prática. De uma forma geral, em alguns casos, pode-se lançar mão de métodos sofisticados como o ToF-SIMS, que gera íons secundários (ou íons voadores), Microscopia no UV (ultravioleta) e microscopia de Raman, entre outros métodos, que permitem observar os diferentes tipos de lignina em tecidos lenhosos (SAITO et al., 2012). Por outro lado, se utilizarmos métodos destrutivos para a análise, as ligninas apresentam-se como copolímeros.

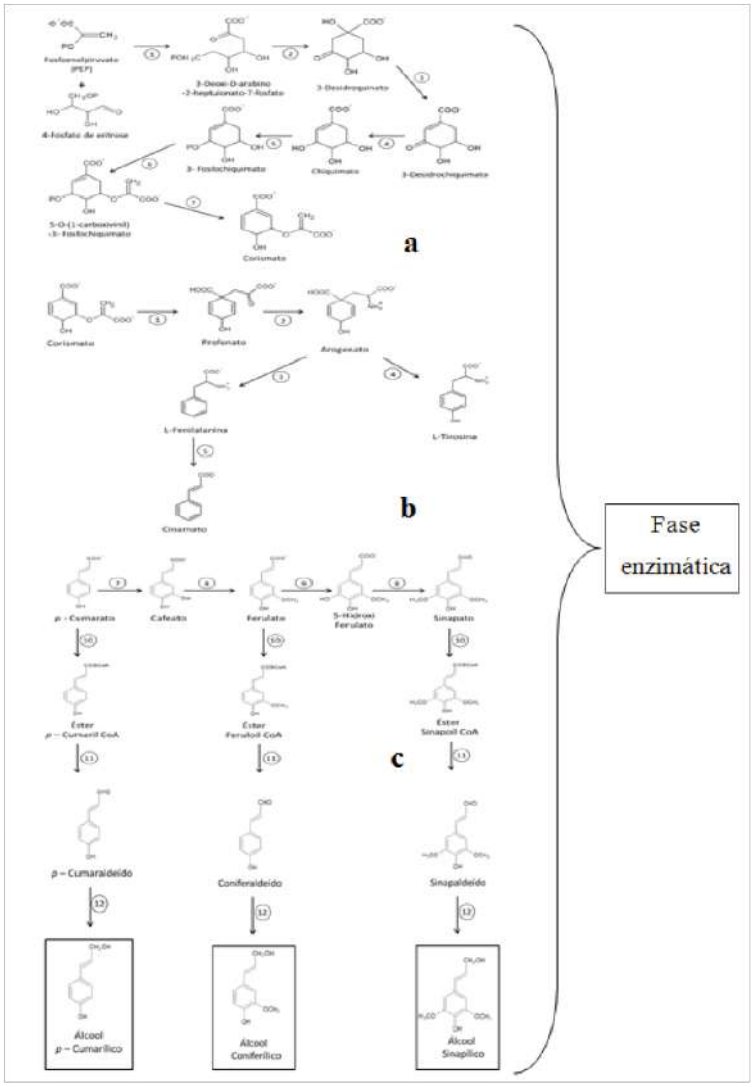
Recentemente, as ligninas têm se tornado as protagonistas na utilização da biomassa vegetal, principalmente para a produção de bioenergia (BRETHAUER; WYMAN, 2010; KLEINERT; BARTH, 2008b). Por outro lado, as ligninas conhecidas como lignosulfanatos, as quais são consideradas como subproduto da indústria de polpa celulósica (Processo *Kraft* e bissulfito), têm sido aproveitadas eficientemente em várias aplicações, tais como na área da construção civil, produtos químicos, adesivos, petróleo, farmácia, entre outras aplicações (BELGACEM; GANDINI, 2008; ROSA; HILLIG, 2014).

Neste capítulo, procuramos, de forma resumida, dar o máximo de informações aos estudantes, pesquisadores e professores de Engenharia Florestal, Engenharia Industrial Madeireira e áreas afins, com objetivo de introduzir conhecimentos básicos sobre lignina, de forma a ampliar a percepção da sua importância ao longo de todos os capítulos do livro. Assim, destacaremos neste texto alguns temas conceituais relevantes para essa magnífica substância.

2. Biossíntese

A origem biossintética da lignina inicia-se pela condensação dos açúcares 4-fosfato de eritrose com a substância ácido fosfoenolpirúvico que, em várias etapas biossintéticas, formam os metabólitos intermediários fenilpropanoídicos responsáveis por dar origem à lignina. A formação da lignina pode ser dividida em duas fases. A primeira fase ocorre dentro do citoplasma (Aparelho de Golgi ou retículo endoplasmático) e é denominada fase enzimática, na qual reações biossintéticas são mediadas por enzimas e levam à formação dos alcoóis *trans-p*-cumarílico, *trans*-coniferílico e trans-sinapílico, através dos quais ocorre a polimerização na parede celular (Figura 1a, b e c) (Figura 2) (PEREIRA et al., 2012).

Figura 1 - Sequência biossintética de formação da lignina (primeira fase, a, b e c) catalisada pelas seguintes enzimas: 1) Corismatomutase; 2) Prefenato aminotransferase; 3) Arogenatodesidratase; 4) Arogenato desidrogenase; 5) Fenilalanina amonialíase (FAL); 6) Cinamato-4-hidroxilase (C4H); 7) Cumarato-3-hidroxilase (C3H); 8) O-Metiltransferase (OMT); 9) Ferulato-5-hidroxilase (F5H); 10) 4-Cumarato-CoA ligase (4CL); 11) Cinamoil-CoAredutase (CCR); 12) Cinamil Álcool desidrogenase (CAD).

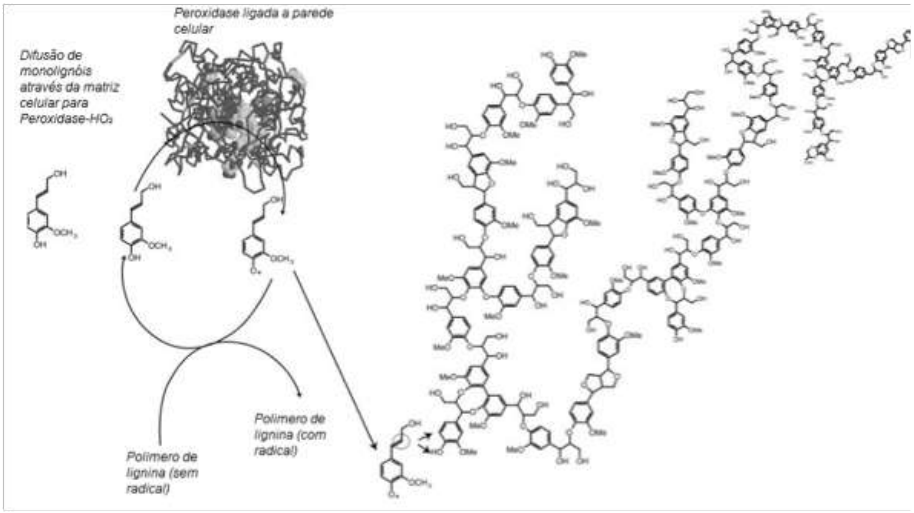


Fonte: Lewis e Sarkanen (1998) e Whetten e Sederoff (1995).

As Figuras 2 e 3 descrevem a segunda fase da formação da lignina, na qual a enzima peroxida-

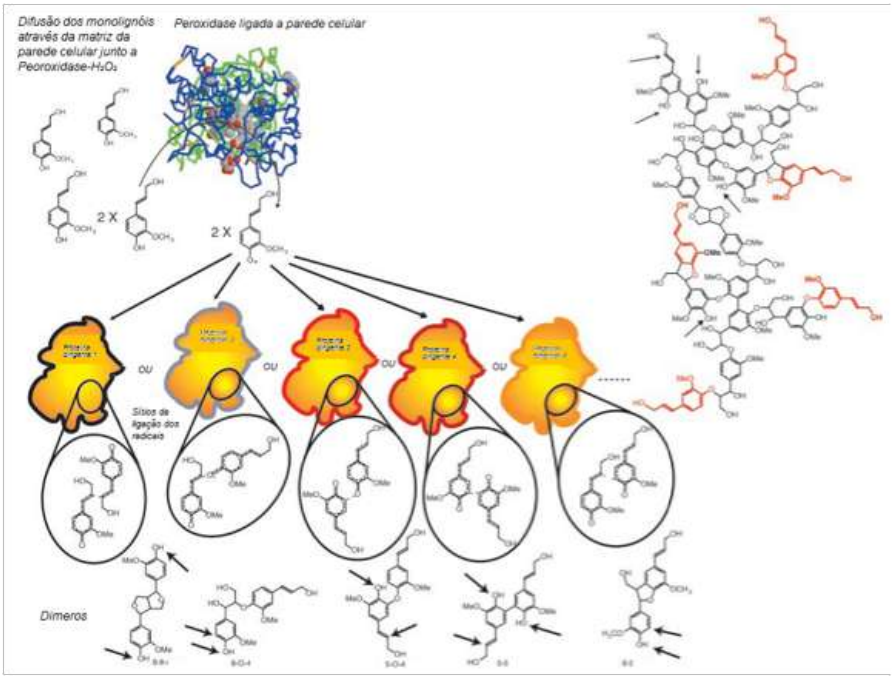
se-H2O2 promove a oxidação desidrogenativa com a formação do radical fenóxido e suas respectivas estruturas canônicas. Para a maioria dos pesquisadores, o acoplamento entre os radicais ocorre ao acaso, ou melhor, sem qualquer controle de natureza bioquímica, entretanto, outros acreditam na participação de proteínas (proteínas dirigentes) ou de proteínas estruturais que funcionam como centro de nucleação (HATFIELD; VERMERRIS, 2001; LEWIS; SARKANEN, 1998).

Figura 2 - Segunda fase de formação da lignina: Proposta de formação da lignina junto à Peroxidade-H2O2 via acoplamento ao acaso entre radicais e não radicais.



Fonte: adaptado de Hatfield e Vermerris (2001).

Figura 3 - Segunda fase de formação da lignina: Proposta de formação da lignina junto à Peroxidade-H2O2 via acoplamento mediado por proteínas dirigentes.

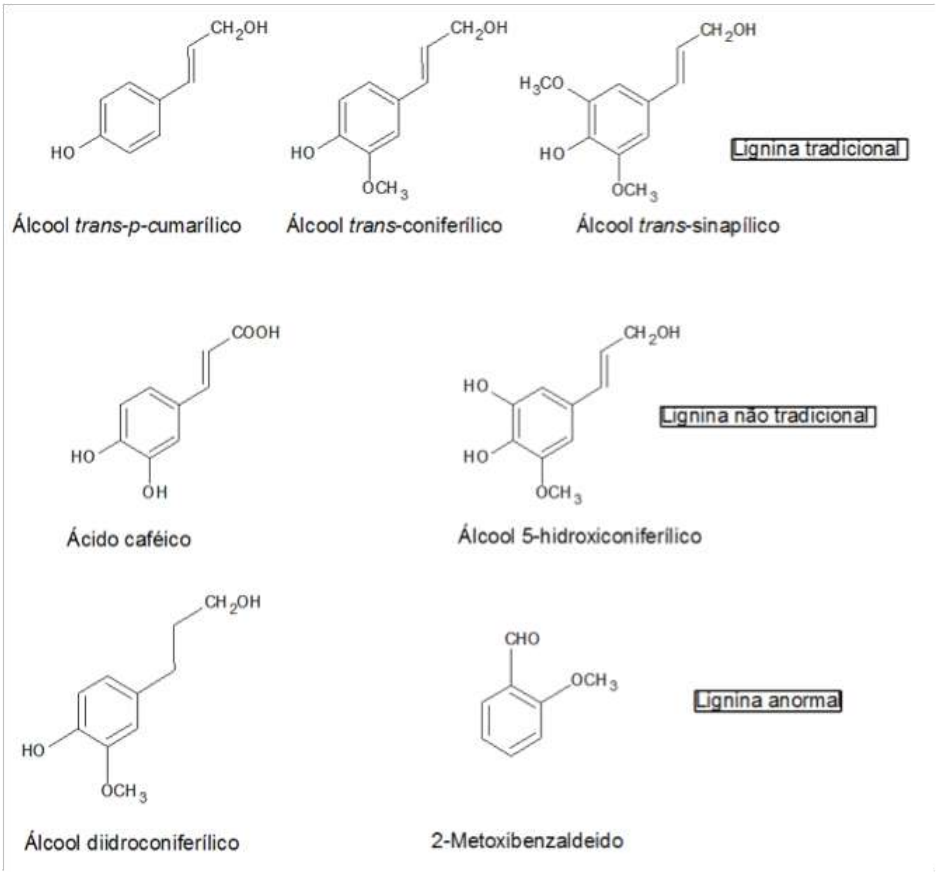


Fonte: adaptado de Hatfield e Vermerris (2001).

Os monolignóis precursores da lignina, álcoois cumarílico, coniferílico e sinapílico, têm sido considerados majoritários na formação da lignina, embora outros precursores possam par-

ticipar da biossíntese da lignina ou até mesmo prevalecer, como é o caso do ácido caféico que ocorre nas ligninas de sementes de algumas orquídeas (*Vanilla planifolia, Vanilla pompona* e *Vanilla tahitensis*) e de algumas plantas da família Cactaceae, em que, no primeiro caso, a lignina é formada integralmente por esse ácido, dando origem à lignina C (rica em ácido caféico) (CHEN et al., 2012; 2013). Atualmente, a composição da lignina tem sido descrita de forma variável. A Figura 4 mostra as unidades entendidas como majoritárias das ligninas tradicionais e as unidades complementares das ligninas não tradicionais e das ligninas de plantas geneticamente modificadas ou que sofreram mutações genéticas, denominadas ligninas anormais (RALPH et al., 1997; SEDEROFF et al., 1999).

Figura 4 - Precursores de lignina. Na primeira carreira (álcool cumarílico, coniferílico e sinapílico) são os monolignóis majoritários; na segunda carreira são os constituintes das ligninas não tradicionais de sementes de algumas orquídeas (*Vanilla planifolia, Vanilla pompona e Vanilla tahitensis*) e plantas da família Cactaceaae e na terceira carreira encontram-se os constituintes da lignina anormal de *Pinus taed* L.



Fonte: Ralph e Hatfield (1997).

3. Estrutura e principais grupos funcionais

As ligninas, como mostrado anteriormente, diferem-se pela sua composição (heterogeneidade) em relação às unidades majoritárias que as compõem. Entretanto, essas diferenças se revelam, principalmente, pela presença de determinados grupos funcionais. Supondo a existência

de ligninas constituídas apenas por unidades cumarílicas (H), guaiacílicas (G) ou siringílicas (S), essas ligninas possuiriam um teor de metoxila em relação à sua massa molecular, respectivamente de 0,0%, 17,22 e 29,52%, ou seja, a lignina cumarílica possuiria 0,0 OMe/C9, 1 OMe/C9 e 2 OMe/C9, respectivamente. Outros grupos funcionais também estão presentes na lignina. São eles os grupos aldeídicos; ácidos; hidroxílicos alifáticos e fenólicos; e os grupos éteres e ésteres, sendo este último comum em ligninas de monocotiledôneas (Quadro 1).

Quadro 1 - Ocorrência dos principais grupos funcionais na lignina.

OH-Pri	OH-Sec	OH-Fen
58,%	18,6%	22,8
HC=O	**C=O não conjugada**	**C=O conjugada**
16%	56%	8%

Fonte: Elaborado pelos autores.

A presença de uma composição heterogênea tem sido revelada pela variação do teor de metoxila que, como vimos, reverte em um determinado tipo de lignina. O teor de metoxila é frequentemente empregado para fins sistemáticos e de estudos de evolução das plantas ou quando precisamos diagnosticar o tipo de lignina presente em um vegetal, madeira ou biomassa. Essa composição é variável, entretanto, crescente em teor de metoxila, conforme a evolução dos vegetais na ordem Pteridófitas, Gimnospermas e Angiospermas. Essa sequência pode ser visualizada, de forma resumida, no Quadro 2, onde estão relacionados os tipos de ligninas e seus respectivos táxons botânicos. Na verdade, essa composição pode ocorrer em conjunto, levando a teores de metoxila médios.

Quadro 2 - Demonstração da proporcionalidade de ocorrência de ligninas nos táxons botânicos.

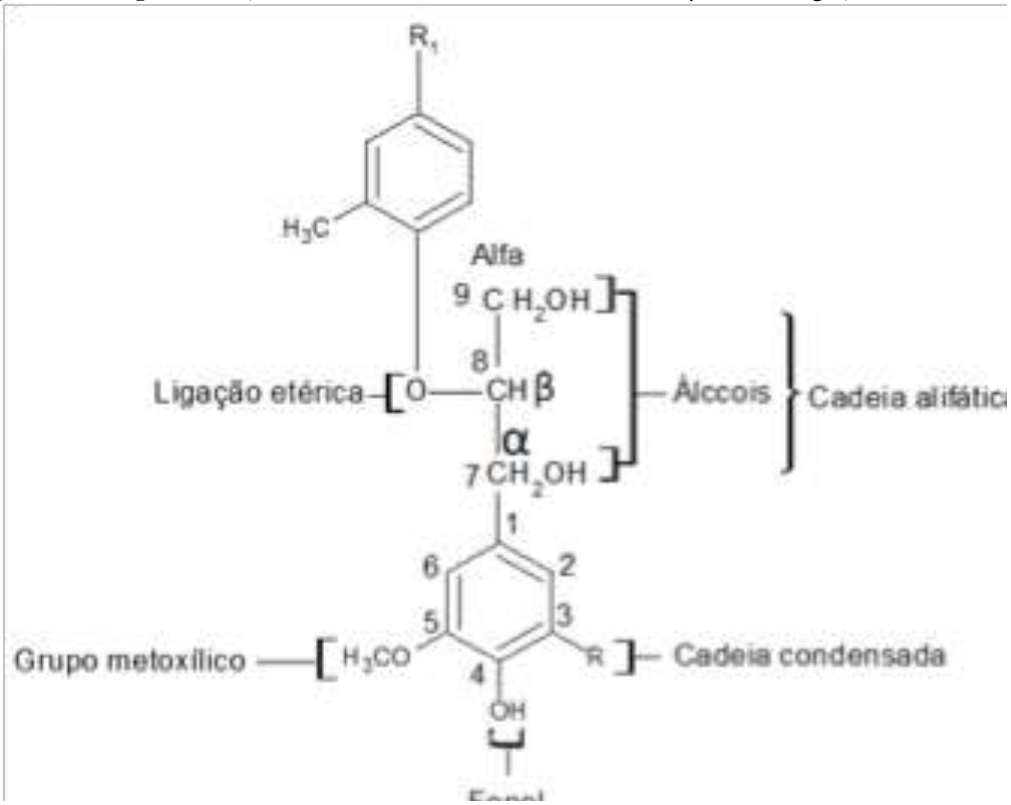
Precursores	Álcool cumarílico	Álcool coniferílico	Álcool sinapílico
Ocorrência	Pteridófitas	Gimnospermas	Angiospermas (Dicotiledôneas)
Unidades básicas	H	G	S
Tipos de Lignina	Cumarílica	Guaiacílica	Siringílica
Teor de OMe/C9	0/C9	1/C9	2/C9
Razão entre H, G e S	H>G	G>H	H<<G=S; H<<G>D; H<<G<S Monocotildôneas, H=G=S

Fonte: Elaborado pelos autores.

A estrutura da lignina, neste capítulo, está representada de uma forma bastante resumida para facilitar o entendimento de forma mais simples pelos estudantes. A unidade cumarílica (unidade Hidroxifenilpropano) é constituída por um anel aromático que sustenta uma hidroxila fenólica no C-4 e uma cadeira de três átomos de carbono, ou seja, uma cadeia alifática propânica no C-1, também denominada de cadeia lateral. O núcleo aromático e a cadeia propânica podem ser enumerados de 1 a 9 (C9), sendo o anel aromático enumerado em algarismo romano e os carbonos da cadeia propânica identificados utilizando letras

gregas, em que o C-7 tem denominação de Cα, C-8 de Cβ e C-9 de C γ, respectivamente (Figura 5).

Figura 5 - Representação de uma unidade básica etérica β-O-4 e ligações associadas.



Fonte: modificado de Heitner et al. (2001).

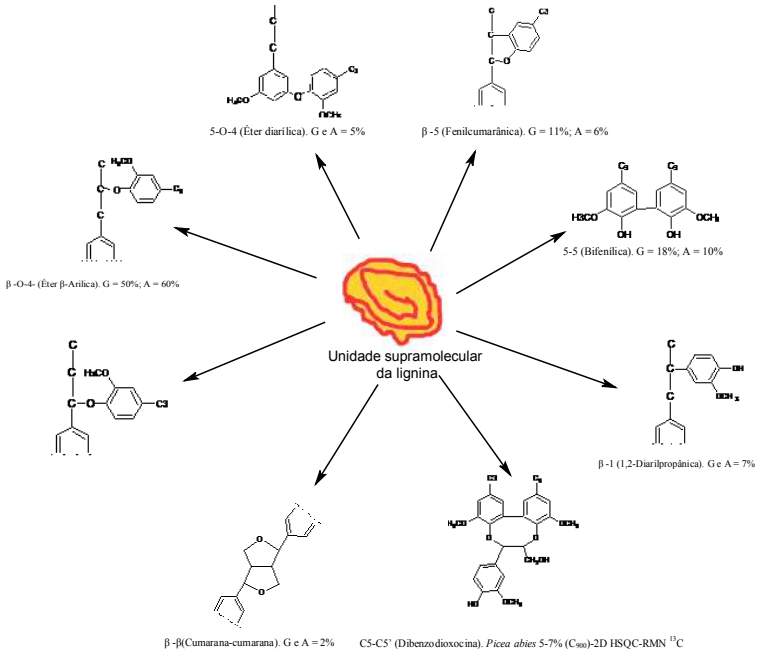
Os carbonos α, β e γ podem sustentar ligações éter Arílica em γ ligações éster de carboidratos. O carbono α pode sustentar grupos hidroxílicos (-OH), o carbono β pode sustentar carbonilacetônica (C=O) e o C- γ, grupos aldeídicos, ácidos e/ou de éster (Figura 4).

As estruturas consideradas condensadas ainda trazem questionamentos quanto às suas nomenclaturas. As ligações C-C que envolvem o C-5 são consideradas condensadas ou podem ser consideradas estruturas condensadas as que formam ligações cíclicas envolvendo Cβ-Cβ e Cβ-C5 (Figura 6). Um número grande de ligações tem sido proposto. Essas ligações ocorrem entre a unidade constitucional, cuja concentração tem sido determinada e bem estabelecida entre Gimnospermas e Angiospermas. A Figura 7 destaca as principais ligações existentes nas ligninas.

Figura 6 - Exemplos de ligação etérica (não condensada) β-O-4 e condensadas β-β e 5-5'.

Fonte: Elaborado pelos autores.

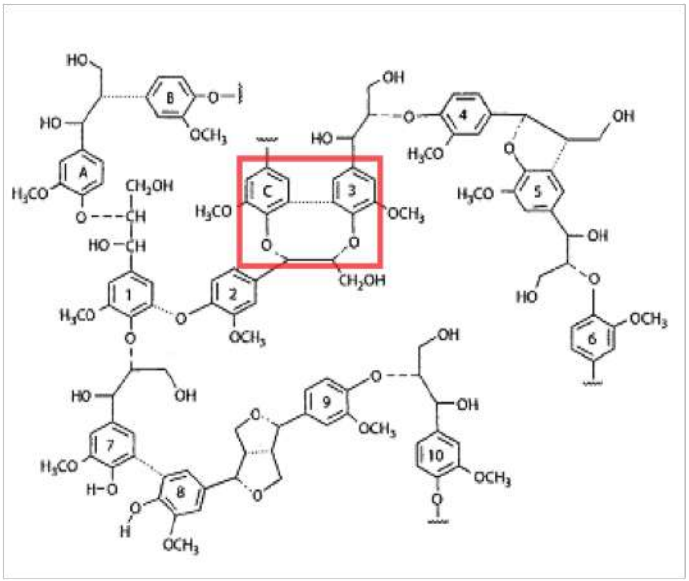
Figura 7 - Tipos de ligações nas ligninas de Gimnospermas (G) e Angiospermas (A).



Fonte: adaptado de Belgacem e Gandini (2008).

Por muitos anos, pesquisadores propuseram estruturas moleculares das ligninas que justificassem suas complexidades. Brauns (1952), por exemplo, divulgou a primeira estrutura molecular da lignina e outros, como Freudenberg (1959), divulgaram novas propostas de estruturas. Com o avanço dos métodos de análise, principalmente de RMN de H e ^{13}C, novas propostas têm sido lançadas. Entretanto, as propostas são puramente especulativas e não refletem a estrutura real da protolignina (lignina *in situ*), tendo em vista que quando isoladas se alteram. As ligninas conhecidas como lignina de Björkman (método de Lignina de Madeira Moída-LMM) e enzimáticas são as que fornecem ligninas que representam melhor a protolignina. A Figura 8 destaca a proposta estrutural mais recente da molécula da lignina.

Figura 8 - Reformulação mais recente contendo a unidade estrutural dibenzodioxicina (retângulo vermelho), sendo: ------ Ligações mais reativas; ····· Ligações menos reativas



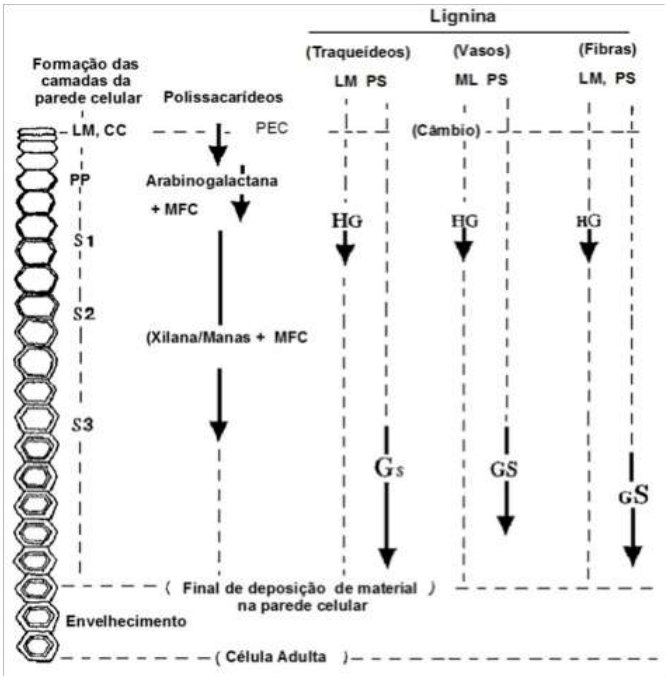
Fonte: Heitner et al. (2008).

4. Topoquímica

O termo topoquímica tem origem no prefixo topo (lugar - topografia), ou seja, é o local onde os fenômenos químicos acontecem. Isto pode ser observado no caso das ligninas que, de uma forma geral, são depositadas de forma centrípeta na parede celular. A lignificação é a última etapa da vida da célula; uma morte programa onde as células deixam de ter sua atividade fisiológica estabelecida. Na Figura 9 mostramos uma sequência de deposição de lignina onde se verifica a ordem de deposição da lignina na parede celular de um traqueídeo, vaso e fibra, mostrando que existe também uma deposição preestabelecida em termos de composição da lignina. A deposição da lignina começa no ângulo celular da lamela média se estendendo em direção a parede secundária, embora a deposição da lignina na lamela média assim como na parede primária somente inicia após o início da deposição de lignina na parede secundária.

Por outro lado, a lignificação da parede secundária só se forma após o término da formação da parede secundária (DONALDSON, 2001). Na parede primária é depositada a lignina HG (Cumarílica-Guaiacílica) e na parede secundária é depositada a lignina GS (Guaiacílica-Siringílica), espacialmente e cronologicamente (LEWIS; SARKANEN, 1998).

Figura 9 - Ilustração conceitual da relação entre a formação das camadas da parede celular e a incorporação de polissacarídeos e lignina.



Fonte: Lewis e Sarkanen (1998).

As camadas da parede celular são formadas, sucessivamente, na ordem da Lamela média (LM), do Canto Celular (CC) e da Parede Primária (PP), seguidas pela deposição na camada mais externa, mediana e parte mais interna da Parede Secundária (PS) (Camadas S1, S2, e S3). As unidades de monolignóis são incorporadas na lignina segundo a ordem cumarílica (H), guaiacílica (G) e Sirigínlica (S) em 3 estádios de lignificação. A lignificação acontece primeiro no canto celular e na lamela média após a formação da parede primária e antes da formação da camada S1. Depois acontece uma lenta

lignificação durante a deposição das microfibrilas (MFC) e da hemicelulose (HC) na camada S2. A deposição mais extensiva de ligninas acontece na camada S2 e após a formação da S3 ter sido iniciada. A Tabela 1 destaca os tipos de ligninas e suas respectivas estruturas na parede celular de vários elementos anatômicos, mostrando a heterogeneidade da lignina na parede celular, representada em diversos elementos celulares, lamelas médias e ângulos celulares, cuja composição copolimérica pode levar à proposição do tipo de estrutura e do nível de rigidez de cada copolímero. Recomendamos para aprofundamento desse tema o trabalho de Donaldson (2001).

Tabela 1 - Razão entre unidades Guaiacila/Siringila das ligninas da parede celular de bétula com seus respectivos níveis de rigidez molecular.

Região morfológica	Guaiacila:Siringila G:S	Provável tipo de estrutura	Nível de rigidez molecular
Fibra S2 (F)	12:88	Não condensada	Baixa rigidez
Vaso S2 (V)	88:12	Condensada	Rígida
Parênquima radial (R)	49:51	Semi-condensada	Moderada rigidez
MLcc (F/F)	91:9	Condensada	Rígida
MLcc (F/V)	80:20	Condensada	Rígida
MLcc (F/R)	100:0	Condensada	Alta rigidez
MLcc (R/R)	88:12	Condensada	Rígida

Fonte: Abreu et al. (1999) e Higuchi (1980).

5. Considerações Finais

O entendimento dos mecanismos de formação das ligninas, assim como sua estrutura, tem se mostrado desafiador, mas também essencial para o entendimento de como esse grupo de substâncias interage para atuar nas propriedades da madeira, especialmente aquelas de interesse ao homem. Através do estudo aprofundado da lignina seria possível potencializar o aproveitamento tecnológico da madeira e, consequentemente, seu valor comercial. Em pesquisas futuras, de manipulação genética, por exemplo, será possível induzir a formação de lignina com estrutura molecular específica para aumentar a capacidade de carga e resistência de peças de madeira e, supondo uma relação da lignina com defeitos da madeira como rachaduras, a manipulação da estrutura molecular da lignina em regiões de interface (parênquima x parênquima) poderia induzir comportamentos das células que contribuíssem para aumentar ou diminuir a resistência da madeira a defeitos, por exemplo.

RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS PARA USO NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS

Fabricio Gomes Gonçalves, Roberto Carlos Costa Lelis, Alexandre Monteiro de Carvalho

1. Introdução

Os painéis aglomerados podem ser confeccionados a partir de qualquer material lignocelulósico, desde que possam conferir resistência mecânica e massa específica ao mesmo.

A madeira é a matéria-prima principal para confecção de compósitos aglomerados, existindo ainda outras fontes fibrosas, tais como palhas de trigo, aveia e cevada (YOUNGQUIST et al., 1996), bagaço de cana-de-açúcar (OKINO et al., 1997), casca do côco (BRITO et al., 2004), aparas de papel reciclado (CALEGARI et al., 2004), casca de arroz com bambu (HIZIROGLU et al., 2005), casca de eucalipto (BRITO et al., 2005), epicarpo de babaçu (LIMA et al., 2006), bambu com serragem de eucalipto (CALEGARI et al., 2007), casca de arroz com eucalipto (MELO, 2009), casca de amendoim (FIORELLI, 2014), entre outras. Youngquist (1992) ainda cita que resíduos originados de talos de milho também representam um importante e vasto recurso natural fibroso para aplicações em painéis reconstituídos.

A pressão ambiental para o reaproveitamento de resíduos é crescente ano após ano, fazendo com que vários pesquisadores estudem as características de painéis aglomerados produzidos com a utilização das mais diversas matérias-primas. O uso de resíduos de madeira, tais como maravalhas, costaneiras, serragens e outros, agregam valor ao material e otimizam o processo produtivo. A mistura de matérias -primas, com o intuito de se obter painéis com melhores propriedades físico-mecânicas, contribui para a redução da problemática de seu descarte inadequado no ambiente, além de estimular novas pesquisas.

Youngquist (1992) entende que esta concepção poderia ser a saída para a solução de problemas ambientais caso as empresas adotassem e processassem os resíduos não tradicionais (palhas e cascas, por exemplo) em combinações com madeira ou mesmo puros.

No Brasil, utiliza-se na confecção de painéis comerciais basicamente espécies do gênero Pinus, havendo também algumas composições mistas com o gênero Eucalyptus. A utilização de outras espécies de menor densidade é somente estudada com o fim de pesquisa, além de outros componentes, principalmente resíduos da agroindústria, conforme estudo de Melo (2009). O autor avaliou a influência da adição de casca de arroz às partículas de madeira, sendo que o acréscimo de casca proporcionou uma maior instabilidade e uma menor resistência nas chapas.

2. As questões ambientais

De acordo com Borges et al. (1993 apud DUTRA et al., 2005), o gerenciamento dos resíduos gerados no país são ineficientes e, quando existem, são incorretos. Neste aspecto estão incluídos os resíduos industriais, em especial aqueles resultantes da atuação das madeireiras, pois muitas não aproveitam de maneira coerente os seus resíduos alegando que a relação custo/benefício não justifica.

Em função da destinação inadequada de seus resíduos, há a geração de um desconforto, além de

diversas consequências negativas, tanto social (prejudiciais à saúde) como ambiental (impacto ao meio ambiente devido ao acúmulo de resíduos), se enquadrando na constituição como fonte poluidora. Os impactos causados por esses resíduos, provenientes de serrarias, ao meio ambiente estão diretamente ligados à exploração madeireira e à quantidade de material já beneficiado, desperdiçado ou queimado.

O descarte de resíduos no ambiente é um problema que atinge não somente as empresas do setor madeireiro. Saber o que fazer com eles e ainda conseguir lucros com sua comercialização torna-se um excelente negócio.

Em virtude da falta de conhecimento ou simplesmente de condições financeiras favoráveis, algumas empresas optam por queimar seus resíduos ao ar livre. Esta ação, que infelizmente é uma prática muito comum pelo país, pode gerar uma fonte de poluição, principalmente quando a queima não é completa, tornando-se um problema de saúde pública. Em virtude da legislação vigente que impõe restrições à queima de resíduos, alguns empresários do setor optam por depositar seus resíduos em uma área de descarte industrial, licenciado ou não, que seguramente acarreta custos e contribui para o aumento de passivos ambientais empresariais.

A responsabilidade de dar a destinação correta aos resíduos é de quem o gera. O destino adequado dado aos resíduos é um dos requisitos necessários para que a empresa obtenha seu licenciamento ambiental. Quando da elaboração do projeto de uma indústria, ou seja, no início de qualquer atividade, as alternativas para a utilização dos resíduos podem e devem ser mencionadas, quantificadas, qualificadas e analisadas. Este detalhe é de grande importância, uma vez que pode influenciar na tomada de decisão de aspectos fundamentais do projeto, como, por exemplo, a localização da empresa. Dentre as utilizações dos resíduos de madeira, as que mais se destacam são a produção de subprodutos de madeira (celulose e painéis) e a geração de energia através da queima controlada.

3. Resíduos vegetais e sua caracterização

O Brasil é um país com dimensão territorial e com uma vocação natural enorme para o desperdício de matéria-prima para outras finalidades que não a principal, em qualquer que seja a matriz industrial, sendo apenas o fator qualidade final preocupante (o que define seu uso). A geração de resíduos, em particular a originada da biomassa vegetal, que são constituídos por todos os subprodutos das atividades agrícolas (palhas), pastoris (esterco), florestais (ponteiros, galhadas, serragem, maravalhas, cavacos, pó, etc.), agroindustriais (cascas de arroz, café, trigo, açaí, etc.) e urbanas (podas, móveis, brinquedos, utensílios domésticos, etc.), possui um potencial ainda pouco explorado pelas indústrias.

De uma forma geral, um resíduo pode ser definido como todo material descartado nas atividades de um processo produtivo industrial ou de atividades humanas (ABNT, 2004), o que pode vir a se tornar um risco ao ambiente e para a sociedade quando disposto de forma inadequada. Esta disposição pode vir a se transformar em lucro, isto é, buscando sua transformação para gerar novas matérias-primas para outros produtos e permitindo, ainda, uma sobrevida das florestas, sobretudo as nativas.

De acordo com Teixeira (2005), o aproveitamento de resíduos segue da seguinte forma:

- Adubo: serragem em geral e madeira picada de forma *in natura* usada como cama de frango e, após compostagem, para deposição em solo visando melhorias de suas propriedades químicas e físicas;

- Cama de animais: serragem em geral, de preferência macia, para contato direto com animais em exposições agropecuárias e em propriedades que, após suja de estrume e compostagem, podem ser adicionadas ao solo (adubo);

- Carvão vegetal e combustível: pontas, sobras, rejeitos, costaneiras, cascas e galhos utilizados em processos industriais para produção de carvão, metanol, óleos e gás;

-Energia elétrica: através da queima para geração indireta de energia em caldeiras, com uso de briquetes após padronização dos resíduos de pontas, sobras, rejeitos, costaneiras, cascas e galhos;

- Energia térmica: através da queima direta em fornos de padarias, pizzarias, olarias e caldeiras industriais de pontas, sobras, rejeitos, costaneiras, cascas e galhos;

- Extração de óleos e resinas: geralmente utiliza serragem;

- Madeira reconstituída: serragem em geral utilizada na fabricação de painéis.

3.1. Origem na agricultura tradicional

a) Casca de arroz

De acordo com Souza (1993), a casca de arroz corresponde a, aproximadamente, 20% do peso do grão. Considerando que o Brasil produz, em média, 12 milhões de toneladas ano^{-1}, estima-se um rejeito em casca de 2,4 milhões de toneladas ano-1, incluindo aí de 8 a 12 % de farelo e impurezas (EMBRAPA, 2005). A casca de arroz é um revestimento formado durante o crescimento do grão, de baixa massa específica e elevado volume. É um material fibroso, cujos maiores constituintes são a celulose (38%) e a lignina (29%), além de 33% de compostos não orgânicos (REYES et al., 2008). Apesar desta matéria-prima apresentar elevado teor de sílica, quando comparada com a madeira, inúmeros são os trabalhos técnicos em que este material é utilizado na confecção de painéis aglomerados.

Do ponto de vista econômico, Chen (1980 apud MELO, 2009) destaca a viabilidade da utilização da casca de arroz na confecção de painéis aglomerados, pois os custos para o seu transporte são competitivos quando comparados com o transporte de partículas de madeira. A aquisição, no entanto, da casca de arroz pode ser mais barata, pois trata-se de um resíduo agrícola que, na maioria das vezes, não é aproveitado. Já a madeira utilizada na produção de partículas poderia ser utilizada para manufatura de produtos de maior valor agregado. Vale e Gentil (2008) mencionam que, apesar da baixa densidade (0,12 a 0,14 g cm^{-3}), este material pode ser comprimido em até três vezes o seu tamanho original, o que poderia baratear ainda mais o seu transporte.

Dentre outros resíduos agrícolas existentes, a casca de arroz é apontada por Youngquist et al. (1993) como um produto que pode ser utilizado na manufatura de painéis aglomerados com qualidade superior à exigida pelas normas internacionais.

Gerardi et al. (1998) também apontam a utilização da casca do arroz na produção de painéis aglomerados, uma vez que menores espessuras necessitaram de uma pressão mais elevada, visando à redução de problemas futuros no painel devido à formação da pressão interna.

Pauleski (2005) verificou que o aumento na proporção de casca de arroz em relação às partículas de *Eucalyptus grandis* em compósitos manufaturados com polietileno de alta densidade proporcionou a redução da absorção de água e o inchamento em espessura, ocorrendo ainda maiores resistências mecânicas em painéis com maiores quantidades de madeira.

A formação de um painel homogêneo com cascas de arroz foi realizada por Soares et al. (2008). De acordo com os autores os resultados foram positivos para algumas propriedades tecnológicas avaliadas, indicando a viabilidade de sua utilização. No entanto, para estes autores, há necessidade disto ser realizado de forma mais eficiente, em condições mais adequadas de laboratório e materiais, nas quais a melhoria dos painéis possa ser almejada por meio da utilização de parafina, da variação do tamanho da partícula, da variação e/ou combinação de adesivos e concentrações, da melhor homogeneização dos componentes e da realização de testes biológicos.

O desempenho de um painel cimento-madeira com diferentes proporções de madeiras de eucalipto e pinus combinadas com casca de arroz foi objeto de estudo de Lilge (2009). A autora afirma que os painéis produzidos com partículas de pinus e eucalipto sem adição da casca de arroz apresentaram piores características físicas e que, quanto maior for a quantidade de casca, menor será a taxa de absorção de água e inchamento em espessura. De uma forma geral, os dados indicam que a adição de cascas de arroz representou uma perda de resistência mecânica para todos os tratamentos em todas as propriedades avaliadas.

b) Fibras de côco

O resíduo do côco verde é composto por cascas e fibras, correspondendo a, aproximadamente, 90% de seu peso bruto. Nas áreas urbanas, pode causar transtornos, do ponto de vista ambiental, em função de seu destino, ainda verde, ocorrer após consumo em aterros sob condições anaeróbicas, uma vez que provoca emissão de metano, um dos mais importantes gases de efeito estufa (PASSOS, 2005). Seu tempo de decomposição gira em torno de 10 anos, podendo ser um problema para a administração pública, face ao volume gerado, sobretudo em regiões litorâneas. Sua utilização industrial, no entanto, está voltada apenas para a geração de energia térmica (VALE; GENTIL, 2008) e para a indústria automobilística. No meio acadêmico, são poucos os trabalhos em painéis reconstituídos a partir desta matéria-prima.

A inclusão da fibra de côco a partículas de pinus foi avaliada em painéis aglomerados por Brito et al. (2004). Os autores afirmam que a adição crescente de fibra de côco não proporcionou diferença estatística quando comparada com as chapas feitas exclusivamente de pinus, sem levar em conta os valores mais altos para cada nível nas propriedades mecânicas. Segundo os mesmos autores, a produção de chapas de partículas com fibra de côco mostrou-se viável em termos de módulo de ruptura, quando se compara os valores obtidos com normas técnicas.

De acordo com English et al. (s.d.), quando as fibras da casca do côco são utilizadas como reforço em combinações com madeiras, a resistência é aumentada, principalmente em relação à umidade, quando comparada com outros resíduos lignocelulósicos.

Colli et al. (2010) afirmaram que a estabilidade dimensional, higroscopicidade e absorção de água não foram alteradas com a adição de fibras de côco às partículas da madeira de paricá na confecção de um painel aglomerado, porém aumentou de forma significativa as demais propriedades de resistência.

Lengowski et al. (2010) avaliaram o potencial da utilização do endocarpo do côco para produção de compósitos termofixos, afirmando que este uso é possível, pois a matéria-prima apresenta características favoráveis como a alta porcentagem de lignina (54%), por exemplo.

A utilização de fibras (epicarpo e mesocarpo) de babaçu combinadas com partículas de *Pinus elliottii* em diferentes proporções na confecção de chapas de madeira aglomerada foi objeto de pesquisa de Lima et al. (2006). Os autores afirmaram que o aumento do teor de fibras associado ao aumento

no teor de adesivo contribuiu para a redução nos valores de inchamento em espessura e absorção de água e que, utilizando-se até 30% de fibras de babaçu, os valores de MOR foram superiores aos estabelecidos por normas americanas, indicando, assim, seu potencial para uso em painéis aglomerados.

c) Palhas de café

Este resíduo é muito utilizado como fonte de nutrientes em lavouras cafeeiras no país e, mais recentemente, como fonte energética através de briquetes, sendo exportado para países da Europa (REIS, 2008).

Poucos são os estudos que utilizam este resíduo como fonte de matéria-prima na confecção de painéis aglomerados. Mendes et al. (2010a) afirmam que a adição da casca de café às partículas de eucalipto prejudicou as propriedades tecnológicas em painéis aglomerados. Entretanto, existem alguns trabalhos artesanais utilizando-a na confecção de pequenos objetos decorativos em formas preestabelecidas, tais como porta objetos.

d) Bagaço de cana-de-açúcar

Youngquist et al. (1993) citam que os primeiros painéis utilizando resíduos de bagaço de cana-de-açúcar foram confeccionados na década de 1920 nos Estados Unidos, sendo posteriormente muito difundidos por todas as Américas. Os mesmos autores ainda mencionam que a fibra é grossa (0,03 a 0,12 mm) e relativamente longa (1,0 a 4,0 mm). Salyer e Usmani (1982 apud YOUNGQUIST et al., 1993) mostram que para algumas propriedades os painéis confeccionados com este tipo de resíduo apresentam-se dentro de padrões americanos. De acordo com os mesmos autores, os painéis apresentam ainda as seguintes especificações técnicas na sua composição: 92% de bagaço de cana e 8% do adesivo ureia-formaldeído, com uma densidade de 0,74 g cm-3 e uma espessura de 10mm.

Okino et al. (1997), no seu estudo sobre a resistência físico-mecânica em chapas aglomeradas de bagaço de cana-de-açúcar confeccionadas com partículas acetiladas e não acetiladas usando dois tipos de adesivos, observaram que as chapas que continham tanino foram bem superiores àquelas com ureia, no que diz respeito às propriedades de absorção, inchamento e flexão estática.

A resistência de painéis aglomerados confeccionados com bagaço de cana-de-açúcar a fungos dos gêneros *Pycnoporus* e *Gloeophyllum* foi satisfatória em trabalho realizado por Teixeira et al. (1997).

Mulinare (2009) avaliou o comportamento térmico, mecânico e morfológico de compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulose de bagaço da cana-de-açúcar. Foram aplicadas técnicas de microscopia eletrônica de varredura, difratometria de raios-X, espectroscopia na região do infravermelho, termogravimetria e calorimetria exploratória diferencial. De acordo com a autora, os resultados demonstram a influência do tratamento superficial das fibras sobre as propriedades mecânicas, pois o tipo de processamento, o uso do agente compatibilizante, o tipo de fibra e o tratamento aplicado influenciaram nas propriedades mecânicas dos compósitos. Além disso, a adição de fibras de bagaço na matriz de polietileno melhorou as propriedades mecânicas em comparação à matriz pura e uma possível redução no custo sugere uma aplicação industrial do produto final.

Estudos de resistência à bioterioração de fungos utilizando bagaço de cana-de-açúcar na confecção de painéis com adesivos sintéticos, plásticos e naturais também foram estudados por Teixeira et al. (2009). Neste trabalho, painéis colados com PVC foram classificados como resistentes ao ataque

de fungos, diferentemente dos resultados obtidos quando se utilizou ureia-formaldeído e tanino formaldeído, os quais apresentaram-se pouco resistentes.

Battistelle et al. (2010) realizaram uma caracterização física das chapas de partículas com os rejeitos oriundos da cana-de-açúcar adicionando-se folhas de bambu. Os resultados indicaram haver boa relação das folhas do bambu com a cana de açúcar, sobretudo no que se refere à redução da absorção de água. Para a massa específica, os dados estiveram dentro da faixa determinada pela norma brasileira NBR 14.810.

Mendes et al. (2010a) estudaram o efeito da porcentagem de associação de bagaço de cana-de-açúcar com a madeira de eucalipto em diferentes tipos e teores de adesivos na produção de painéis aglomerados. Os resultados indicaram que o adesivo à base de ureia mostrou-se estatisticamente igual ou superior à fenólica em quase todas as propriedades avaliadas. Segundo os autores, a influência do adesivo em 6 ou 8% foi somente no aspecto financeiro, uma vez que ambas com 75% de bagaço de cana-de-açúcar estiveram dentro do esperado e estabelecido pela norma CS 236-66, exceto o módulo de elasticidade.

Fiorelli et al. (2014) estudaram as propriedades anatômicas e físico-químicas de fibras naturais residuais de bagaço de cana, fibras de coco e casca de amendoim visando sua utilização como potencial para produção de partículas e confeccção de painéis aglomerados. Segundo os autores, houver semelhanças e diferenças entre as características físico-químicas e anatômicas das fibras lignocelulósicas residuais quando comparadas com partículas de Pinus sp (Tabela 1). De acordo com esses autores, a presença de sílica foi identificada em todos os resíduos em quantidades que podem afetar as características mecânicas dos painéis.

Tabela 1 - Características físicas e químicas das lignocelulósicas residuais e da madeira de *Pinus* sp.

Material avaliado	Densidade aparente (kg m-3)	pH	Cellulose (%)	Lignina (%)	Hemicelulose (%)
Fibra de coco	1.300	4.39	56.69	25.11	16.64
Casca de amendoim	1.370	5.21	44.01	31.16	7.70
Bagaço de cana	1.400	5.11	50.47	10.74	30.56
Pinus sp	1.240	4.48	51.13	27.29	15.10

Fonte: Modificado de Fiorelli et al. (2014).

3.2. Resíduo florestal

A terminologia biomassa normalmente é atribuída à massa seca, podendo se referir à árvore toda ou a qualquer uma de suas partes, tais como biomassa da ponta de fuste e galhos maiores não aproveitados no processo industrial. Estima-se que um total de, aproximadamente, 20% da biomassa das árvores é deixado nos locais de colheita quando não se considera as raízes (SILVA, 2005 apud MAGOSSI, 2007). Isso significa que a cada 10 árvores cortadas no campo, duas são deixadas para trás.

a) Uso de cascas de árvores em painéis aglomerados

A confecção de painéis aglomerados de uma camada com madeira de pinus mediante adição de cascas de *Eucalyptus pellita* apresentou-se viável tecnicamente de acordo com Brito et al. (2005). Segundo os autores, as propriedades físicas e mecânicas estiveram dentro do especificado pela norma america-

na ASTM D 1037-91, sendo o acréscimo de até 10% de casca o máximo aceitável pelos testes realizados.

Lopes et al. (2005) estudaram a viabilidade técnica da adição de cascas de eucalipto na confecção de painéis cimento-madeira, tratadas ou não quimicamente. De acordo com os autores, os painéis que receberam partículas de cascas após tratamento com hidróxido de sódio apresentaram bons resultados nas propriedades avaliadas, sendo a proporção máxima de 25% de cascas. Os autores ainda afirmam que a incorporação de cascas sem tratamento químico juntamente com a madeira de *Eucalyptus grandis* não é viável tecnicamente para a produção de painéis cimento-madeira.

A utilização de cascas de mamona na confecção de painéis aglomerados com partículas industriais da madeira de eucalipto foi estudada por Freitas et al. (2007). Os resultados indicaram que a inclusão da casca na confecção de painéis demonstrou ser viável na proporção de 25%, conferindo melhores propriedades físicas aos mesmos.

Quando há problemas relacionados à presença de cascas, principalmente aquelas em que se processa a madeira para fins de celulose, pode-se pensar em uma planta industrial para extração de taninos visando a produção de adesivo natural. Algumas pesquisas são desenvolvidas, principalmente no Brasil, e apontam que cascas de pinus (FERREIRA, 2004; FERREIRA, 2009; GURGEL, 2008; SILVA et al., 2008; VIEIRA, 2010), de eucalipto (MORI et al., 2002; TEODORO; LELIS, 2005; TOSTES et al., 2004; TRUGILHO et al., 2003; VITAL, et al., 2004) e ainda de espécies nativas (CARNEIRO, 2006; GONÇALVES, 2000; GONÇALVES; LELIS, 2001; TRUGILHO et al., 1997), modificadas ou não quimicamente, se apresentam com um enorme potencial para fabricação de adesivos com taninos.

b) Resíduos provenientes da madeira

Todo o processo de transformação da madeira gera resíduos em menor ou maior quantidade, sendo aproveitados, de acordo com Lima e Silva (2005), algo em torno de 40 a 60% do volume inicial da tora. Segundo Olandoski et al. (1998 apud DACOSTA, 2004), as serrarias passaram a encontrar dificuldades na adequação do sistema do desdobro na transição da madeira de pinus para madeira de nativas, principalmente em relação à forma das dimensões, proporcionando baixo rendimento e gerando muitos resíduos, os quais geralmente não são aproveitados.

Ayala et al. (2007) citam que, do total de madeira que chega nas serrarias, 54,97% é transformado em resíduos. Há diferentes classificações para resíduos provenientes de serraria. Vale e Gentil (2008) os classificam em basicamente três tipos, como descrito a seguir:

1. Serragem – encontrada na maioria das indústrias de madeira. É gerada pelo processo de usinagem com serras;

2. Cepilho – encontrado em indústrias beneficiadoras da madeira, como nas indústrias de móveis. É gerado nas plainas;

3. Lenha – são resíduos maiores, tais como aparas, refilos, casca, roletes, entre outros. Está presente também em todas as indústrias de madeira. De acordo com Brito (1995) é o de maior representatividade.

Rocha (2005) já mencionava que a indústria de serrados tinha problemas com o fornecimento de matéria-prima. O custo de produção da madeira serrada aumentava gradativamente e, cada vez mais, o mercado tornava-se competitivo, com variadas opções de produtos.

Para que o empresário possa manter seus produtos competitivos, há a necessidade de adoção de

uma série de medidas a fim de reduzir seus custos produtivos. Muitas são as sugestões, tais como melhoria no rendimento e na produtividade e desenvolvimento de novos produtos. Entretanto, é imprescindível uma atenção especial aos resíduos que são gerados na serraria, pois possuem uma grande dimensão com o passar dos anos e não podem ser desprezados. Para se ter uma ideia, a produção de 100 m^3 de madeira serrada gera, aproximadamente, 220 m^3 de resíduos, considerando-se um rendimento de 45%. Portanto, quanto melhor for o aproveitamento do resíduo, melhor será o lucro obtido com o mesmo.

c) Resíduo madeireiro como produto principal

De acordo com Lima e Silva (2005), os resíduos podem ser reutilizados pela própria indústria que os produz, principalmente como energia, ou podem ser encaminhados para outras empresas e aplicados em vários usos, gerando dividendos positivos. Segundo Olandoski (2001 apud LIMA; SILVA, 2005), isto depende do teor de umidade e da variedade de resíduo gerado em função das diferentes espécies.

Existem diversas aplicações que podem ser dadas aos resíduos de madeira. Lima e Silva (2005) mencionam energia, chapas de partículas e fibras, briquetes, polpa e cargas para compostos poliméricos, como descrito a seguir:

i) Energia – isso se deve à sua capacidade calorífica. A geração de energia por resíduos é bastante vantajosa, uma vez que economiza outras fontes energéticas. No entanto, os resíduos usados para este fim não devem possuir nenhum elemento químico adicional (como adesivos químicos), caso contrário podem emitir poluentes e causar danos ambientais;

ii) Chapas de partículas e fibras – podem ser utilizadas para confecção de aglomerado, chapas duras e *Medium Density Fiber Board* (MDF). Os EUA utilizam os resíduos de madeira como fonte principal de matéria-prima na indústria de aglomerados (BRITO, 1995). No Brasil esta ação não ultrapassa 15%. É importante ressaltar que, para a utilização dos resíduos na indústria de chapas, devem ser observadas questões com relação ao tamanho e à forma das partículas utilizadas, devendo ser adequadas para o processo, o que influenciará diretamente na qualidade do produto. A formação de portas contendo sarrafos de compensados é uma opção interessante que vem sendo realizada por muitas empresas do setor;

iii) Briquetes – também utilizados para geração de energia, pois possuem vantagens sobre o uso dos resíduos primários. Sua compactação garante um teor de umidade menor, permitindo, desta forma, uma queima mais uniforme e facilitando o manuseio e transporte (LIMA, 1998). Pode ser utilizado em restaurantes, olarias, lareiras, etc., desde que esteja livre de produtos químicos como tintas, vernizes, produtos preservativos e adesivos industriais;

iv) Polpa – o uso de resíduos provenientes de fábricas de papel e celulose também é bastante viável, como menciona Gama (2010) em trabalho sobre utilização de rejeito *Unbleach Kraft Pulp* (UKP) na fabricação de concreto. Existem algumas limitações quanto ao tipo de resíduo a ser usado, à sua fonte e à origem da madeira, pois são fatores que podem influenciar diretamente na qualidade do produto final (VALE; GENTIL, 2008);

v) Cargas para compostos poliméricos – forma alternativa de aplicação dos resíduos de madeira. A utilização de cargas do tipo talco, cálcio e farinha de madeira é utilizada na fabricação de painéis aglomerados (LIMA; SILVA, 2005). Banks (2003) cita que o uso dos resíduos de madeira como aditivo em polímeros termoplásticos é bastante viável e possui diversas aplicações.

d) Resíduos à base de painéis de madeira

Zenid (2007) destaca algumas das características da madeira, tais como fácil trabalhabilidade, baixo consumo energético para sua obtenção e o aspecto decorativo, sendo esta uma das matérias-primas mais utilizadas e apreciadas em todo o mundo. Além dessas vantagens, a possibilidade de produção sustentável e a absorção e fixação de CO_2 em seu processo produtivo vêm tornando a madeira um material cada vez mais atraente do ponto de vista ambiental.

No entanto, a demanda cada vez maior pela madeira como material não é seguida no mesmo ritmo por sua oferta. Macedo et al. (2007) destacaram que poderá ocorrer um descompasso entre a oferta e a demanda de madeira no mercado internacional, o que proporcionará uma maior valorização e induzirá o mercado ao seu melhor aproveitamento, incluindo aí seus subprodutos. Uma das alternativas para maximizar seu uso é o aproveitamento na forma de painéis. A partir do material original (formas, dimensões e características variadas) podem ser gerados novos produtos por meio de sua reconstituição, utilizando métodos e processos adequados para cada tipo de produto e finalidade de uso (MELO, 2009).

A produção de novos compostos à base de madeira permite a utilização de uma matéria-prima de menor qualidade. Além disso, torna possível o desenvolvimento de produtos "engenheirados", mais homogêneos e de alto valor agregado. Para Teixeira et al. (1997), é crescente o uso de produtos à base de compensados, aglomerados e chapas de fibras devido ao aumento da escassez na oferta de madeira serrada. Isso tem intensificado o estudo sobre o melhor aproveitamento de resíduos florestais, agrícolas e urbanos (plásticos, papel de jornal e de revista e papelão) para produção de painéis.

Dentre outras características, os painéis aglomerados possuem a vantagem de serem menos exigentes quanto à escolha da matéria-prima, de acordo com Maloney (1993). O autor relata que, na produção de aglomerado, pode ser utilizado material florestal de desbaste e poda, costaneiras, sobras de destopo, miolos de toras laminadas, pó-de-serra e cavacos de plainas, cavacos de madeira resultantes do beneficiamento na indústria de móveis e carpintaria, ou ainda bagaço de cana-de-açúcar e palha de arroz, dentre outros resíduos agrícolas, puros ou misturados com partículas de madeira. Além dos derivados da madeira, inúmeros outros produtos podem ser utilizados na manufatura de chapas, como aqueles provenientes da agroindústria, e constituir uma importante fonte de matéria-prima para produção de componentes construtivos.

Iwakiri (2005) cita que os painéis à base de madeira podem ser definidos como produtos compostos de elementos de madeira, tais como lâminas, sarrafos, partículas, fibras, entre outros, os quais são obtidos pela redução da madeira sólida e reconstituídos por meio de ligações adesivas. A utilização dos painéis de madeira vem se consolidando cada vez mais por representar uma alternativa viável à escassez de matéria-prima (quantidade e qualidade) disponível para ser utilizada *in natura*.

Os painéis também são caracterizados por apresentarem maiores proporções geométricas (largura), permitindo, assim, uma melhor otimização de seu uso, bem como uma menor redução da anisotropia e eliminação de defeitos como nós e grã irregulares, além dos problemas provenientes da secagem (IWAKIRI et al., 2005). Embora já existam inúmeros tipos de painéis com características e finalidades diferenciadas, é contínua a busca por novos produtos para aplicações específicas e com menor relação custo/benefício, tais como a madeira-plástico e o cimento-madeira. De acordo com Melo (2009), produtos derivados da madeira vêm se constituindo em interessante alternativa para a substituição de peças brutas maciças pela indústria moveleira e de embalagens, além de elementos estruturais em componentes de edificações.

e) Resíduos a partir de painéis aglomerados

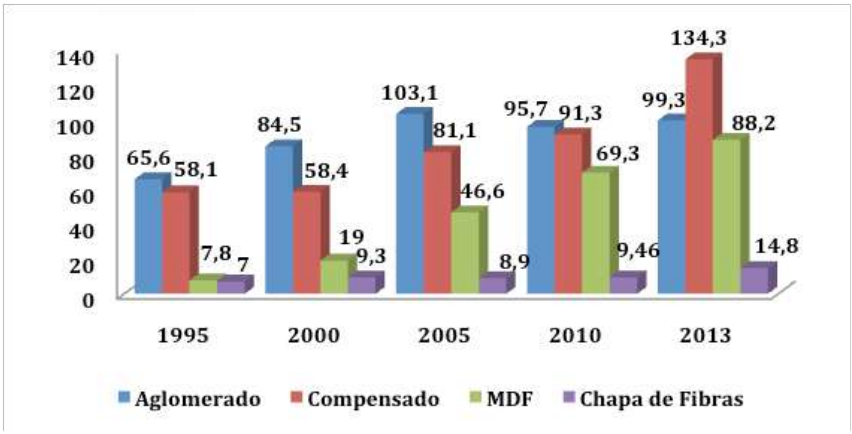
Os painéis de madeira aglomerados são compósitos confeccionados a partir de partículas de materiais lignocelulósicos, nos quais a madeira é a principal matéria-prima, com a adição de algum adesivo, e consolidados por meio da aplicação de calor e pressão (IWAKIRI, 2005).

Ao final da 2ª Guerra Mundial, o processo produtivo e os equipamentos utilizados para a produção desses painéis foram modernizados e aperfeiçoados. Devido à multiplicidade de aplicações, o uso do aglomerado foi consolidado, inicialmente, na indústria moveleira e, posteriormente, na construção civil, a partir do desenvolvimento das chapas de partículas estruturais *Waferboard e Oriented Strand Board* (HASELEIN, 1989 apud MELO, 2009).

No Brasil, os painéis aglomerados só começaram a ser produzidos na década de 60. A partir desse período e da incorporação de novas tecnologias no processo, tais como o uso de parafina, o controle do gradiente de massa específica e o uso de sistemas de parafusamento mais eficientes, o aglomerado tornou-se uma das principais matérias-primas utilizadas pelo setor moveleiro nacional. O aglomerado é o gênero de painel mais produzido (Figura 1) e consumido no mundo e no Brasil (mais de 95% de toda a produção nacional é consumida no mercado interno). De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura - FAO (2015), o Brasil é o sexto na lista dos maiores produtores de painéis à base de madeira, com 3% da produção mundial. China (48%), Estados Unidos (9%), Rússia (4%), Alemanha (3%) e Canadá (3%) estão nas primeiras posições na produção mundial.

Considerado o processo de reaproveitamento de serragem tradicional e convencional, Gonçalves e Ruffino (1989) propuseram a reciclagem em várias etapas da serragem fina e grossa de indústrias de beneficiamento de madeira para a fabricação de chapas de aglomerados de três camadas, sendo uma interna feita de serragem grossa e as externas feitas de serragem fina. O produto final seria uma chapa de aglomerado para uso em móveis ou para construção civil. O estudo incluiu o uso de outros tipos de resíduos de madeira (ripas, sarrafo, destopo e tábua) na fabricação de chapas sarrafeadas. Também há alternativas para sua utilização como adubos, fertilizantes e extração de resinas.

Figura 1 - Produção mundial de painéis, a partir da madeira, em milhões de m³.



Fonte: FAO (2015).

De acordo com Roque e Valença (1998), as fábricas de madeira aglomerada utilizam, principalmente, como fonte de matéria-prima os seguintes resíduos: i) industriais (serrarias, fábricas de

móveis e de chapas); ii) resíduos provenientes de exploração florestal (toras curtas, galhos, etc.); iii) madeiras de qualidade inferior, não industrializáveis de outra forma; iv) madeira proveniente de trato cultural de florestas plantadas; e v) reciclagem de madeira sem uso (demolições).

Dacosta (2004) confeccionou chapas de partículas aglomeradas tendo como base resíduos (costaneiras, serragem, casca, destopos, refilos e maravalhas) de madeira provenientes do processamento mecânico de *Pinus elliottii*. De acordo com a autora, com a utilização de partículas do tipo maravalha, misturada com maiores porcentagens de adesivo em painéis de maior densidade, obtém-se chapas com melhores propriedades. A autora ainda observou que, em função dos resíduos utilizados possuírem elevadas quantidades de cascas, as propriedades de resistência nos painéis estudados apresentaram um comportamento reduzido.

Santos et al. (2008) estudaram propriedades de inchamento, absorção de água, densidade aparente e teor de umidade em painéis aglomerados confeccionados com resíduos de madeira de tauari provenientes de uma serraria. Os resultados obtidos mostraram que os painéis apresentaram excelente desempenho para estas propriedades, indicando a viabilidade do reaproveitamento do resíduo para fabricação de chapas de partículas a serem utilizadas em ambientes internos e externos.

A viabilidade de fabricação de painéis de partículas homogêneas, a partir de resíduos de processamento de *Pinus* sp, *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*, incluindo a casca de pinus, foi testada por Poleto et al. (1998) através de ensaios físicos-mecânicos. Os autores afirmam a existência da viabilidade técnica da produção dos painéis de partículas de *Eucalyptus grandis*, com ou sem adição de porcentagem entre 30 e 70% em peso de casca de *Pinus elliottii*. Os autores indicam também o emprego das chapas fabricadas nas aplicações usuais para este tipo de produto em revestimentos internos de paredes em edificação, na indústria do mobiliário e na indústria de embalagens.

Iwakiri et al. (2000), utilizando resíduos de serraria (costaneiras do desdobro) de *Eucalyptus saligna, Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus pilularis* na produção de chapas de madeira aglomerada, concluíram ser plenamente possível a utilização desta matéria-prima para a produção industrial. Os autores afirmam ainda que as chapas demonstraram boa estabilidade dimensional e propriedades de módulo de ruptura e ligação interna, com valores médios bem acima do mínimo exigido pela norma americana CS 236-66.

A exploração da candeia para extração do óleo gera um volume significativo de resíduos, o que pode ser uma boa alternativa para a produção de painéis, segundo Santos et al. (2009), uma vez que parte desta matéria-prima é utilizada em caldeiras durante a extração do óleo. Desta forma, os autores avaliaram esta possibilidade mediante diferentes tratamentos com adesivos, partículas de eucalipto e pinus, além da própria partícula gerada pela madeira da candeia. O resíduo, de acordo com os autores, mostrou-se viável na confecção das chapas em todas as propriedades físicas e mecânicas estudadas, exceto para flexão estática.

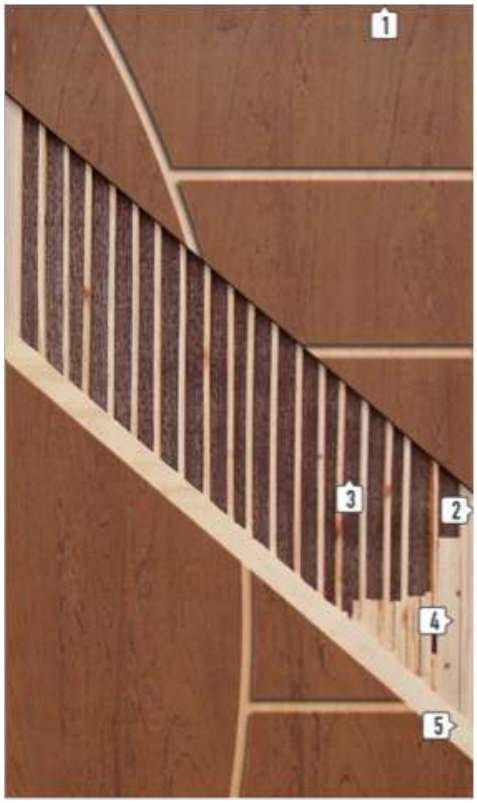
f) Painéis sarrafeados

O termo compensado sarrafeado, em inglês *blockboard*, deve-se ao método de fabricação, que consiste em formar a parte central do painel (miolo) colando-se madeira serrada (sarrafo) em blocos, sendo o conjunto, então, revestido com lâminas (MENDES et al., 2010b).

Para a fabricação desses painéis utilizam-se sarrafos de madeira de tamanhos variados de mes-

ma espessura, sendo colocados um ao lado do outro (não unidos). Os sarrafos são, em geral, estreitos, mas a sua altura pode variar com o tipo, o método de fabricação, a aplicação final, entre outros fatores. Geralmente, empregam-se sarrafos curtos, unidos topo a topo por meio de sistemas *finger joints*, cuja colagem pode ser realizada apenas nos topos ou até ser suprimida. Neste caso, os sarrafos são mantidos juntos apenas pela ação das lâminas das capas (Figura 2).

Figura 2 - Detalhes de uma porta confeccionada com sarrafos de madeira. 1 = saídas de topo para evitar formação de bolhas; 2 = sarrafos com emendas de topo tipo *finger joints*; 3 = sarrafos de madeira; 4 = reforço com sarrafos para instalação da fechadura; e 5 = lâmina de revestimento do miolo.



Fonte: Portasbugs (2015).

De acordo com Mendes et al. (1999), os compensados sarrafeados são produzidos para uso interno, na fabricação de móveis, divisórias de painéis, portas e outros serviços de carpintaria. A produção de compensados sarrafeados se torna uma opção viável, principalmente, quando há possibilidade de aproveitamento do rolo resto da laminação, assim como de resíduos de serraria e pequenas peças que, sendo descartadas, podem, então, ser utilizadas para compor o miolo destes painéis.

Para uma produção de compensado sarrafeado de qualidade, sem problemas quando da sua utilização, devem-se utilizar espécies de baixa anisotropia da madeira e, quando utilizar espécies diferentes, procurar aquelas com as mesmas características, tais como massa específica, contrações radiais e tangenciais (MENDES et al., 2010b).

Quando a colagem de sarrafos ocorre lateralmente e no topo por *finger joints*, com ou sem acabamento superficial com lâminas de madeira, a denominação *blockboard* é mais apropriada, porém continua sendo caracterizado como um painel sarrafeado (Figura 3). São muito utilizados na formação de painéis decorativos e também em portas.

Figura 3 - Painel sarrafeado *blockboard*.

Fonte: Hanson (2015).

g) Pequenos objetos de madeira

Sternadt (2002) explica que uma solução interessante para o aproveitamento de resíduos à base de madeira dos setores madeireiro e moveleiro seria a confecção de pequenos objetos de madeira através de estímulos para a criação de pequenas empresas. Estes pequenos objetos poderiam ter cunho doméstico ou servir como algo de uso educativo, pessoal, ou ainda esportivo, o que poderia proporcionar melhorias na fonte de renda de trabalhadores e reduzir a problemática dos resíduos, além de proporcionar uma melhor valoração da matéria-prima. Uma simples instalação de equipamentos no próprio pátio de uma serraria e uma parceria com marceneiros ou pessoal treinado e qualificado seria uma boa alternativa.

O desenvolvimento de uma chapa de partículas homogêneas mediante utilização de madeiras do nordeste brasileiro de densidade mais elevadas foi alvo de pesquisa de Nascimento (2003). A autora também desenvolveu alguns pequenos objetos, mostrando a potencialidade de utilização dos resíduos gerados quando do beneficiamento primário das madeiras. Ainda segundo a autora, como alternativa de matéria-prima, há o aproveitamento de resíduos industriais grosseiros, tais como costaneiras, sobras de destopo, miolos de toras laminadas e cavacos de madeira oriundos do beneficiamento de indústria de móveis e carpintaria, que foram coladas e prensadas mediante calor com a adição de adesivos, apontando o uso dos resíduos como viável no aproveitamento.

Nas indústrias de painéis reconstituídos à base de madeira, o volume de resíduos gerado também é expressivo. Abreu et al. (2009) mencionam que a indústria moveleira contribui para a geração desses resíduos, o se que apresenta como uma alternativa viável para a exploração de sua aplicação na produção artesanal de pequenos objetos. Os autores avaliaram a produção de pequenos objetos com painéis e com uma mistura de resíduos de painéis de madeira a fim de comparar suas qualidades com aqueles confeccionados com madeira sólida. Foram confeccionados pequenos objetos utilizando painéis de MDF, OSB e compensado, além de madeira sólida. Os resultados apontaram que todos os painéis são adequados para a confecção dos objetos e alguns se destacam mais em relação aos outros. No entanto, a mistura de resíduos de diferentes painéis influenciou negativamente no acabamento,

beleza e cor, indicando ser plenamente viável a produção de pequenos objetos a partir de resíduos de painéis de madeira vindos de indústrias moveleiras.

O desenvolvimento da técnica de *ecodesign* também vem sendo estudado por alguns pesquisadores. Pereira e Carvalho (2010) aperfeiçoaram esta técnica e a aplicaram em resíduos de eucalipto mediante a utilização de softwares específicos na região do Vale do Jequitinhonha em Minas Gerais. Segundo as autoras, isso permitiu uma análise do ciclo de vida dos produtos desenvolvidos. O trabalho foi centralizado em dois aspectos principais descritos a seguir: a) design de produto: análise da matéria-prima alternativa gerada a partir do uso do resíduo e análise do ciclo de vida; e b) mercado: análise da produção do insumo resíduo e inserção estratégica dos novos produtos no mercado. As pesquisadoras mostraram que é possível a agregação de valor em pequenos objetos de madeira confeccionados com resíduos de diferentes espécies e formas.

A busca por novas alternativas de uso para madeira de eucalipto proveniente de resíduos de serrarias também foi objeto de pesquisa de Vieira (2006). O autor trabalhou na confecção de pequenos objetos de madeira de forma a contribuir para o atendimento de demandas da sociedade, na geração de postos de trabalho e, sobretudo, no fortalecimento da economia estadual. Os materiais produzidos obtiveram boa aceitação, tanto na parte de trabalhabilidade da madeira quanto nas exposições em feiras e em mostras de artesanato. A excelente aceitação dos visitantes indicou haver possibilidades de aproveitar os resíduos de serrarias como matéria-prima para confecção de objetos a partir de resíduos de madeira de eucalipto.

4. Considerações Finais

Com base no exposto até aqui, pode-se apontar duas considerações básicas. A primeira é que se observa a importância da utilização dos resíduos agrícolas e/ou florestais na produção de painéis constituídos, sejam eles puros ou mistos. A segunda é que há necessidade de se buscar novas tecnologias para aprimoramento de painéis constituídos à base de resíduos, principalmente na disseminação de conhecimento e formação de mão de obra especializada.

A busca pela superação da tecnologia é uma necessidade para a modernização de todos os setores da sociedade. Para tanto, deve-se investir de forma maciça na tecnologia, buscando com isso atingir estágios superiores de desenvolvimento das forças produtivas, sobretudo na organização política e social. É dentro dessa lógica que o desenvolvimento da pesquisa pode chegar aos consumidores.

As empresas são constantemente pressionadas a deixar de comercializar produtos ou mesmo utilizar processos que representem elevadas perdas de recursos florestais em suas diferentes etapas de produção, buscando, desta forma, alcançar a sustentabilidade.

As pesquisas apontam que o Brasil apresenta boas características para aumentar a crescente demanda interna por painéis de madeira, especialmente aqueles que constituem móveis populares. Em resumo, a indústria nacional de painéis de madeira tem a vantagem de uma situação extremamente vantajosa, seja pelas dimensões e dinamismo do mercado interno, seja pelo acesso à matéria-prima pura ou "reciclável", além de poder sustentar uma expansão considerável da produção atual.

PAINÉIS RECONSTITUÍDOS À BASE DE MADEIRA DE EUCALIPTO

Brunela Pollastrelli Rodrigues, Dercílio Junior Verly Lopes, Vinícius Peixoto Tinti,
Fabricio Gomes Gonçalves, Edvá Oliveira Brito

1. Introdução

O gênero Eucalyptus L'Herit (1788) pertence à família Myrtaceae, contendo cerca de 900 espécies botânicas identificadas com base em diferenças morfológicas, sendo quase todas nativas da Austrália, com exceção do Eucalyptus urophylla, que ocorre na Indonésia, e do *Eucalyptus deglupta*, que ocorre na Indonésia e Papua Nova Guiné. Muitas destas espécies são sensíveis ao local de crescimento, tendo preferências particulares quanto ao tipo de solo (argiloso e arenoso) e de chuva (inverno e verão), que venham a favorecer o seu crescimento (BOLAND et al., 2006).

A difusão desse gênero ao redor do mundo começou pelo Chile em 1823 e na Espanha e Portugal por volta de 1854 (VIANA, 2005). De acordo com Torres et al. (2011), o eucalipto foi introduzido no Brasil no final da década de 1870 com plantios de caráter cênico de pouquíssimos indivíduos. Apenas em 1903 iniciou-se o plantio visando ao fornecimento de madeira para produção de dormentes de linhas ferroviárias.

No início da década de 1960, o governo brasileiro decidiu estimular a produção de papel e celulose, até então importados. Em 1966, já havia cerca de 400 mil hectares de florestas plantadas. Em 1974, o Governo Federal criou os Fundos de Investimentos (Decreto-Lei Nº 1.376, de 12 de dezembro de 1974), com atenção especial para programas de incentivo ao plantio de florestas para atender necessidades energéticas e de matéria-prima para a indústria. Em 1988, o Brasil possuía cerca de 6,2 milhões de hectares reflorestados, sendo 3,25 milhões de hectares com eucalipto (AZEREDO, 1998). O país tinha a maior disponibilidade imediata de florestas em idade de corte do mundo, com 22% do reflorestamento mundial de eucaliptos (FLYNN; SHIELD, 1999).

De acordo com Scanavaca Junior e Garcia (2003), no Brasil o gênero Eucalyptus destinava-se principalmente a empresas de celulose e papel ou siderúrgicas, porém o baixo preço do carvão mineral e a oscilação do preço da celulose e papel, além das pressões ecológicas do uso de madeiras nativas fizeram com que este gênero assumisse um papel cada vez mais importante nos produtos sólidos de madeira.

No ano 2000, o Brasil era o 6º maior produtor de painéis compensados, respondendo por 9,1% de todo o volume transacionado internacionalmente. Em 2011, o Brasil permaneceu na 8ª posição, sendo responsável por 6,2% do total de exportações do produto. Ainda em relação aos painéis compensados, os preços reais internacionais do produto acumularam um crescimento real de 37,7% no período de 2000 a 2011 (2,9% a.a). Entretanto, esse valor recebido pelos produtores brasileiros acumulou uma perda de 19,8% no mesmo período (2,0% a.a). Essa perda foi ocasionada por efeito do aumento da taxa de câmbio, da inflação e dos custos de produção em 51,1%, segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2012).

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira (ABIPA,

2013), estão previstos novos investimentos nas indústrias com valores aproximados de US$ 1,2 bilhão na instalação de novas unidades industriais que irão proporcionar uma produção anual de, aproximadamente, 10,9 milhões de metros cúbicos anuais. Para a fabricação de painéis de partículas de média densidade (MDP), houve um aumento de 53,82% e 71,07% no consumo interno e na capacidade nominal instalada, respectivamente, do ano de 2005 a 2012. Já para a fabricação de painéis de fibras de média densidade (MDF), o aumento foi de 158,53% e 201,47%, respectivamente, no consumo interno e na capacidade nominal instalada para o mesmo período. Em contrapartida, para a fabricação de painéis de fibra de alta densidade (HDF), houve um decréscimo de 6,21% e 26,66%, respectivamente, no consumo interno e na capacidade nominal instalada.

2. A madeira de eucalipto

A utilização da madeira de eucalipto como produto serrado ainda é muito pouco explorada no Brasil e isso se deve, basicamente, a certos preconceitos e mitos, os quais são, em grande parte, devido ao início de sua introdução no Brasil ocorrer com propósitos energéticos. Devido à exuberância das florestas naturais, à cultura extrativista e ao baixo nível tecnológico, as espécies reflorestadas foram relegadas a usos menos nobres. Sua utilização como postes, escoras e palanques, bem como cruzetas para redes elétricas, é um dos setores bem estabelecidos (KIKUTI; FANTINI JÚNIOR, 1997).

As características da madeira do eucalipto o tornam indicado para diferentes usos, entre as quais se destacam o papel e a celulose, a laminação, a movelaria, as estruturas, a caixotaria, os postes, as escoras, os mourões e o carvão, sendo o *Eucalyptus grandis*, o *E. urophylla*, o *E. saligna*, o *E. tereticornis*, o *E. globulus* e o *E. viminalis* as espécies mais plantadas no mundo (ALZATE, 2004). No Brasil, destacam-se as espécies *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla*, *E. saligna, E. cloeziana e E. citriodora. Entre os híbridos*, destaca-se o híbrido *Eucalyptus urophylla* x *grandis*, além de híbridos provenientes de cruzamentos com a espécie *E. globulus.*

A carência de algumas técnicas em setores como beneficiamento, problemas ambientais e expectativa subestimada sobre a durabilidade natural da madeira de eucalipto são barreiras que ainda persistem e necessitam ser transpostas.

Dentre as principais características desfavoráveis que envolvem a madeira de eucalipto estão as tensões de crescimento. Gonçalves (2006) menciona que estas tensões podem estar associadas à predominância e direção de ventos. Há ainda as contrações por ocasião da secagem, do colapso e da presença de fibras reversas. Entretanto, esses problemas podem ser minimizados através do emprego de tecnologia adequada e da seleção de clones menos suscetíveis, havendo, desta forma, uma necessidade de incorporar novas tecnologias para se obter madeiras de eucalipto de boa qualidade e com características desejáveis para a madeira serrada e outros produtos. O mercado mundial de produtos derivados de madeira tem experimentado inúmeras transformações em virtude do acelerado desenvolvimento tecnológico e dos novos padrões de exigência dos mercados consumidores, o que já faz parte do cotidiano

de muitos países.

No segmento de painéis reconstituídos, predominantemente no Brasil, a madeira de eucalipto é muito utilizada para obtenção de fibras para painéis HDF e celulose. Em painéis MDF, o pinus tem a preferência, ocupando mais de 50% na fabricação mundial, seguido de 20% para espécies de folhosas e 20% para painéis com mistura de coníferas e folhosas. Ainda há uma pequena fração de 10% que utiliza outras fontes de resíduos lignocelulósicos, como bagaço de cana de açúcar e talos de algodão.

Na laminação de toras, a rachadura de topo é, de acordo com Jankowsky e Aguiar (1983), o principal problema. Isto se deve à dificuldade das garras, sobretudo as retráteis, se fixarem no topo de toras rachadas, o que aumenta as rachaduras quando o esforço requerido para o corte é aumentado, fazendo com que a mesma se torne inutilizada para a produção de lâminas.

3. Tipos de painéis

A madeira serrada apresenta proporções geométricas que se caracterizam, normalmente, por apresentar um comprimento maior que a largura. Os painéis, suprindo uma necessidade dimensional que não é atendida pelo uso da madeira serrada, têm a sua superfície útil ampliada através da expansão da largura. Ao mesmo tempo, nos painéis tenta-se simular, ou melhor, manter as características originais da madeira, visando usá-los para diversos fins (NAHUZ; WATAI, 1998).

Os tipos de painéis reconstituídos de madeira estão relacionados basicamente com o nível de transformação que passa a madeira. Denominam-se painéis laminados aqueles painéis reconstituídos em lâminas (compensados e sarrafeados); painéis de partículas aqueles painéis reconstituídos de partículas fragmentadas a partir da madeira (aglomerados, OSB e *waferboard*); e painéis de fibras aqueles painéis reconstituídos a partir da madeira desfibrada (chapa isolante, dura e MDF).

3.1 Painéis a partir de fibras

O nome do produto MDF foi criado por Harry Raddin e utilizado na descrição do processo de fabricação da chapa de fibra de média densidade em um simpósio em Washington, nos Estados Unidos, em 1967. A partir de então, as iniciais MDF passaram a identificar o termo *Medium Density Fiberboard*. Estas chapas possuem características que se aproximam da madeira sólida, suas propriedades físico-mecânicas propiciam aplicações variadas, mas a sua grande aceitação se deveà excelente trabalhabilidade no processo de usinagem e de acabamento superficial (SILVA, 2003).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 15316-1 (2002), os painéis de fibra de média densidade são confeccionados quando o colchão de fibras, na linha de formação, encontra-se com teor de umidade abaixo de 20% e a densidade do painel é maior ou igual a 450 kg m^{-3} sob ação de calor e pressão mediante adição de adesivo sintético. A Tabela 1 apresenta a classificação para os painéis de fibras.

Tabela 1 - Classificação de painéis de fibras.

Tipo	Densidade (g cm^{-3})
Não Prensados	
Painéis Isolantes (semirrígido)	0,02 a 0,15
Painéis Isolantes (rígido)	0,15 a 0,40
Prensados	
Painéis de Média Densidade (MDF)	0,50 a 0,80
Painéis de Fibras Duras	0,80 a 1,20
Painéis de Alta Densificação	1,20 a 1,45

Fonte: Iwakiri (2005).

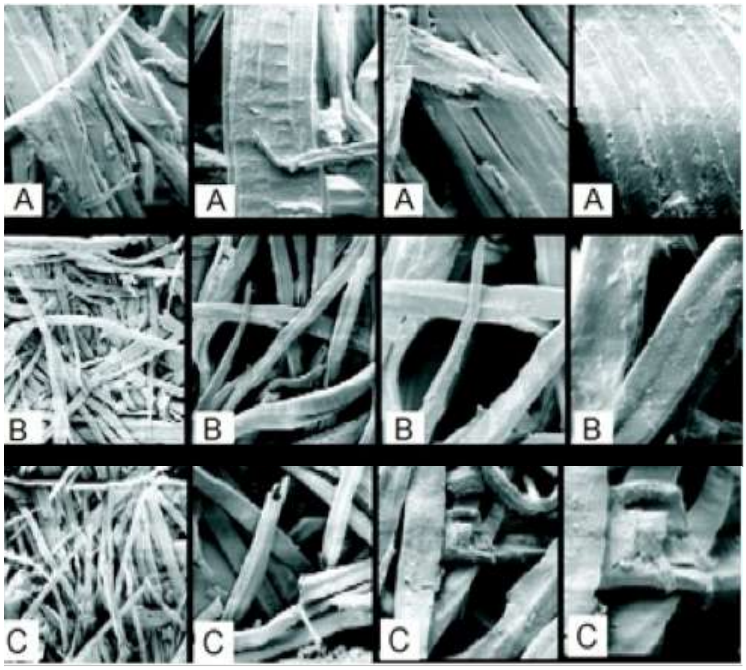
Segundo Belini et al. (2010), no Brasil a produção de painéis MDF era exclusivamente à base de pinus, sendo que, a partir do ano de 2003, a madeira de eucalipto já era utilizada em 17% da produção, atingindo 23,1% após 2006 e indicando uma crescente tendência da participação da madeira deste gênero na produção nacional de painéis MDF.

As espécies mais utilizadas atualmente são o *Eucalyptus saligna*, o *E. robusta* e o *E. grandis*. Estas espécies são preferíveis em função das menores dimensões das fibras, permitindo, desta forma, uma melhor prensagem. O processo produtivo consiste, basicamente, em transformar a madeira em fibras, prensá-la, banhá-la em água e deixá-la unir novamente mediante a própria lignina e o uso de adesivos. São muito utilizadas em móveis, pranchetas, embalagens, brinquedos, isolantes térmico e acústico.

A utilização da madeira de eucalipto para a produção de painéis MDF apresenta vantagens em relação à de pinus, tais como menor ciclo de corte das árvores, maior rendimento na conversão do volume de madeira por volume de painel MDF, utilização integral das toras com a casca, fibras de menor comprimento que proporcionam melhor qualidade pós-usinagem do painel, entre outras. Belini (2012), porém, apresenta a desvantagem de ser um painel de coloração mais escura.

A madeira de eucalipto apresenta características satisfatórias para a produção de painéis à base de fibras, conforme mencionaram Belini et al. (2008) ao estudarem a estrutura anatômica, densidade básica e morfologia de cavacos de madeira de *Eucalyptus grandis* para a produção de MDF (Figura 1). Os resultados indicaram valores médios de 1005; 19,7; 11,8 e 3,9 µm para o comprimento, a largura, o diâmetro do lume e a espessura média da parede das fibras, respectivamente. Estes resultados são similares a outras literaturas especializadas (TOMAZELLO FILHO, 1985; OLIVEIRA, 1997; ALZATE, 2004), podendo se inferir que a qualidade da produção do painel deve-se, sobretudo, às características de prensagem dos equipamentos e não às características anatômicas da madeira empregada.

Figura 1 - Características das fibras dos painéis MDF de madeira de *Eucalyptus grandis* em três condições de desfibramento: (A) de menor intensidade, (B) intermediário e (C) de maior intensidade (aumentos de 200, 500, 1.000 e 2.000 X).



Fonte: Belini et al. (2008a).

Em outro estudo Belini e Tomazello Filho (2010), ao avaliarem as propriedades tecnológicas de painéis de madeira de Eucalyptus grandis confeccionados em laboratório e em linha de produção industrial, obtiveram os resultados constantes na Tabela 2. Como pode ser observado, a madeira de *E. grandis* cumpre com as exigências da NBR 15316-1 para as principais características que um painel deve ter.

Tabela 2 - Propriedades de painéis MDF obtidos em laboratório e linha de produção industrial.

Propriedades tecnológicas	Procedência		NBR 15.316
	Laboratório	Indústria	
Módulo de Ruptura (MPa)	36,1	44,7	Mínimo 20
Módulo de Elasticidade (MPa)	3.776	4.283	Mínimo 2.200
Ligação Interna (MPa)	1,01	1,00	Mínimo 0,55
Inchamento em Espessura (%)	9,5	5,8	Máximo 12%

Fonte: Adaptado de Belini; Tomazello Filho (2010).

O processamento da madeira para obtenção das fibras visando produção de painéis MDF deve ser realizado com muito cuidado e atenção, uma vez que, segundo Belini (2007), um aumento na intensidade de refino dos cavacos resulta em maior colapso dos componentes celulares e perda de resistência dos painéis. Isto, por sua vez, dificulta o recobrimento de suas paredes pelo adesivo, o que aumenta a área superficial com o seu entrelaçamento e afeta as propriedades físicas e mecânicas dos painéis, proporcionando os piores desempenhos na resistência à tração perpendicular, superficial, arrancamento de parafuso de topo, inchamento e absorção de água.

3.2 Painel aglomerado

O painel de partículas aglomerado, *Medium Density Particleboard* (MDP) é produzido a partir de pequenas partículas de madeira impregnadas com resina sintética (em sua maioria, ureia formaldeído) e consolidado por meio da aplicação de calor e pressão. É um produto amplamente empregado na fabricação de móveis em razão de suas características tecnológicas, custo competitivo e escala de produção (KOLLMANN et al., 1975).

Conforme Iwakiri (2005), os aglomerados possuem uma série de vantagens em relação à madeira serrada, tais como minimização dos efeitos da anisotropia; maior uniformidade de propriedades físico-mecânicas em diferentes pontos do painel; eliminação de defeitos naturais, como nós, inclinação da grã e tensões de crescimento; possibilidade de controle das propriedades físico-mecânicas do painel por meio das variáveis do processo produtivo, como tipo e quantidade de resina, geometria de partículas, grau de densificação, menor exigência em termos da qualidade da madeira, permitindo o uso de resíduos provenientes de outras fontes de processamento; maior produção devido à tecnologia empregada e menor custo de produção.

A Tabela 3 apresenta os valores mínimos para as propriedades mecânicas e os valores máximos para inchamento em espessura exigidos pela norma americana CS 236-66 para classificação de painéis de partículas aglomeradas.

Tabela 3 - Valores mínimos exigidos pela norma CS 236-66 para as propriedades mecânicas e valores máximos para inchamento em espessura para chapas de partículas.

Tipo (uso)	Densidade (g cm^{-3}) Média mínima	Classe 3	MOR (MPa)	MOE (MPa)	LI (MPa)	IE (%)
1[1]	**A** (alta, ≥ 0,80 g cm^{-3})	1	16,80	2450	1,40	55
		2	23,60		0,98	
	B (média, 0,60 g cm^{-3} ≥ densidade ≤ 0,80 g cm^{-3})	1	11,20	2450	0,49	35
		2	16,80	2800	0,42	30
	C (baixa, ≤ 0,60 g cm^{-3})	1	5,60	1050	0,14	30
		2	9,80	1750	0,21	
2[1]	**A** (alta, ≥ 0,80 g cm^{-3})	1	16,80	2450	0,875	55
		2	23,80	3500	2,80	
	B (média, 0,60 g cm^{-3} ≥ densidade ≤ 0,80 g cm^{-3})	1	12,60	1750	0,455	35
		2	17,50	3150	0,42	

[1] Tipo 1 - Chapa de partículas (geralmente feita com resina ureia-formaldeído) adequada para uso em interiores;
[2] Tipo 2 - Chapa de partículas feita com resina durável e altamente resistente à umidade e calor (geralmente resina fenólica) adequada para usos em interiores e certas aplicações em exteriores quando assim classificadas;
[3] Classe - Classificação de resistência baseada nas propriedades dos painéis produzidos;
MOR – Módulo de ruptura; MOE – Módulo de elasticidade; LI – Ligação interna; IE – Inchamento em espessura.

A utilização da madeira de *Eucalyptus urophylla* na fabricação de painéis de partículas aglomerado com tanino da casca de *Eucalyptus pellita* como substituto parcial da resina sintética ureia formaldeído foi objeto de estudo de Tostes et al. (2004). Os autores afirmaram que esta substituição mostrou-se adequada para fabricação de chapas de madeira aglomerada, pois os resultados obtidos para as propriedades físico-mecânicas estavam adequados de acordo com a norma CS 236-66.

Para os painéis produzidos com *E. saligna e E. cloeziana*, foram encontradas altas correlações entre os módulos de elasticidade e de ruptura com a ligação interna e uma tendência de aumento do inchamento em espessura depois de 2 horas, com o aumento da densidade aparente e da razão de compactação.

Rauber (2011) estudou as propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados com madeira de eucalipto e sólidos granulares de poliuretano. Os resultados indicaram que o acréscimo de poliuretano ocasionou aumento na estabilidade dimensional dos painéis, diminuindo os valores de absorção de água e inchamento em espessura. A resistência à tração perpendicular à superfície aumentou significativamente com o aumento da quantidade de poliuretano em sua composição. A dureza Janka diminuiu à medida que aumentou a quantidade de poliuretano na composição dos painéis. Os maiores valores de resistência ao arranchamento de parafusos foram encontrados utilizando 30 e 45% de poliuretano.

Bianche et al. (2012), ao estudarem as propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados fabricados com partículas de *Eucalyptus urophylla*, S*chizolobium amazonicum* e *Sida spp*., constataram que o incremento de partículas de Sida spp. nos painéis teve efeito diferenciado. O incremento da porcentagem de partículas de Sida spp. aos painéis produzidos com eucalipto não afetou a resistência à tração perpendicular, arrancamento de parafuso e dureza Janka e, quanto ao MOR E MOE, os melhores resultados foram encontrados quando se utilizou a composição 75% de Sida spp., 25% de eucalipto (MOR), 25% de *Sida* spp. e 75% de eucalipto (MOE). Os painéis produzidos com partículas de *Sida* spp. absorveram mais água e, por consequência, o inchamento em espessura aumentou, sendo, portanto, não recomendadas para uso em ambientes com alto teor de umidade.

Protásio et al. (2012) avaliaram as correlações entre as propriedades físicas e mecânicas (densidade aparente, razão de compactação, inchamento em espessura, taxa de não retorno em espessura, absorção de água, módulo de elasticidade e ruptura, ligação interna e resistência à compressão) de painéis aglomerados de *Eucalyptus grandis, E. saligna* e *E. cloeziana*, aos 31 anos de idade. Segundo os autores, os painéis produzidos com E. grandis apresentaram uma tendência de acréscimo linear no módulo de elasticidade com o aumento da razão de compactação e da densidade aparente e uma fraca tendência linear de redução das propriedades de flexão estática com o aumento da absorção de água.

Soratto et al. (2013) estudaram o efeito da adição de cavaco com casca na qualidade de painéis MDP produzidos com *Eucalyptus sp*. As propriedades dos painéis foram avaliadas de acordo com a NBR 14810 (ABNT, 2006) e, segundo os resultados, não houve efeito da inclusão de cavaco com casca nas propriedades mecânicas e, quanto às propriedades físicas, verificou-se que a absorção superficial não foi alterada até 12% de adição de casca na composição do painel. De modo geral, os painéis absorveram mais água que o estabelecido pela NBR 14810 (2006) e a adição de até 6% de cavacos na composição do painel não ocasiona comprometimento da qualidade dos mesmos.

Pierre, Ballarin e Lara Palma (2014) estudaram a fabricação em linha industrial de painéis aglomerados de três camadas com madeira de *Eucalyptus grandis* e resíduos industriais madeireiros

(material reciclado de paletes e serragem) em diferentes proporções (de 10% a 35% em volume). Os resultados revelaram que os painéis estudados tiveram bom desempenho físico, atendendo, no geral, às especificações técnicas estabelecidas pelas normas técnicas, sendo que o teor de umidade final do painel teve efeito nas propriedades estudadas com tendência generalizada de redução nos valores de absorção de água e inchamento em espessura (umidade final passando de 9% para 12,5%).

Um resumo dos valores médios das principais propriedades de aglomerados fabricados com *Eucalyptus* estão presentes na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades tecnológicas de painéis tipo OSB fabricados a partir da madeira de eucalipto (LI = Ligação Interna; MOE = Módulo de Elasticidade; MOR = Módulo de Ruptura; IE = Inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água).

Espécie utilizada (D=Densidade)	LI ($kgf\ cm^{-2}$)	MOE ($kgf\ cm^{-2}$)	MOR ($kgf\ cm^{-2}$)	IE (%)
Eucalyptus grandis (D = 0,61 g cm^{-3})	5,83 c*	57.043 a	414 b	15,71 a
Eucalyptus dunnii (D = 0,78 g cm^{-3})	2,74 ab	49.907 a	212 ab	60,86 cd
Eucalyptus tereticornis (D = 0,81 g cm^{-3})	1,10 a	41.681 a	174 a	29,17 b
Eucalyptus saligna (D = 0,73 g cm^{-3})	4,32 bc	49.913 a	287 ab	28,998 c
Corymbia citriodora (D = 0,77 g $cm^{-3)}$	1,20 a	35.809 a	116 a	49,97 c
Eucalyptus maculata (D = 0,76 g cm^{-3})	1,63 c	47.784 a	197 a	67,05 d

* Médias seguidas de mesma letra são estatisticamente iguais à probabilidade de 95%.
** Com base em painéis confeccionados com ureia formaldeído e densidade média (entre 0,60 e 0,80 g cm^{-3}).
Fonte: Modificado de Iwakiri et al. (2004).

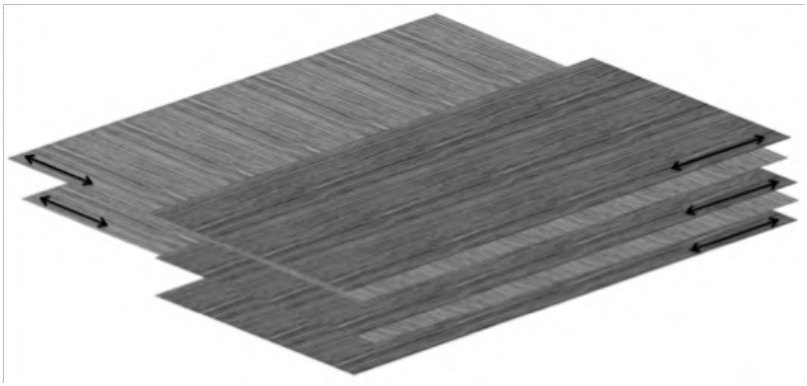
3.3 Painéis compensados

Há milhares de anos atrás os chineses e os egípcios possuíam a prática de raspar e colar a madeira com o objetivo de conseguir superfícies laminadas (SHI; WALKER, 2006). A fabricação de compensado industrial começou por volta da virada do século XX e a fabricação de painéis isolantes se iniciou durante a Primeira Guerra Mundial (SUCHSLAND; WOODSON, 1986).

O compensado é um painel de madeira fabricado por meio da sobreposição de finas lâminas de madeira, em número ímpar de camadas, unidas por adesivos e com direção perpendicular entre as camadas adjacentes (Figura 2). Em sua confecção, pode-se utilizar lâminas compostas de mais de uma espécie e de mesma espessura, podendo ser fabricado em espessuras variadas com número de lâminas ímpares, sendo os mais comuns os compensados de 3, 5, 7 ou 9 lâminas e que variam de 4mm a 21mm (ABNT, 1986). Destacam-se como vantagens da fabricação do compensado a sua elevada estabilidade dimensional, o melhor aproveitamento da tora para sua confecção em lugar do desdobro da tora em

madeira serrada e, ainda, um preço inferior ao da madeira maciça (OLIVEIRA; FREITAS, 1995; IWAKIRI, 2005).

Figura 2 - Posicionamento das lâminas na formação do compensado.



Fonte: Elaborado pelos autores.

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI, 2009), a indústria de compensado possui quase ⅔ da produção direcionada para o mercado externo.

O compensado pode ser utilizado nas mais diversas áreas, como por exemplo construção civil, constituindo portas, divisórias, pisos, forros e formas de concreto; e na indústria moveleira, compondo laterais e fundos de armários e tampos de mesas. Tem sua aplicação, ainda, no setor de embalagens, em caixotarias em geral, podendo ser usado também na fabricação de utensílios e brinquedos e na composição de carrocerias e placas de sinalização. Devido a essa extensa aplicação, sobretudo na construção civil, aplicações estas dificilmente atendidas pelos painéis de madeira reconstituída, tais como o aglomerado e o MDF, o compensado é considerado um produto bastante versátil (ABIMCI, 2009).

Em se tratando de espécie que apresenta rápido crescimento para o suprimento de madeira no setor florestal, o gênero *Eucalyptus* apresenta-se como a mais importante. De acordo com o anuário estatístico da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2013), o país conta com pouco mais de 5 milhões de hectares de florestas plantadas de eucalipto para atender à demanda dos setores de base florestal.

A utilização comercial do eucalipto para a produção de compensados, embora seja uma alternativa potencial ao abastecimento das indústrias de laminação, é ainda considerada um dilema, uma vez que para a produção das lâminas são necessárias toras com grandes diâmetros, onde os níveis de tensão de crescimento se manifestem de maneira menos acentuada. Essa característica ajuda a minimizar as rachaduras associadas às tensões de crescimento e a diminuir a perda de madeira gerada pelos defeitos de secagem (ALMEIDA et al., 2004).

O primeiro estudo no Brasil relacionado à utilização de eucalipto na produção de lâminas para compensado, de acordo com Bortoletto Junior (2003), foi realizado em 1979 por Jankowsky (1979). O autor utilizou lâminas de *Eucalyptus saligna, E. urophylla* e *E. grandis*, sendo esta última a única que apresentou características de qualidade favoráveis à produção de compensados, o que resultou em um painel de alta densidade, resistente e estável.

De acordo com Aguiar (1986), o *Eucalyptus grandis* pode ser utilizado para a produção de lâminas, desde que seu cozimento seja realizado de maneira adequada, com tempo e temperatura ajustados. Entretanto, por conta da ocorrência de rachaduras, grande parte das lâminas só podem ser utilizadas no miolo do painel compensado.

Entretanto, em um estudo comparando compensados de *Eucalyptus grandis* e *Araucaria angustifolia*, pode-se observar que os resultados encontrados para o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura de E. grandis foram equivalentes ou superiores aos de A. angustifolia, podendo ser recomendado para compensados do tipo externo (GAIOTTO et al., 1993).

4. Considerações Finais

O Brasil apresenta excelentes condições para possíveis ampliações da produção e instalação de novas plantas de indústrias à base de madeira, sobretudo de painéis reconstituídos, devido à grande experiência com a silvicultura de eucalipto já consolidada. Isto se alia à diversidade climática existente no país, principalmente no que se refere a uma curta rotação, reduzindo de forma significativa os custos operacionais ao longo da cadeia produtiva.

A tecnologia vem ampliando a gama de novos produtos derivados da madeira, seja em diferentes formas, seja em combinação com outros materiais. O que sempre se busca é o melhor desempenho do produto para o fim a que o mesmo se destina, a otimização do uso da matéria-prima e, sobretudo, a redução dos custos de processamento. Muitos dos processos desenvolvidos baseiam-se no emprego de matéria-prima *in natura*, de madeira produzida em florestas de rápido crescimento especialmente para um determinado fim.

O mercado requer produtos de bom desempenho, menor custo, esteticamente mais agradáveis e produzidos sem prejuízos ao meio ambiente. Da mesma forma que ocorreu com o eucalipto para a obtenção da celulose e fabricação do papel, o setor madeireiro vem buscando alternativas tecnológicas que maximizem as condições amplamente favoráveis, mediante os avanços da silvicultura, no que se refere à busca de uma matéria-prima que atenda às exigências mercadológicas voltadas para painéis reconstituídos à base de madeira.

A LIGNINA COMO ADESIVO NA INDÚSTRIA MADEIREIRA

Fabricio Gomes Gonçalves, Roberto Carlos Costa Lelis, Juarez Benigno Paes

1. Introdução

Os adesivos, conforme a origem das matérias-primas empregadas para a sua obtenção, podem ser classificados em sintéticos (convencionais) e naturais. Dentre os adesivos sintéticos estão o fenol-formaldeído, a ureia-formaldeído, a melamina-formaldeído, o resorcinol-formaldeído, o poliuretano, o epoxy e o acetato de polivinil (VICK, 1999). Os adesivos naturais são aqueles à base de carboidratos, taninos, diisocianatos e ainda aqueles à base de lignina.

A lignina é um dos componentes principais da madeira e, segundo Frihart (2005), pode estar contida entre 24 a 33% nas coníferas e 16 a 24% nas folhosas. É um polímero de estruturas fenólicas complexas e irregulares (WEGNER et al., 1989), com sua unidade estrutural básica composta de fenóis (MATSUSHITA, 2006), e responsável por conferir rigidez ao vegetal.

A lignina, extraída pelas empresas produtoras de celulose que empregam os processos semiquímicos bissulfito e sulfito neutro, vem sendo estudada como matéria-prima para a fabricação de adesivos e para a indústria de curtimento de peles. De acordo com Pizzi (2003), as primeiras patentes empregando a lignina para a produção de adesivos para madeira são datadas do início do século IX. Mesmo assim, ainda se emprega uma grande quantidade de lignina para a geração de energia em muitas indústrias, indicando um potencial crescente e pouco explorado em nível mundial para a obtenção de produtos de maior valor agregado.

Apesar de quase toda a lignina produzida ser queimada para geração de energia (KLEINERT; BARTH, 2008; STEWART, 2008) e recuperação de agentes químicos, uma pequena fração é separada por acidificação do licor, filtrada e vendida na forma de pó. Este produto profundamente modificado é insolúvel em água e, em sua totalidade, é a lignina. Uma grande porcentagem da lignina *Kraft* comercializada é na forma de sulfometilato, que é a sua forma solúvel em água (HERNÁNDEZ, 2007).

Segundo Chow (1983), a produção de adesivos à base de lignina ocorre basicamente por dois métodos. O primeiro ocorre por meio da lignosulfonatação da lignina obtida nos processos semiquímicos bissulfito e sulfito neutro e o segundo ocorre pela utilização da lignina extraída pelo processo *kraft*, um importante resíduo da extração da celulose. De acordo com Chow (1983), o adesivo obtido pelo primeiro método, embora possua uma boa qualidade de colagem, apresenta o risco causado pela acidificação do painel e a consequente degradação da madeira em longo prazo, bem como a ocorrência de corrosão de pregos, parafusos e outros conectores metálicos.

Na Tabela 1 são apresentadas as composições dos licores negros do processo *Kraft* de madeiras de folhosas e coníferas.

Tabela 1 - Composição típica dos licores negros do processo *Kraft*.

Componente	Composição na madeira (% em peso)	
	Conífera	Folhosa
Lignina	45	38
Ácidos Xilososacárico	1	5
Ácidos Glucosacárico	14	4
Hidroxiácidos	7	15
Ácido Fórmico	6	6
Ácido Acético	4	14

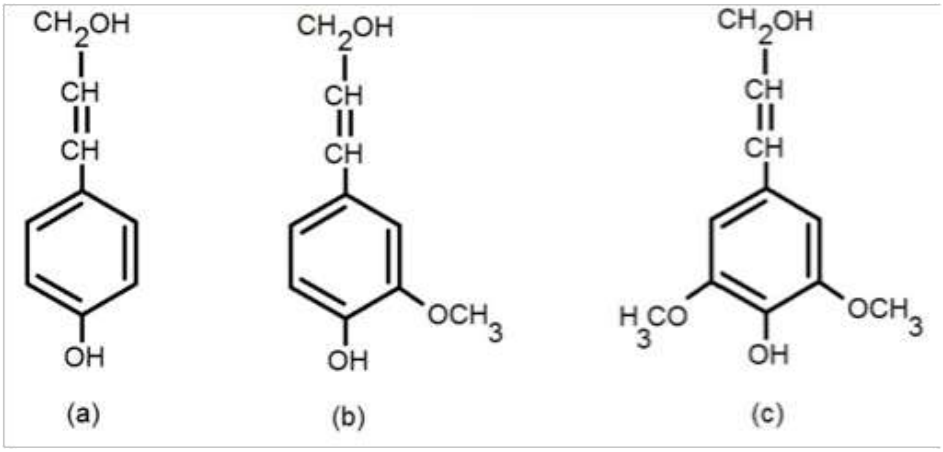
Fonte: Lin; Lin (1990) apud Hernández (2007).

2. A lignina

A lignina é um polímero fenólico que contém em sua estrutura grupos alifáticos e aromáticos, entre diferentes anéis fenilpropânicos interligados por meio de diferentes tipos de ligações (ABREU, 1994), como do tipo carbono-carbono mencionado por Rowell et al. (2000). De acordo com El Mansouri et al. (2007) e Khan e Asharf (2007), a grande variedade de grupos funcionais presentes na lignina atuam como centros ativos para interações químicas e biológicas.

A lignina é composta por três monômeros principais, a guaiacila (álcool coniferílico), a sirigila (álcool sinapílico) e a para-hidroxifenila (álcool cumarílico), que diferem entre si pela presença dos grupos orto-metil no lugar do anel aromático (DOHERTY et al., 2007; HANSEL et al., 2010) (Figura 1), o que, segundo Ramires (2010), varia de acordo com a espécie e o método de extração para sua obtenção. Wegner et al. (1989) e Hansel et al. (2010) citam que a lignina é do tipo guaiacila nas madeiras de coníferas e do tipo siringila e guaiacila nas madeiras de folhosas, como as do gênero eucalipto.

Figura 1 - Principais unidades presentes na lignina: (a) para-hidrofenila, (b) guaiacila e (c) sirigila.



Fonte: Rowell et al. (2005).

A lignina, de acordo com Pérez et al. (2009) e Sarkar e Adhikari (2001), pode ser utilizada

como substituta do fenol na formulação de resinas fenólicas devido à presença de anéis aromáticos do tipo fenólico em sua estrutura, que podem reagir com o formaldeído.

2.1. Fontes de lignina

A estrutura polifenólica da lignina combinada com sua disponibilidade possui potencial para síntese de resinas para a indústria madeireira. No segmento florestal, a mais importante é oriunda de empresas que retiram a celulose de árvores de espécies de rápido crescimento, obtendo como resíduo a lignina por meio do processo *kraft* (VAN DER KLASHORST et al., 1985; ENGLISH et al., 1997; SARKAR; ADHIKARI, 2000; LI e GENG, 2004; SELLERS JUNIOR et al., 2004; BORGES et al., 2006; EL MANSOURI e SALVADO, 2006; GENG; LI, 2006; STEWART, 2008) ou ainda mediante aquisição de ligninas comerciais, como no caso dos lignosulfatados (MATUANA et al., 1993; ÇETIN; ÖZMEN, 2002 b; SELLERS JUNIOR et al., 2004; EL MANSOURI; SALVADO, 2006; EL MANSOURI, 2007).

Segundo Frihart (2005), o baixo custo da lignina contribuiu de forma decisiva para sua incorporação aos adesivos, apesar de ainda se empregar a lignina obtida do processo Kraft como fonte de energia nas fábricas de celulose. Os grupos funcionais fixados aos anéis fenólicos da lignina se diferem entre si e, dependendo da matéria-prima, influenciam na sua reatividade (BORGES et al., 2006; RAMIRES, 2010).

De acordo com Ramires (2010), os anéis aromáticos presentes na lignina obtida pelo processo *Kraft* possuem uma baixa reatividade com o formaldeído por causa do menor número de para-hidroxifenila em sua estrutura.

Há exemplos também de outras fontes orgânicas das quais poderiam se obter lignina, tais como da cana-de-açúcar (ENGLISH et al., 1997; CARVALHO; FROLLINI, 1999; KHAN et al., 2004a; PARKA et al., 2008; RAMIRES, 2010), das cascas de eucalipto (KHAN et al., 2004b; RAMIRES, 2010), das cascas de pinus (FRADINHO et al., 2002), das folhas e dos frutos de árvores (CHOW, 1983) e de resíduos agrícolas como casca de café (*Coffea arabica*) (BARCELOS et al., 2001) e de coco da baia (*Cocos nucifera*) (HAN, 2013).

2.2. A obtenção da lignina

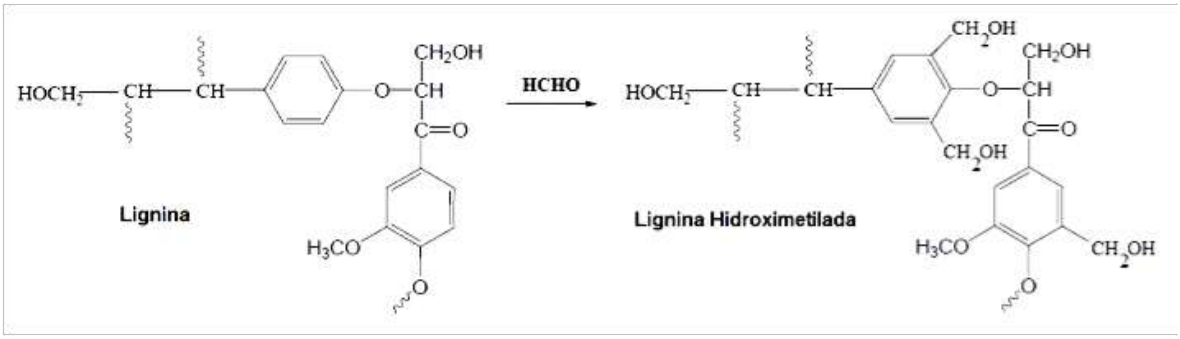
Segundo El Mansouri (2007), os adesivos à base de lignina, obtidos a partir da madeira para uso em aglomerados, atendem às exigências internacionais, principalmente aquelas em que a lignina possui uma baixa massa molecular. Os autores citados realizaram análises com adesivos à base de lignina em aglomerado, substituindo o formaldeído por um composto não tóxico e não volátil e por um aldeído, o glioxal, porém com poder de cura mais lento. Os resultados apontaram que o adesivo formulado teve bons resultados. A exceção ocorreu para o teste de ligação interna, que foi abaixo do exigido internacionalmente.

As características de superfície de resina à base de fenol formaldeído e lignina foram determinadas através da medida de ângulo de contato e cromatografia gasosa inversa e estabelecidos por Matsushita et al. (2006). Segundo os autores, o componente de ácido-base da adesão entre a água e as resinas aumentam com a quantidade de lignosulfato substituída, proporcionando à resina fenol-formaldeído-lignosulfatada uma menor resistência ao umedecimento que a resina

de fenol-formaldeído.

Para a obtenção da lignina, visando produzir uma resina lignofenólica e lignina-formaldeído, primeiramente deve-se promover a sua hidroximetilação (Figura 2), isto é, promover a reação do formaldeído com a lignina nas posições orto presentes no anel aromático. Após esta reação ocorre a condensação da lignina hidroximetilida com o fenol ou com outra molécula de lignina.

Figura 2 - Ilustração da hidroximetilação dos anéis fenólicos presentes na macromolécula da lignina.



Fonte: Ramires (2010).

2.3. Preparo da lignina para adesivo

Wegner et al. (1989) citaram que a preparação da lignina para uso em adesivo requer temperaturas altas e longo tempo de aquecimento ou ainda a utilização de ácidos nas reações.

Çetin e Özmen (2002b) realizaram ensaios de substituição da resina fenólica formaldeído pela adição de lignina. Foram utilizadas duas metodologias, sendo uma a substituição gradual com lignina pura e a outra a substituição com lignina fenotada comercial. De acordo com os resultados, ambas as resinas exibiram boas propriedades de cura quando comparadas à resina comercial fenólica.

De acordo com Parka et al. (2008), incrementando-se o conteúdo de lignina nos adesivos fenólicos ocorre aumento na velocidade de cura e no calor de absorção da reação, promovendo ainda uma redução no ângulo de contato entre o adesivo e a superfície aderente. Khan et al. (2004a) afirmam que este aumento da lignina também proporciona reduções nas propriedades de cisalhamento em colagem de madeira e no tempo de gelatinização do adesivo, apesar de ocorrer o aumento da densidade do painel.

A extração da lignina da casca de eucalipto e sua subsequente substituição em um adesivo à base de fenol formaldeído foi objeto de pesquisa de Khan et al. (2004b). Os autores realizaram uma caracterização e uma análise da reação pela técnica da calorimetria diferencial exploratória e de infravermelho para avaliar suas propriedades tecnológicas. Segundo esses autores, uma substituição de até 50% em massa do adesivo fenólico por lignina é possível em consequência das semelhanças estruturais com os adesivos fenólicos comerciais, o que é confirmado pela boa estabilidade térmica por meio da baixa temperatura de cura.

Khan e Ashraf (2005) desenvolveram um adesivo com base na lignina presente na casca do café. De acordo com os resultados, a substituição do adesivo fenólico em até 50% surtiu efeitos satisfatórios. Os autores ainda utilizaram as técnicas de calorimetria exploratória diferencial e de infravermelho para avaliarem a qualidade dos adesivos formulados.

2.4. A lignina como adesivo para madeira

Apesar de tender a uma coloração escura, a lignina vem sendo utilizada na colagem de objetos de madeira a temperaturas entre 130 e 150ºC (FRIHART; HUNT, 2010).

A aplicação da lignina como adesivo foi estudada por Calvé et al. (1988) em painéis do tipo *Oriented Strand Board* (OSB). Segundo seus resultados, o comportamento dos painéis mediante a utilização da resina à base de lignina mostrou-se eficiente, com resultados próximos ao adesivo à base de fenol.

Matuana et al. (1993) utilizaram a técnica da calorimetria diferencial exploratória e a análise termogravimétrica na caracterização de vários tipos de adesivos de lignina e fenol formaldeído, bem como em misturas com 20, 30 e 40% em substituição da resina fenólica pela lignina. Os estudos permitiram uma comparação da estabilidade térmica das ligninas, da energia de ativação e do calor de reação e a caracterização da reação de cura das resinas. Segundo os autores, as propriedades avaliadas indicaram que a lignina pode ser usada como um copolímero em adesivos à base de fenóis.

Çetin e Özmen (2002a) demonstraram a viabilidade técnica da utilização da lignina como adesivo potencial em painéis aglomerados por meio da junção com a resina comercial fenólica. De acordo com os autores, a substituição de até 30% deste adesivo comercial é possível sem prejudicar as propriedades tecnológicas dos painéis.

A substituição de até 50% da resina fenólica pela lignina foi realizada por Khan et al. (2004a), que obtiveram bons resultados, quando realizaram colagem de madeira sólida, para as propriedades tecnológicas avaliadas. Parka et al. (2008) substituíram em até 40% a resina à base de fenol formaldeído por lignina do bagaço de cana-de-açúcar. Este adesivo foi aperfeiçoado pelo emprego de outros compostos mediante aplicação de corrente térmica e testes reológicos em diferentes variações de massa. Ambos os trabalhos utilizaram a técnica da calorimetria diferencial exploratória para avaliar algumas das propriedades dos adesivos formulados.

O aumento da proporção da lignina em resinas fenólicas proporciona uma redução na falha em madeira colada, porém não altera a qualidade a ponto de ser desprezado por normas internacionais (Khan et al., 2004 a).

Li e Geng (2004) realizaram uma investigação técnica em um adesivo para madeira visando a uma baixa redução de emissão de formaldeído livre à base de lignina *Kraft* e poliamino-amida. A junção destes dois componentes permitiu aos autores afirmarem que a lignina *Kraft* pode ser utilizada como adesivo para colagem de madeiras. Os resultados ainda indicaram que quando a temperatura e o tempo de prensagem foram aumentados, a força de cisalhamento também foi incrementada, sendo a proporção de 3:1 (lignina : poliamino-amida), respeitando um teor de sólidos inferior a 18%.

Um adesivo à base de lignina *kraft* e polietilenoamina foi estudado por Geng & Li (2006) visando à colagem de lâminas para compensados. Os autores afirmam que a tensão de cisalhamento nas diferentes combinações de temperatura e de tempo de prensagem estudadas aumentou, ligeiramente, com o tempo de prensagem, sendo a temperatura ótima de 140ºC para um tempo de 9 minutos na proporção de 2:1 (lignina : polietilenoamina). Os resultados apontaram que o novo adesivo possui boas características para uso em painéis compensados.

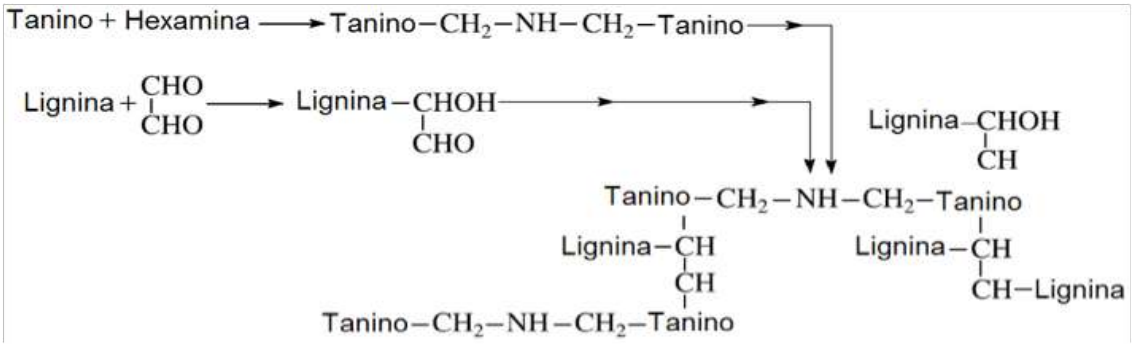
As propriedades térmicas de uma resina à base de lignina-fenol-formaldeído para uso como adesivo para madeira foram analisadas por Khan e Ashraf (2007). Os autores observaram que o

uso da lignina entre 10 e 50% (em massa) como substitutiva do fenol resultou em um adesivo com maior resistência ao cisalhamento quando comparada à resina fenol-formaldeído pura. Ramires (2010) afirmou que a estabilidade térmica das resinas à base de lignina-formaldeído é diferente dependendo da fonte obtida. De acordo com Khan e Ashraf (2007), a lignina obtida a partir da casca do eucalipto é menos estável do que aquela obtida a partir do bagaço da cana-de-açúcar.

A fabricação de painéis de fibra de média densidade (MDF) também foi objeto de pesquisa, utilizando a lignina como agente adesívico, de Lourenço et al. (2008). A lignina utilizada foi previamente ativada com o emprego de enzimas em diferentes combinações dos parâmetros, tais como tipo de lignina, lactases, mediadores de lactase, solventes orgânicos, tempo de incubação, temperatura e aeração. Os resultados indicaram que a resistência interna dos painéis e o isolamento acústico exibiram bons resultados.

Navarrete et al. (2010) extraíram uma lignina de baixo peso molecular a partir da palha de trigo mediante uso de uma solução com ácido acético e fórmico, associando-a com tanino (Figura 3) em substituição à resina fenólica comercial em até 50% em massa, reduzindo, assim, seu poder de toxidez e melhorando as propriedades tecnológicas em painéis aglomerados e compensados. Os autores obtiveram resultados que estão em conformidade com normas internacionais, como as européias EN 312 e EN 314-2 e a japonesa JIS A5908.

Figura 3 - Representação das reações após adição de tanino à lignina.



Fonte: Adaptado de Navarrete et al. (2010).

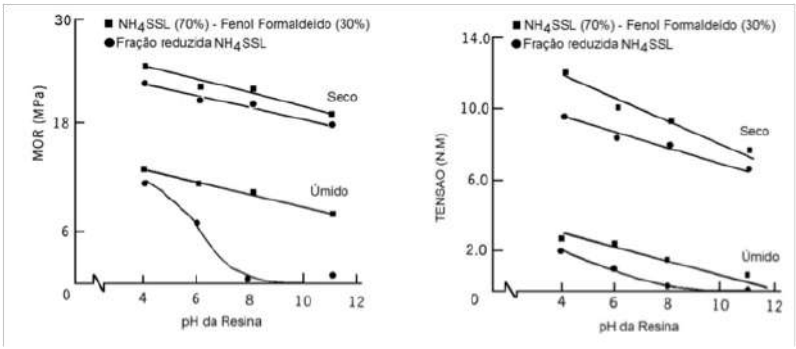
A lignina também foi utilizada em uma mistura com adesivo aminoplástico na confecção de um laminado estrutural por Urdea et al. (2008). Segundo os autores, os resultados foram satisfatórios, exceto quando houve imersão em água quente, a qual proporcionou valores inferiores aos exigidos pelas normas internacionais. Esta técnica também foi aplicada na colagem de madeira para fins estruturais por David et al. (2008) com bons resultados.

Ramires (2010) utilizou como base polimérica a lignina, o tanino e o glioxal como agentes adesívicos associados a fibras naturais de sisal para formação de um biocompósito. O apelo da sustentabilidade nos dias atuais deve ser uma meta, a qual foi buscada e alcançada pelo autor citado. Segundo seus resultados, a fonte da matéria-prima (adesívica e fibrosa), por ser renovável, foi tão boa quanto aquelas tradicionalmente utilizadas, apesar de apresentar algumas variações não significativas em algumas propriedades.

3. Propriedades tecnológicas e os adesivos lignificados

O pH da solução adesívica, quando adicionado lignina, em especial no caso de resinas fenólicas, pode comprometer negativamente algumas propriedades tecnológicas de painéis à base de madeira, conforme foi observado por Calvé et al. (1988) (Figura 4). Os autores utilizaram uma resina fenólica alterada com 70% de uma solução à base de amônia.

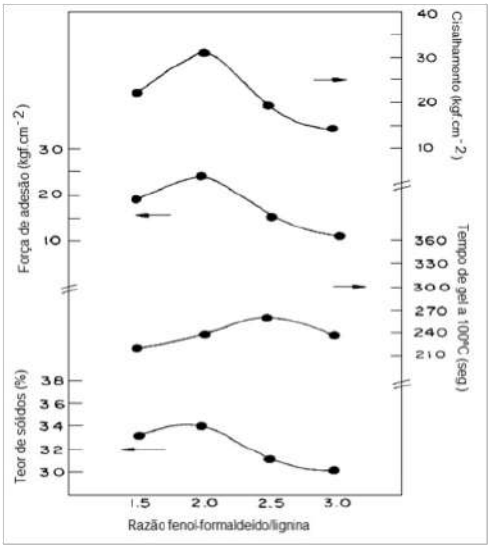
Figura 4 - Efeito do pH da resina à base de sulfito amoniacal (NH^4SSL) nas propriedades tecnológicas em painéis *waferboard*.



Fonte: Calvé et al. (1988).

A adição de lignina à resina fenólica também proporciona variações nas propriedades de colagem e nas características dos adesivos modificados, em especial no cisalhamento e no tempo de gelatinização (*gel timer*) (KHAN et al., 2004a) (Figura 5).

Figura 5 - Efeitos da concentração da lignina nas propriedades físico-mecânicas do adesivo lignina-fenol-formaldeído.

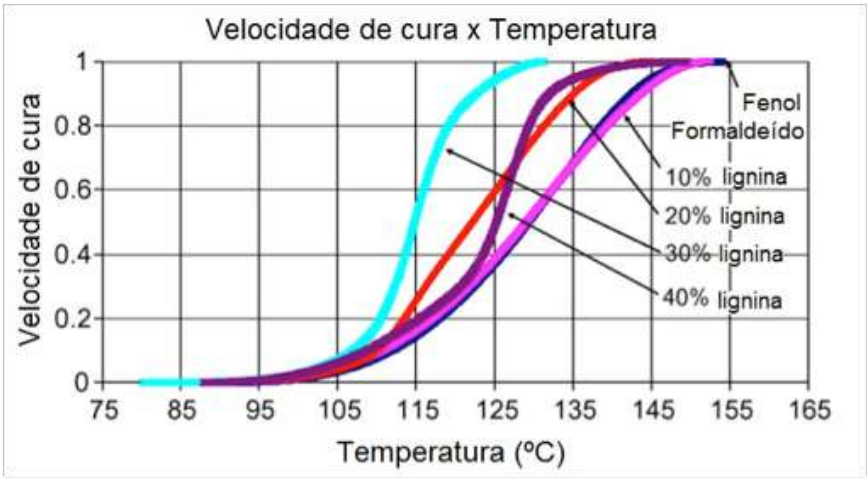


Fonte: Adaptado de Khan et al. (2004 a).

Na Figura 6 é ilustrado o comportamento da resina fenol formaldeído modificada com lignina. Observa-se que o perfil da conversão está relativamente inalterado com adição de 10% lignina. Entretanto, a partir de 20% de adição de lignina, a taxa de aumento da velocidade de cura das mesmas é

incrementada vertiginosamente para um pequeno acréscimo de temperatura, comparando-as com a resina pura. De acordo Parka et al. (2008), a substituição de parte do fenol pela lignina aumenta a taxa de formação de polímeros melhor estruturados.

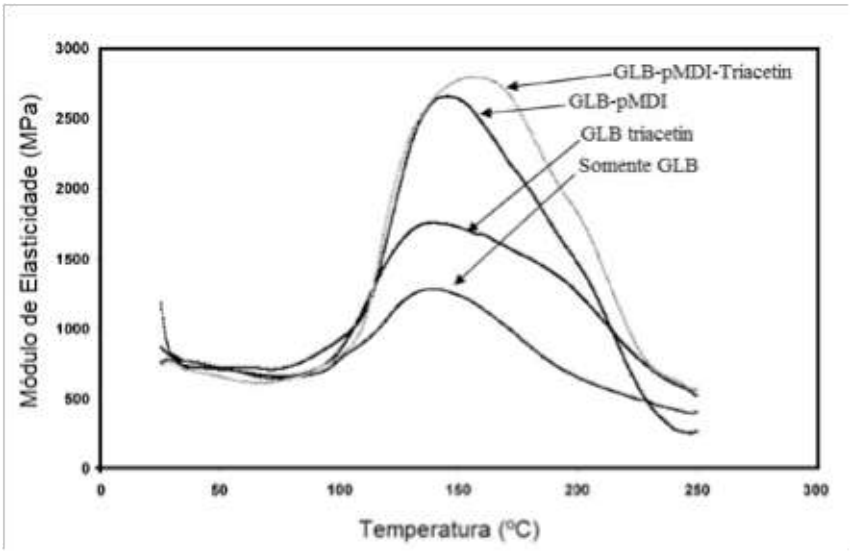
Figura 6 - Velocidade de cura para a resina fenol formaldeído modificada com lignina.



Fonte: Adaptado de Parka et al. (2008).

A análise termomecânica em resinas à base de lignina foi avaliada por El Mansouri et al. (2007) por meio da rigidez de uma junta colada em função da temperatura. Este composto foi modificado pelo emprego de glioxal diluído em água quente, de hidróxido de sódio e de diferentes proporções de água, visando a uma redução da massa molecular inicial do adesivo. Na Figura 7 é apresentado um destes resultados para o módulo de elasticidade em cinco adesivos avaliados. Observa-se que a modificação química alterou o módulo de elasticidade, reduzindo o tempo de cura por meio da redução da faixa de temperatura para a resina fenólica, salientando que os adesivos modificados para a madeira atenderam às exigências dos padrões internacionais para aglomerados.

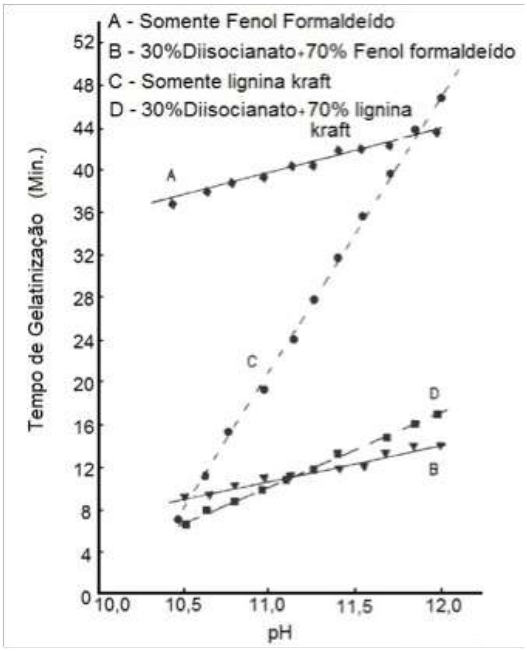
Figura 7 - Módulos de elasticidade de uma junta colada em função do tempo de endurecimento do adesivo obtido por termomecânica para os adesivos GLB, GLB-pMDI (60/40), GLB-pMDI-triacetin (60/40/4% com base na lignina sólida) e GLB-triacetin (4% com base na lignina sólida).



Fonte: Adaptado de Mansouri et al. (2007).

Na Figura 8 está ilustrado o comportamento do tempo de gelatinização (gel timer) em função da variação do pH para quatro resinas fenólicas modificadas com lignina e diisocianato, conforme Stephanou & Pizzi (1993).

Figura 8 - Curva do tempo de gelatinização para resinas modificadas com lignina kraft, proveniente de conífera, em função do pH.



Fonte: Adaptado de Stephanou e Pizzi (1993).

4. Considerações Finais

Apesar da lignina obtida a partir dos processos de polpação da madeira, que é a lignina alcalina ou lignossulfonatos, possuir anéis fenólicos com baixa reatividade frente ao formaldeído, os adesivos com ela confeccionados possuem, conforme demonstrado, uma alternativa de uso, sobretudo quanto à ótica ambiental de seu descarte por parte de algumas indústrias, conferindo, ainda, uma utilização mais nobre que seu emprego como fonte energética.

Deve-se, porém, avaliar economicamente a atividade, uma vez que a utilização de adesivos à base de derivados de lignina para colagem em produtos de madeira necessita de uma cura a temperaturas mais elevadas, assim como maiores tempos de prensagem do que quando utilizados em adesivos fenólicos convencionais.

O Brasil, apesar de possuir grandes dimensões territoriais, ainda é pouco explorado quanto à melhor utilização dos recursos florestais, talvez em face da boa disponibilidade de madeira. No entanto, recursos naturais não renováveis podem contribuir para uma possível elaboração de uma política direcionada para as preocupações energéticas alternativas, destacando-se aí os adesivos naturais. A lignina, além de sua utilização com potencial para adesivos, permite ainda uma matriz à base de etanol, partindo-se das cascas provenientes de resíduos das atividades agroflorestais e demonstrando, assim, sua potencialidade de uso para outros fins distintos do emprego para suprimento energético.

CAPÍTULO 6

EMISSÃO DE FORMALDEÍDO E COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS NAS INDÚSTRIAS

Fabricio Gomes Gonçalves, Roberto Carlos Costa Lelis,
Luisa Maria Hora de Carvalho, Natália Dias de Souza, Ânderson Siqueira Teodoro

1. Introdução

As indústrias de painéis estão passando por um processo de ascensão nestes últimos anos. Tal fato está relacionado com o aumento de compra da população e com o crescimento da construção civil. No entanto, é um crescimento modesto, pois de acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBA, 2016), em 2015, a produção de painéis de madeira reconstituída foi de 7,5 milhões de metros cúbicos, uma redução de 6,3% em relação a 2014. A Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira (ABIPA, 2014) previa um salto na capacidade instalada brasileira de painéis de 9,1 milhões m^3 em 2010 para 10,9 milhões de m^3 em 2013.

Para a economia brasileira, a indústria de painéis de madeira é de suma importância, sobretudo pela dinâmica de novas tecnologias associada à geração de renda e emprego nos setores moveleiro e da construção civil (VIEIRA et al., 2012).

Dentro das indústrias de painéis, encontram-se as unidades produtoras de painéis aglomerados. Os painéis de madeira aglomerada foram desenvolvidos durante a Segunda Guerra Mundial na Alemanha devido aos problemas de indisponibilidade de madeira de boa qualidade para produção de painéis compensados (IWAKIRI et al., 2005). A primeira indústria de chapas de aglomerado no Brasil foi instalada em 1966, em Curitiba, Estado do Paraná. Desde então surgiram inúmeras unidades industriais na região sul e sudeste do país e a produção brasileira de aglomerados atingiu a marca de 3.260.646 m^3 em 2012 (ABIPA, 2014).

Além dessa produção, na década de 1970 nos Estados Unidos e Canadá, surgiram os painéis de partículas orientadas ou OSB (*Oriented Strand Board*), um aglomerado estrutural de partículas do tipo strand orientadas. A partir da década de 1980, o uso de chapas OSB foi largamente difundido, resultando no aumento expressivo de novas unidades produtoras em todas as regiões do mundo. No Brasil a produção do painel OSB é recente, data de 2001. A resistência deste painel é alta, mas não tanto quanto a da madeira sólida original, porém tão elevada quanto à dos compensados estruturais, os quais substituem perfeitamente (EISFELD, 2009). Apenas uma empresa produz este tipo de painel no país, com planta instalada de 350 mil m^3 ano^{-1} (REMADE, 2003b).

Os componentes básicos utilizados na produção desses painéis são madeira, resina e catalisador. Cada um desses itens apresenta características específicas durante o processo. Por exemplo, a madeira de uma espécie utilizada na fabricação de aglomerado deve apresentar baixa densidade, permitindo assim que ocorra a densificação necessária para a formação do painel (IWAKIRI et al., 2005).

Com relação à resina, a ureia-formaldeído é a mais utilizada pelas indústrias de painéis aglomerados (IWAKIRI et al., 2005). De acordo com Marra (1992), a resina ureia-formaldeído tem vanta-

gem em relação ao custo, entretanto, apresenta baixa resistência à umidade, sendo classificada como de uso interior. Para aplicações que requerem alta resistência à umidade, como em usos estruturais, as resinas fenol-formaldeído e melamina-formaldeído são as mais indicadas. Atualmente, os fabricantes de resinas para madeira passaram a produzir em escala comercial as resinas compostas, tais como melamina-ureia-formaldeído e fenol-melamina-ureia-formaldeído para aplicações semiestruturais com maior resistência à umidade e custos compatíveis.

Na fabricação de painéis estruturais do tipo OSB, a resina mais utilizada é a fenol-formaldeído (FF). No entanto, a resina difenil metano di-isocianato (MDI) também é bastante aplicada por, aproximadamente, 35% das indústrias, principalmente nas camadas internas das chapas. A quantidade de resina fenol-formaldeído e parafina utilizadas na produção de chapas OSB pode variar de 3,0% a 6,0% e de 0,5% a 1,5%, respectivamente, de acordo com o peso seco das partículas e do sólido resinoso. Uma quantidade maior de parafina poderá resultar em redução na resistência mecânica da chapa (CLOUTIER, 1998; MARRA, 1992), pois sua função é, basicamente, reduzir a higroscopicidade das partículas de madeira e promover uma redução da absorção de água e inchamento em espessura das chapas.

De acordo com Frihart (2005), há uma predominância das resinas que são mais utilizadas como adesivos na indústria de madeira composta no que se refere à presença de formaldeído (HCHO). Compostos como a ureia, o fenol e a melamina estão combinados com HCHO para desenvolver diferentes formulações de resinas para aglomerados, painéis de média densidade, compensado, entre outros compósitos de madeira. A reação química envolve um nucleófilo (rico em elétrons), como ureia, fenol e melamina, e um eletrófilo (baixo conteúdo de elétrons), como HCHO (Figura 1).

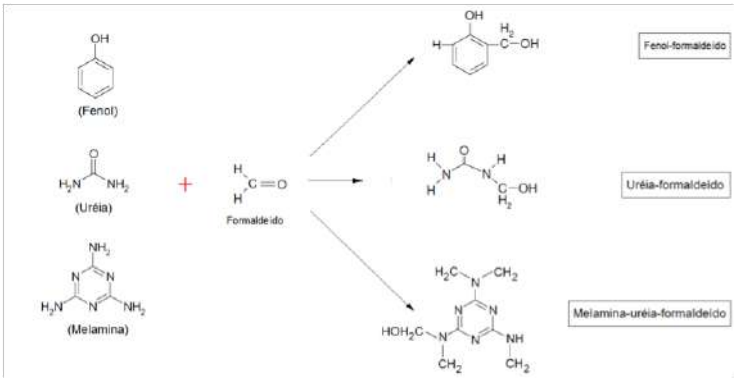
Existem três etapas de reação que envolvem o HCHO e os adesivos (FRIHART, 2005), sendo a velocidade de reação dependente do pH do ambiente, do nucleófilo, da temperatura e da adição de catalisadores ou retardadores:

1. O formaldeído reage com um nucleófilo para formar um grupo hidroximetilo derivado;

2. A condensação de dois grupos hidroximetilo ocorre para formar um éter bismetileno com a perda de uma molécula de água;

3. Há a eliminação do formaldeído a partir do éter para formar um bismetileno.

Figura 1 - Síntese da formação dos adesivos ureia, fenol e melamina com o formaldeído.



Fonte: Frihart (2005).

2. Emissão de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs)

Os COVs são uma classe de substância na qual o carbono orgânico é vinculado ao hidrogênio ou outros elementos. Podem ser definidos como um líquido orgânico cuja pressão de vapor são maiores do que 0,0007 atm e cujo ponto de ebulição está acima de 260ºC. Hunter e Oyama (2000) citam duas classes principais de COVs: os hidrocarbonetos e outros compostos (Quadro 1). A maior parte dos compostos orgânicos com menos que 12 átomos de carbono são considerados COVs. A Agência Ambiental Americana (EPA) define um COV como um composto de carbono que participa de reações fotoquímicas na atmosfera, excluindo, entretanto o carbono puro, o metano, o etano, carbonatos, carbono ligado a metal, CO e CO^2 (HUNTER; OYAMA, 2000).

Quadro 1 - Classes dos compostos orgânicos voláteis (COVs) com exemplos de hidrocarbonetos e compostos.

Hidrocarbonetos	Exemplos	Compostos	Exemplos
Parafinas	Propano, butano, octano	Álcoois	Metanol, etanol
Olefinas	Etileno, butadieno	Aldeídos	Formaldeído
Acetilenos	Acetileno	Cetonas	Metil etil cetona
Aromáticos	Tolueno, benzopireno	Ácidos	Ácido fórmico
		Hidroperóxidos	Peroxiacilnitrito (PAN)
		Halides	Vinil cloreto, bromobenzeno
		Compostos a base de S^2	Dimetil sulfeto
		Compostos a base de N^2	Trimetil amina

Fonte: Adaptado de Hunter e Oyama (2000).

As maiores fontes de emissões de compostos orgânicos voláteis são áreas de produção de energia e depósitos de madeira, resina e produtos armazenados. A combustão e a evaporação são as forças motrizes para estas emissões. De acordo com Mezerette e Girard (1991), os processos de pirólise da madeira acontecem em cinco fases, sendo cada fase caracterizada pela emissão de certos tipos de COVs, tais como ácido acético, ácido fórmico, metanol, furfural, gás carbônico e monóxido de carbono.

Makowski et al. (2005) testaram as emissões de compostos orgânicos voláteis em painel OSB formado com partículas de madeira de pinus após a prensagem a quente e verificaram emissão predominante de monoterpenos e aldeídos.

Os compostos orgânicos voláteis incluem os hidrocarbonetos não-metânicos saturados e insaturados e os hidrocarbonetos oxigenados, tais como ácidos carboxílicos, aldeídos, cetonas, éteres, ésteres e álcoois. Em geral, a maioria dos COVs pode sofrer fotólise quando irradiados pela luz solar ou reagir com ozônio e radicais OH e NO^3 (SEINFELD; PANDIS, 1998).

A presença de ozônio e outros poluentes do ar na atmosfera, em algumas regiões, são sensíveis a fluxos superficiais de COVs, os quais reagem com o ozônio, porém podem também permitir a formação de ozônio na presença de NO_x, sendo que o balanço global de ozônio depende, principalmente,

da quantidade de NO_x presente na atmosfera (CICCIOLI, 1993).

Os principais COVs da madeira são os monoterpenos, que são facilmente liberados no meio ambiente e, ao reagir com óxidos de nitrogênio, formam ozônio (O3) na presença da luz solar, como apresentado abaixo:

$$COV + NO \rightarrow NO2 + O2 \rightarrow O3 + NO$$

Muitos dos COVs são altamente reativos e estão envolvidos na química da troposfera, afetando o balanço regional e global de oxidantes e contribuindo para a produção e deposição úmida de ácidos orgânicos (FEHSENFELD et al.,1992).

As indústrias de produtos florestais e de madeira estão no foco ambiental nos últimos anos. A razão para isto é o fato da madeira e seus subprodutos emitirem substâncias químicas que, em grande quantidade ou grande concentração, podem afetar os seres humanos e o meio ambiente (BENGTSSON, 2004).

Compostos orgânicos voláteis oriundos da fabricação de painéis de madeira aglomerada se originam, principalmente, da secagem das partículas, da prensagem a quente e do pós-tratamento das chapas prensadas. A secagem das partículas é a fonte principal de contribuição, respondendo por 70% da emissão de COVs durante a produção das chapas. A segunda contribuição é a prensagem a quente, que responde por 20% (BOSWELL; HUNT, 1991).

A emissão de COVs durante a prensagem a quente se origina a partir das partículas de madeira e do adesivo. Os compostos originários das partículas podem ser atribuídos aos extrativos voláteis e semivoláteis, à degradação dos produtos da madeira e às reações químicas dos extrativos da madeira (NCASI, 1986ab). Nas emissões durante a prensagem de painéis aglomerados fabricados com partículas da maneira de pinus estão presentes os terpenos e seus derivados e aldeídos de baixo peso molecular, como pentanal, hexanal e octanal (WANG; GARDNER, 1999; INGRAM et al., 1994).

Wang, Gardner e Baumann (2003) relatam um estudo para avaliação dos fatores de prensagem que afetam a emissão de COVs durante a prensagem a quente em chapas de aglomerado de pinus. Foram utilizados três tipos de adesivos, ureia-formaldeído, fenol-formaldeído polímero methil diisocianato (pMDI). As variáveis examinadas incluíram temperatura de prensagem, tempo de prensagem, conteúdo de umidade do bolo, conteúdo de resina e densidade do painel. A emissão de formol foi bastante afetada pela temperatura e pelo tempo de prensagem para os três adesivos, sendo que aumentou a emissão para os painéis com resina ureia-formaldeído e pMDI e diminuiu para os painéis com resina fenol formaldeído.

Os mesmos autores ainda afirmam que, para os painéis prensados com resina ureia-formaldeído e fenol formaldeído, o conteúdo de umidade do colchão afetou a emissão de formaldeído. A emissão de compostos orgânicos voláteis de alto peso molecular foi significativamente afetada pela temperatura de prensagem para os três tipos de adesivos e pelo tempo de prensagem para os adesivos ureia formol e fenol formol. No caso da utilização de madeira reciclada, dependendo do nível de contaminação, existem outras contribuições para os COVs, nomeadamente os adesivos, tais como papel impregnado, tintas, vernizes e produtos preservadores (COSTA et al., 2014).

3. Emissão de formaldeído

O formaldeído é um gás poluente com muitas fontes externas e internas. No ambiente externo, a maioria das fontes inclui plantas, fábricas e emissões de canos de descarga de automóveis. Os incêndios florestais e outras fontes de combustão natural também introduzem o formaldeído no ambiente. Contudo, a exposição ao formaldeído é maior nos ambientes interiores do que exteriores devido às taxas de renovação do ar serem mais baixas (SALTHAMMER et al., 2010). No interior dos edifícios, os painéis de partículas de madeira e os compensados são os que mais emitem formaldeído para o ar. Outras possíveis fontes de formaldeído são os materiais isolantes, os têxteis, os revestimentos (tintas e vernizes e laminados), os materiais usados nos pavimentos, etc. (MARUZTKY, 2008; CARVALHO et al., 2012).

Os estudos que avaliam as emissões de formaldeído são de extrema importância para as indústrias de painéis reconstituídos de madeira, desde que se verificou que a resina ureia-formaldeído possui a tendência de emitir formaldeído por um longo período de tempo após a produção do painel. Um estudo conduzido pelo Forintek Canada Corporation tem mostrado evidências de que emissões de formaldeído por painéis OSB colados com resina fenol-formaldeído são desprezíveis ou inexistentes. Entretanto, os painéis OSB não são submetidos às normas de emissão de formaldeído. Makowski et al. (2005) testaram as emissões de COVs em painéis de OSB confeccionados com partículas de pinus e encontraram valores significativos da presença de formaldeído.

O formaldeído é classificado como um possível agente causador de câncer pela EPA (Agência de Proteção Ambiental) americana (categoria 1B). A vida média de exposição inalatória à concentração de formaldeído de 8 ug m-3, por exemplo, resultaria em um acréscimo de chance de 1 em 10.000 de se desenvolver câncer ao longo de uma vida. Concentrações no ambiente de formaldeído dessa magnitude são comuns nos EUA, onde as concentrações médias de formaldeído no ambiente registradas nas áreas urbanas norte americanas oscilam entre 13,5 a 24,6 ug m^{-3}. Em julho de 2010, o Presidente Obama assinou o *Formaldehyde Standards for Composite Wood Products Act* com o objetivo de reduzir as emissões de formaldeído. Já em 2007, a CARB (*California Air Resources Board*) tinha proposto limites ambiciosos para as emissões de formaldeído para derivados de madeira, sendo hoje uma referência para este setor. A legislação CARB entrou em vigor em janeiro de 2013.

Em 2004, a *Internacional Agency for Research on Cancer* (IARC) da Organização Mundial de Saúde (OMS) recomendou a reclassificação de formaldeído como "cancerígeno para os seres humanos (grupo 1)" e, em 2006, esta recomendação foi finalmente publicada (IARC, 2006). Em dezembro de 2013, a Agência Européia para os Químicos (ECHA) adotou a regulamentação REACH (*Regulation on Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*), na qual o formaldeído é reclassificado na categoria carcinogênica 1B como "potencial agente causador de câncer para os humanos".

Exposições crônicas ao formaldeído também têm sido associadas, em estudos ocupacionais, com o aumento da incidência de câncer de pulmão, faringe e nariz. Concentrações de formaldeído transportado pelo ar acima de 100 ppb podem causar irritação nos olhos, nariz e garganta. A severidade da irritação aumenta com o aumento da concentração. Em 100ppm, o formaldeído é imediatamente perigoso à vida e à saúde. O contato dérmico causa várias reações de pele, incluindo sensibilidade. Tosse, espirro, dores no peito e bronquite também são alguns sintomas que surgem após exposição ao formaldeído.

Há muitos fatores que influenciam a emissão de formaldeído de materiais, tais como a temperatura e a umidade relativa. Quanto maiores forem esses fatores, maior será a emissão de formaldeído. Carlson et al. (1995) verificaram que quanto maior for a temperatura na prensagem, maior será a emissão de formaldeído.

Na produção de painéis, o formaldeído pode ser emitido a partir das matérias-primas durante a secagem, mas também durante o processo de prensagem a quente (DUNKY, 2004). Após a produção do painel, o formaldeído pode ser emitido durante a vida do painel em serviço. Isto se deve ao fato do formaldeído estar aprisionado na estrutura do substrato e dissolvido na água presente no painel (umidade), assim como na hidrólise das ligações da resina (DUNKY, 1998). Por outro lado, devido à escassez de madeira, os produtores de derivados de madeira têm sido forçados ao uso de uma percentagem crescente de madeira reciclada, o que parece conduzir a um aumento das emissões de formaldeído (MARTINS et al., 2007). Carvalho et al. (2014) estudaram o impacto das flutuações da matéria-prima usada na produção de aglomerado de partículas nas emissões de formaldeído. Foram encontradas diferenças significativas não só entre lotes, mas também devido ao tempo de acondicionamento da matéria-prima.

A molécula de formaldeído possui uma grande afinidade com a água. As ligações existentes e possíveis do formaldeído não permitem a formação de outra forma estrutural, porém possuem uma grande interação de maneira a agregarem-se facilmente à molécula de água. Assim, o formaldeído presente no meio irá se agregar rapidamente à umidade do local ou, em um recipiente fechado como é o caso da maioria dos testes de laboratório existentes, irá migrar para a água presente, isto é, para a obtenção do extrato aquoso, cuja concentração de formaldeído poderá ser determinada.

4. Técnicas de extração e análise de formaldeído em painéis

Os métodos normativos para extração de formaldeído são baseados na sua alta solubilidade em água (maior que 55%) e visam avaliar a emissão do formaldeído, ou seu potencial, ao ambiente pelo painel, conforme exigência da norma de classificação correspondente a cada tipo de painel. Dessa forma, são obtidos extratos aquosos, sendo a determinação de formaldeído realizada por diferentes metodologias normativas, dentre elas 120 (EN, 1992); 717-2 (EN, 1995); 717-1 e 717-2 (EN, 1995); 717-3 (EN, 1996); A-1460 (JIS, 2001); 233 (JAS, 2003); D-5582-00 (ASTM, 2006); 14810-3 (ABNT, 2006); e 15316-3 (ABNT, 2009), por espectrofotometria e outras metodologias diversificadas definidas em trabalhos de pesquisa em todo o mundo. As principais e mais utilizadas serão aqui apresentadas.

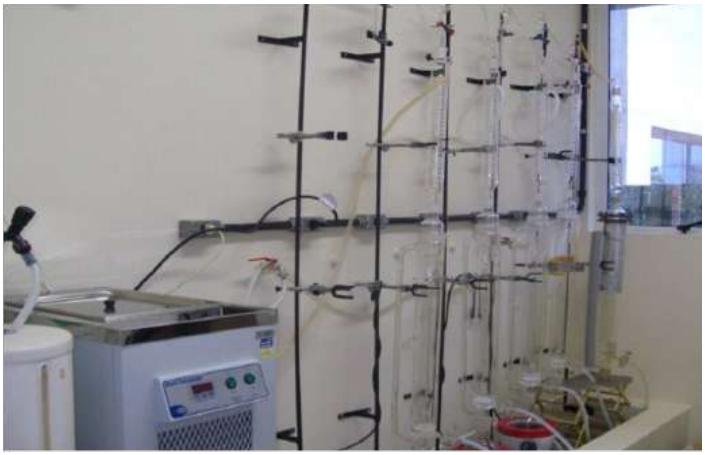
4.1. Método *perforator*

A norma brasileira 14810-3 (ABNT, 2006) e a europeia 120 (EN, 1992) se baseiam no método *perforator* (Figura 2), no qual o formaldeído é removido do produto reconstituído de madeira para ser analisada sua concentração mediante utilização de solventes específicos. Uma quantidade determinada de amostra é colocada em um recipiente junto com um solvente (tolueno), que serão aquecidos até a evaporação (por volta de 111ºC). No vapor do tolueno estará presente o formaldeído, que permitirá ser conduzido pela solução (porção de água destilada ou deionizada) após sua condensação, o que leva, aproximadamente, duas horas. Posteriormente, o solvente é descartado e o extrato aquoso removido e

avolumado para um balão visando a posterior determinação quantitativa do formaldeído.

A quantificação do formaldeído presente no extrato obtido é realizada pelo método da acetilacetona 0,4% (ABNT, 2006). O resultado da extração é calculado considerando a concentração de formaldeído presente no extrato, seu volume final, a massa utilizada de corpos-de-prova e o teor de umidade presente na amostra. O valor final de formaldeído é expresso em mg de formaldeído 100 g^{-1} de material seco.

Figura 2 - Aparelhagem de extração de formaldeído pelo método *perforador.*



Fonte: Emerson (2010).

4.2. Método do dessecador

Este método é baseado na utilização do dessecador para as análises de emissão de formaldeído, sendo aplicada a norma japonesa A-1460 (JIS, 2001), a norma europeia 717-3 (EN, 1996) ou a americana D-5582-00 (ASTM, 2006). O princípio de extração é baseado na utilização de um dessecador e na absorção em água deionizada do gás formaldeído emitido pelos corpos-de-prova, sem contato direto com a água, em ambiente hermeticamente fechado (Figura 3), para verificar, sob condições normais, o nível de toxicidade provocada pela emissão de formaldeído presente na resina.

Figura 3 - Extração de formaldeído pelo método do dessecador.

Fonte: Bolognesi (2010).

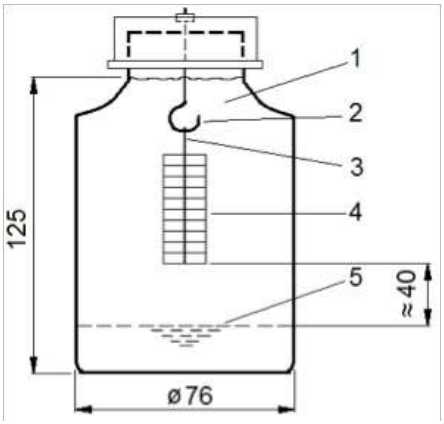
4.3. Método do frasco

O princípio do método do frasco (Figura 4) para medir a liberação de formaldeído em painéis foi publicado por volta da década de 1975. Posteriormente, o método foi modificado de maneiras diferentes por muitos autores em vários países. Uma das normas mais confiáveis e muito aplicada em todo o mundo é a 717-3 (EN, 1996), a qual trabalha com uma temperatura de 40 ºC por um período de três horas.

O método utiliza reagentes de pureza analítica e água destilada ou água desmineralizada, devendo ser utilizado para as análises a acetilacetona e o acetato de amônio.

O princípio da análise de liberação do formaldeído dos painéis por este método é baseado na determinação por suspensão de corpos-de-prova, de massa conhecida, sobre a água num recipiente fechado mantido a uma temperatura constante. O formaldeído liberado é absorvido pela água e determinado fotometricamente pelo método de acetilacetona, sendo o resultado expresso em miligramas de formaldeído por quilograma de massa seca.

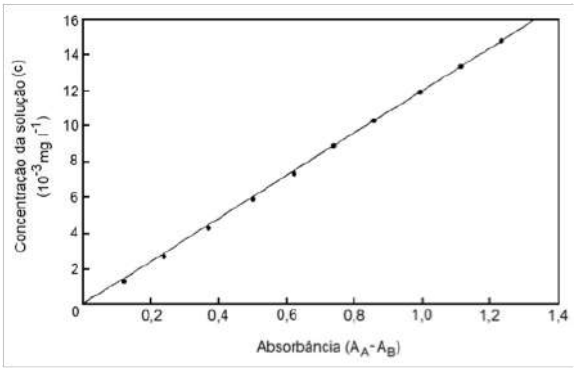
Figura 4 - Equipamento para determinação de formaldeído pelo método do frasco (medidas em cm): 1 - frasco; 2 - ganho; 3 - tira de borracha; e 4 - amostras de painéis; 5 - nível de água no frasco.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Há uma necessidade de montar uma curva de calibração (Figura 5) a partir de uma solução de formaldeído de concentração conhecida por titulação iodométrica. A curva de calibração deve ser verificada pelo menos uma vez por semana por meio de uma solução.

Figura 5 - Modelo de uma curva de calibração para determinação de formaldeído pelo método de acetilacetona (comprimento do percurso 10 mm).



Fonte: Norma europeia 717-3 (EN, 1996).

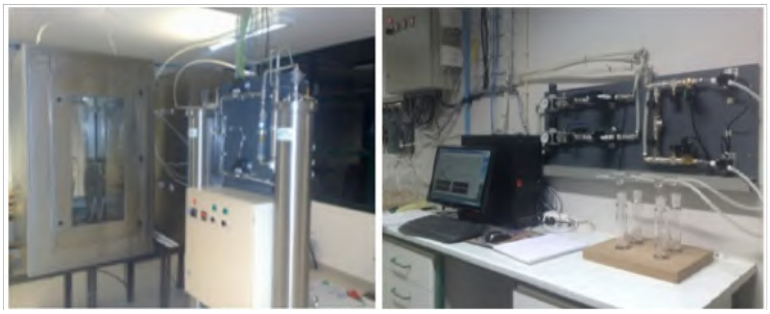
4.4. Método da análise de gás (Gas analysis)

A avaliação da emissão real de formaldeído de um produto sob condições típicas de ambiente interior em edifícios e em escalas de tempo definidas requer a utilização de uma câmara de temperatura controlada. A concentração de formaldeído do ar no interior da câmara é, então, medida. A norma americana ASTM E 1333 (ASTM, 2010) apresenta uma câmara de ensaio grande que visa à simulação das condições de uma sala com 22 m^2. A norma ASTM D 6007 (ASTM, 2008) apresenta uma câmara menor (0,02 a 1 m^3) e as amostras permanecem nas condições operatórias da câmara até a concentração de formaldeído atingir o estado estacionário (a variação da concentração deverá ser igual ou inferior a 0,03 ppm). A CARB (*Californian Air Resources Board*) aprovou recentemente regulamentos que exigem o uso destas câmaras para os ensaios de certificação, o que aumentou a importância destes métodos. A *International Organization for Standardization* (ISO) apresenta, como método de referência, a norma ISO / FDIS 12460-1 (1 m^3) e, para o método derivado, a norma ISO/DIS 12460-2.

As condições para a norma europeia EN 717-1, a qual utiliza o método da câmara (Figura 6), apresentam três diferentes opções para o seu volume: > 12 m^3, 1 m3 e 225 litros. As condições operatórias diferem um pouco das normas americanas, apresentando uma temperatura de (23 ± 0,5) °C e uma umidade relativa de (45 ± 3) %. A renovação de ar é o dobro da equivalente americana, ou seja, 1/hr. O tempo de análise é de pelo menos 11 dias. A principal vantagem do método da câmara é, relativamente a outros métodos, para além de simular as condições dos espaços habitados, utilizar maior quantidade de amostra, minimizando as influências da variabilidade do material a ser analisado.

As câmaras pequenas são amplamente usadas na Europa e na América do Norte e podem ser muito precisas, relativamente fáceis de adaptar e correlacionam-se bem com as câmaras grandes. Para a realização deste ensaio numa câmara de 1 m^3 são colocados dois painéis de 500 x 500 mm de espessura. O formaldeído emitido a partir dos painéis de ensaio mistura-se com o ar na câmara, o qual é recolhido em amostragens pelo menos duas vezes por dia. A concentração de formaldeído é determinada extraindo-se o ar a partir da saída da câmara por meio de dois frascos de lavagem do gás contendo água destilada, sendo esta a responsável por absorver o formaldeído. A concentração de formaldeído na atmosfera da câmara é calculada a partir da concentração da água nos frascos de lavagem de gás e o volume do ar recolhido, sendo expressa em [mg m^{-3}]. As amostragens continuam periodicamente até que a concentração de formaldeído na câmara atinja o estado de equilíbrio, o qual requer pelo menos 11 dias (EN 717-1). Cada uma das normas especifica um método diferente para determinar quando ocorrem as condições em que se atinge o estado estacionário das emissões de formaldeído. Contudo, aceita-se uma variação na emissão de formaldeído inferior a 5% ao longo de um determinado período, o que representa uma condição de estado quase estacionário. Além disso, todas as normas determinam que o ensaio deverá ser finalizado após 28 dias, mesmo que a condição de estado estacionário não seja atingida (IRLE, 2011).

Figura 6 - Câmara para análise de emissão de formaldeído de acordo com a norma EN 717-1 (EN, 2004).

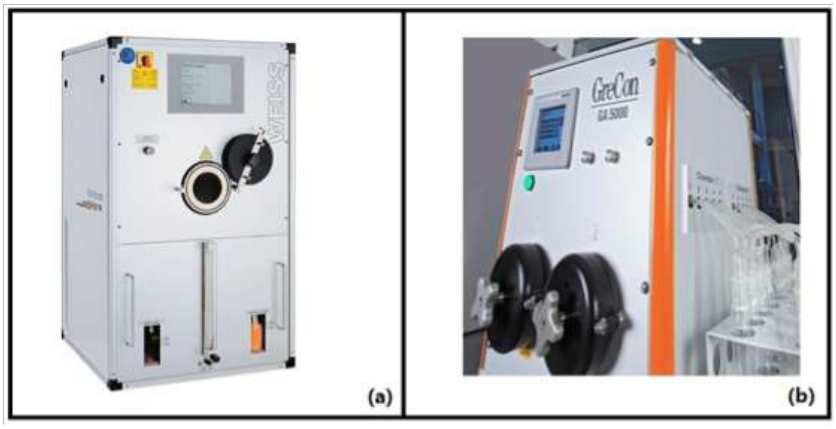


Fonte: Laboratório de emissões de formaldeído do Departamento de Engenharia de Madeiras do Instituto Politécnico de Viseu, Portugal (2014). Cortesia da Professora Luisa Maria Hora de Carvalho.

A norma europeia EN 717-2 (1995) descreve o método chamado *Gas Analysis* (Figura 7). Este método faz uso de câmara com ar circulante com simulação de condições ambientais severas de pressão e temperatura. Assim como o método brasileiro, esta norma também se baseia na absorção em meio aquoso do formaldeído emitido por um painel de madeira reconstituída (revestida ou não).

O equipamento circula o ar isento de formaldeído em uma câmara fechada e aquecida com pressão interna limitada e conhecida, onde o corpo-de-prova é disposto com suas laterais seladas com alumínio. O formaldeído emitido pelas peças se mistura ao ar da câmara, sendo encaminhado para dois frascos lavadores em linha contendo água deionizada. A quantificação do formaldeído presente nos extratos é realizada pelo método da acetilacetona, sendo os resultados calculados levando-se em consideração sua concentração no extrato, seu volume final e a área de exposição do corpo-de-prova, expresso em mg m^{-2} h^{-1}.

Figura 7 - Modelos de câmara para análise de emissão de formaldeído.



Fonte: a: Weiss (2013) e b: Grecon (2013).

Considerando os diferentes métodos existentes e tendo em conta que parece difícil encontrar um acordo global sobre o estabelecimento de um método de referência, é importante conhecer os diferentes métodos e suas principais características (CARVALHO et al., 2012). A Tabela 1 apresenta os parâmetros de ensaio de alguns dos métodos mais usados.

Tabela 1 - Parâmetros de ensaio para os métodos de determinação de emissões de formaldeído.

	Métodos			
	Câmara EN 717-1	**Análise de gás EN 717-2**	**Dessecador JIS A 1460**	***Perforator* EN 120**
Pré-condicionamento	Não	Não	7 dias	Não
Volume	1 m^3	4 L	6 L	-
Temperatura	(23 ± 0.5) ºC	(60 ± 0.5) ºC	(20 ± 0.5) ºC	-
Humidade relativa	(45 ± 3) %	< 3 %	-	-
Taxa de renovação do ar	1 h−1	-	-	-
Fator de carga	1 m2 m^{-3}	10 m2 m^{-3}	≈ 30 m2 m^{-3}	-
Área total	1 m^2 (2 amostras)	0.040 m^2 (2 amostras)	≈ 0.18 m^2	110 g
Bordos não selados	1.5 m m^{-2}	Não	Sim	Sim
Tempo de ensaio	10 a 28 dias	4 horas	24 horas	3 horas
Método de análise	acetilacetona	acetilacetona	acetilacetona	acetilacetona
Unidades	mg m^{-3} (ar)	mg m^{-2} h^{-1}	mg L^{-1}	mg $100g^{-1}$ placa seca anidra

Fonte: CEN (1992, 1994, 2014) e JIS (2001).

De fato, não existe um método que se evidencie, apresentando todos eles vantagens e desvantagens. Os custos de instalação calculados apresentam uma relação de 0.5:8:100 para o *perforator*, a análise de gás e a câmara grande, respectivamente (ATHANASSIADOU; OHLMEYER 2009). Os ensaios de emissões de formaldeido em câmaras são geralmente demorados e utilizam equipamento mais sofisticado e dispendioso. No entanto, para competir num mercado globalizado, os produtores de painéis derivados de madeira têm de certificar os seus produtos de acordo com as normas de diferentes países ou com a regulamentação regional, que consideram métodos de referência diferentes, tais como o Japão (dessecador JIS A 1460), os EUA (método da câmara) e Europa e Brasil (método *perforator*). Uma nova abordagem e uma cooperação mais estreita entre as diferentes regiões do mundo, no que diz respeito aos métodos de ensaio de emissões de formaldeído, são representadas pelos acordos entre CEN/TC 112 e ISO/TC 89. A resolução foi tomada em Sydney, em 2011 (ISO/TC 89). Por unanimidade ela apoia um maior desenvolvimento das normas da série ISO 12460, sobre "Determinação de emissões de formaldeído", sob o Acordo de Viena, em cooperação com o CEN / TC 112, para se tornarem normas EN ISO.

A regulamentação americana da CARB (*California Air Resources Board*) baseia-se na norma ASTM E 1333 (2010), que considera uma câmara grande e cujo resultado é expresso em partes por milhão (ppm). No entanto, a CARB aprovou métodos alternativos de pequena escala, como o que consta no Quadro 2.

Quadro 2 - Métodos de pequena escala aprovados pela CARB.

MÉTODO	DATA
Perten Near-Infrared (NIR)	7 de março de 2014
GP™ *Dynamic Microchamber*	19 de junho de 2012
EN 717-2 (*Gas Analysis*)	16 de março de 2009
DMC (*Dynamic Micro Chamber*)	24 de dezembro de 2008
EN 120 (*perforator*)	15 de novembro de 2008
JIS A 1460 (24-hr *dessicator*)	30 de junho de 2008

Fonte: CARB (2014).

5. Limites de emissões de formaldeído para painéis derivados de madeira

Muitos limites já foram estabelecidos e/ou reformulados em alguns países, restringindo os limites de emissões de formaldeído a partir de painéis derivados de madeira. As normas para os métodos de ensaio de determinação do formaldeído não se referem à classificação dos painéis de acordo com os resultados obtidos nas emissões de formaldeído. Esta classificação é estabelecida nas normas de especificação de cada produto. Algumas normas para uso de painéis derivados de madeira para uso na construção classificam a emissão de formaldeído em duas classes: E1 ou E2 (Quadro 3).

Algumas discussões internas nas Associações Europeias de placas de derivados de madeira têm ocorrido, o que levou à EPF (*European Panel Federation*) a criar a sua própria classe de emissão de formaldeído EPF-S, que corresponderia a valores de *perforator* inferiores a 4 mg 100 g^{-1} placa seca anidra para aglomerado de partículas e 5 mg 100 g^{-1} placa seca anidra para MDF (espessura > 8 mm). Também foi introduzida, impulsionada pela IKEA (IOSMAT 0003), uma classe de equivalência com metade do limite de emissão de formaldeído da classe E1: a classe chamada E0 (ou E 0.5) (ainda não reconhecida oficialmente pelo CEN).

Todos os membros da EPF concordaram em produzir somente classe E1. No Japão, são definidos limites mais restritos nas normas JIS A 5908 e 5905, por ordem decrescente de emissão F**, F*** e F****. O F** é mais ou menos equivalente à classe europeia E1, enquanto o F*** e o F**** correspondem a valores de emissão muito mais baixos. A emissão da classe F**** está próxima da emissão de madeira maciça não tratada, entre 0,5-2 mg 100 g^{-1} (ATHANASSIADOU; OHLMEYER, 2009).

Foram estabelecidos por diferentes autores correlações entre os principais métodos de determinação de formaldeído (dessecador, perforador e câmara) de forma a simplificar as comparações entre diferentes métodos. Devido às diferentes condições operatórias de cada método, não é possível uma relação direta, embora se encontre na bibliografia correlações aproximadas (RISHOLM-SUNDMAN et al., 2006; QUE; FURUNO, 2007; PARK et al., 2010). Na região de baixas emissões de formaldeido, há uma baixa correlação entre os valores corrigidos do método do perforador e a emissão de formaldeído de painéis, segundo Roffael e Johnsson (2011). De acordo com esses autores, no valor de perforador, o coeficiente de transferência de massa não é considerado. Assim, os painéis com o mesmo valor de perforador, mas de densidades diferentes, podem ter diferentes tipos de emissões. A Tabela 2 apresenta

uma relação entre os limites dos diferentes métodos, alguns deles baseados em correlações.

Quadro 3 - Classificação de emissão de formaldeído em painéis de madeira reconstituída.

País ou Bloco	Tipo de painel	Normas de quantificação de emissão de HCHO	Classificação		Limite químico exigido no extrato (mg l^{-1})
			Classe	Concentração de HCHO	
Brasil	Aglomerado	NBR 14810-3	E1< emissão	≤ 8 mg $100g^{-1}$	0,75
			E2	> 8 mg $100g^{-1}$ e ≤ 30 mg $100g^{-1}$	
			E3	> 30 mg $100g^{-1}$ e ≤ 60 mg $100g^{-1}$	
	MDF	NBR 15316-3	E1 < emissão	≤ 8 mg $100g^{-1}$	
			E2	> 8 mg $100g^{-1}$ e ≤ 30 mg $100g^{-1}$	
Comunidade Europeia	Aglomerado, OSB, MDF (não revestido)	EN 120	E1 < emissão	≤ 8 mg $100g^{-1}$	
			E2	> 8 mg $100g^{-1}$ e ≤ 30 mg $100g^{-1}$	
	Compensado, painéis de madeira sólida, LVL (não revestido)	EN 717-2	E1 < emissão	≤ 3,5 mg m^{-2} h^{-1} ou ≤ 5 mg m-2 h-1 dentro de 3 dias após a produção	0,30
	Aglomerado, OSB, MDF, compensado, painéis de madeira sólida, chapa dura, LVL (revestido)		E2	> 3,5 mg m^{-2} h^{-1} e ≤ 8 mg m^{-2} h^{-1} ou > 5 mg m^{-2} h^{-1} e ≤ 12 mg m^{-2} h^{-1} dentro de 3 dias após a produção	
			E1 < emissão	≤ 3,5 mg m^{-2} h^{-1}	
			E2	> 3,5 mg m^{-2} h^{-1} e ≤ 8 mg m^{-2} h^{-1}	
Japão	Aglomerado	JIS A 1460	< emissão	≤ 0,3 mg l^{-1}	
				≤ 0,5 mg l^{-1}	
	MDF			≤ 1,5 mg l^{-1}	
	Compensado	JAS 233	< emissão	≤ 0,3 mg l^{-1}	
				≤ 0,5 mg l^{-1}	
				≤ 1,5 mg l^{-1}	
				≤ 5,0 mg l^{-1}	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Nos Estados Unidos, a ANSI A208.1 e A208.2 têm como valores limites os valores apresentados no Quadro 3. Na Califórnia, a CARB (*California Air Resources Board*) (CARB, 2009) propôs limites ambiciosos para as emissões de formaldeído para derivados de madeira, sendo hoje uma

referência para este setor. Na Fase 1, os limites são mais ou menos equivalentes à classe E1 (e F**), enquanto na Fase 2 os limites são semelhantes aos F***.

Tabela 2 - Relação entre os diferentes métodos e normas existentes.

Método	Japão		Europa	IKEA	EUA	
	F***	F****	E1	E0.5	CARB F1	CARB F2
EN 120 [mg 100 g^{-1} placa seca anidra]	≤ 4.51	≤ 2.71	≤ 8.0	≤ 4.0	≤ 11.31	≤ 5.61
EN 717^{-1} [mg m-3 ar]	≤ 0.0541	≤ 0.0341	≤ 0.124	≤ 0.050	≤ 0.1761	≤ 0.0881
ASTM E1333 [ppm]	≤ 0.0551	≤ 0.0351	≤ 0.1271	≤ 0.0511	≤ 0.180	≤ 0.090
JIS A 1460 [mg L^{-1}]	≤ 0.5	≤ 0.3	≤ 0.91	≤ 0.41	≤ 1.31	≤ 0.61

[1]: valores obtidos por correlação.

Fonte: Harmon (2008).

6. Redução das emissões de formaldeído

Para cumprir com a regulamentação bastante estrita, a indústria tem desenvolvido estratégias para minimizar as emissões de formaldeído dos painéis de madeira para valores próximos ou até mesmo abaixo da madeira natural (SCHAFER; ROFFAEL, 2000). As principais abordagens que têm sido seguidas incluem o seguinte: 1) redução do teor de formaldeído na formulação da resina, tentando manter o desempenho do adesivo; 2) adição de captadores de formaldeído à resina ou às partículas/fibras de madeira que têm a desvantagem de consumir o formaldeído antes da cura; 3) implementação de tratamentos da superfície após a produção do painel; e 4) utilização de sistemas adesivos alternativos sem emissões ou com emissões reduzidas de formaldeído com impactos no custo e/ou no desempenho dos painéis.

Os captadores de formaldeído são adicionados às resinas antes da prensagem com a ureia-formaldeído e são capazes de capturar o formaldeído, quer fisicamente, quer quimicamente, e formar produtos estáveis. Estes aditivos devem conseguir uma redução das emissões de formaldeído em longo prazo, geralmente ao longo da sua vida em serviço. Dentre os exemplos de captadores usados na indústria, incluem-se a adição de ureia em solução aquosa ou em pó, de sulfitos (metabissulfito de sódio, bisulfito de amônio e metabissulfito de sódio encapsulado), de resinas captadoras de formaldeído (como resinas UF com razão molar F/U bem menor que 1.0),e parafinas funcionalizadas.

Alguns autores já relataram na literatura estudos sobre a utilização de captadores de formaldeído (MYERS, 1986; EOM et al., 2006; COSTA et al., 2013a; COSTA et al., 2013b), assim como a otimização da síntese de resina para a produção de painéis com baixa emissão de formaldeído (FERRA et al., 2010; COSTA et al., 2012; PAIVA et al., 2012), alguns com um sucesso notável, atingindo valores de emissão de formaldeído ao nível da madeira natural.

O fato de um captador reagir, inevitavelmente, com o formaldeído durante a prensagem, e não apenas após a manufatura do painel, tem um efeito negativo na resistência interna e em outras propriedades, uma vez que uma menor quantidade de formaldeído estará disponível para a reação de cura do adesivo O desempenho satisfatório de painéis produzidos deve ser, portanto, considerado quando é usado um captador. Por outro lado, Hematabadi et al. (2012) relataram que o pré-tratamento das partículas de palha de trigo com uma solução de ureia a 95 ºC conduziu a melhores propriedades físicas e mecânicas para além da redução do formaldeído. Este fato foi atribuído à reação do formaldeído livre com a ureia, resultando em um desempenho de colagem melhorado. A ureia é, de fato, o captador mais comum (preço baixo e composto não tóxico), mas também foram referidos resultados positivos com outras soluções de aminas (propilamina, methilamina, etilamina e ciclopentilamina), obtendo-se uma melhoria das propriedades físico-mecânicas para além da redução das emissões de formaldeído (BORAN et al., 2011b).

Normalmente, a ureia é usada na forma sólida para a camada interna de aglomerados de partículas, mas tem a desvantagem de ser higroscópica e de penalizar as propriedades físico-mecânicas (TOMITA, 2009). É utilizada em solução aquosa para a camada externa (PARK et al., 2008), mas pode causar o aparecimento de bolhas nos laminados utilizados para revestir os aglomerados. Também foi testada a sua combinação com fosfato de amônio (FUJII et al., 2013).

Existem outros exemplos de aditivos reativos, isto é, de compostos químicos que reagem com o formaldeído para formar compostos estáveis, nomeadamente a amônia ou os compostos de amônio, tais como o acetado, o carbonato, o cloreto, o persulfato e o carbamato de amônio; os sais alcalinos de compostos de enxofre (sulfito e metabissulfito de sódio); os compostos orgânicos como amidas e aminas (ureia, alquilaminas, acetoacetamida) e o bórax (OZALP, 2010). A adição de metabissulfito de sódio à resina conduziu a uma redução de formaldeído significativa sem ter impacto negativo nas propriedades dos painéis (COSTA et al., 2013), mas o manuseamento seguro deste produto químico exige a sua encapsulação (SENE, 2009). Outro tipo de captador poderão ser as resinas captadores de formaldeído, tais como resinas de ureia-formaldeído com razão molar abaixo de 1.0 ou pré-polimeros de resina UF.

Para além dos exemplos mencionados, outros captadores de formaldeído com eficácia variável têm sido relatados na literatura. Foram testados biocaptadores como os taninos, a lenhina, o amido, a farinha de trigo e a de casca de arroz (BASTA et al., 2006; ZHU et al., 2014). As proteínas presentes no licor da pasta e do papel foram associadas a uma redução das emissões de formaldeído, mas o desempenho dos painéis foi penalizado (MIGNEAULT et al., 2011). A adição de solução tanino à resina de UF levou a uma redução significativa da emissão de formaldeído devido à reatividade dos grupos hidróxilos com o formaldeído, mas originou uma redução da resistência interna e um aumento da absorção de água dos painéis (BORAN et al., 2011a). Adsorventes porosos como as pozolanas, os zeólitos e o carvão vegetal mostraram possuir capacidade de captar o formaldeído (KIM et al., 2006a; KIM et al., 2009) por adsorção sem reação química.

Costa et al. (2014) estudaram o desempenho deste captador para reduzir as emissões de COVs em painéis de aglomerado fabricados com pinho (*Pinus pinaster Ait.*) e choupo europeu (*Populus spp.*) e resina UF adicionada com melamina. O metabisulfito de sódio mostrou ter um desempenho excelente na redução das emissões de aldeídos que representam quase 50 % das emissões totais dos aglomerados de partículas fabricados com pinho. Contudo, no caso dos aglomerados fabricados com choupo, a redução dos COVs totais não foi significativa.

7. Impactos ambientais

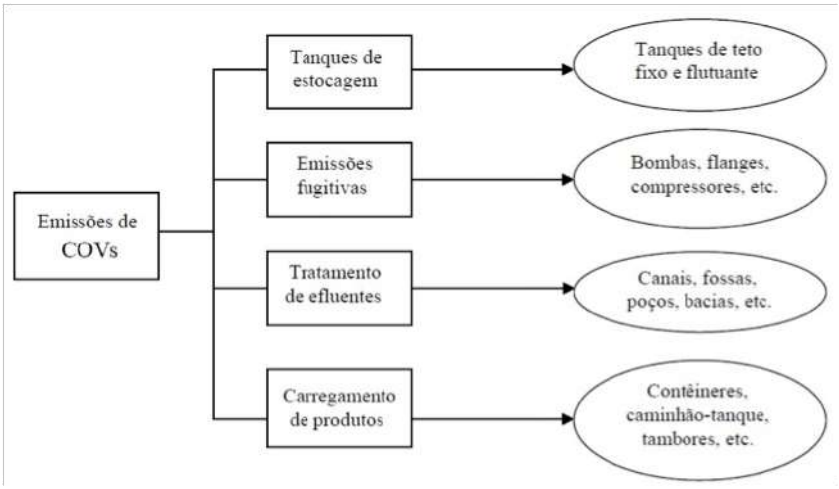
A presença do ozônio na atmosfera superior é importante, pois filtra os raios solares nocivos ao homem e ao meio ambiente, no entanto, sua presença próxima à superfície do planeta é altamente reativa, podendo comprometer a sobrevivência do ser humano (EPA, 1999; BENGTSSON, 2004).

O gás ozônio é um poluente difícil de controlar porque não é emitido dentro do ar e sim formado na atmosfera através de um processo fotoquímico sobre os óxidos de nitrogênio e os compostos orgânicos voláteis. Controlar os COVs emitidos é um método efetivo de minimizar os níveis de ozônio, pois sua presença provoca irritação nos olhos e nas vias respiratórias, além de diminuição da capacidade pulmonar (ASSUNÇÃO, 2004). A reação química do COV e a formação do ozônio tropical pode causar diminuição na concentração dos radicais hidroxílicos (OH), levando ao acúmulo do metano e outros gases do efeito estufa.

7.1. Soluções tecnológicas industriais

A Figura 8 ilustra a classificação das principais emissões de COVs presentes na indústria.

Figura 8 - Fontes de emissão de COVs na indústria.



Fonte: Martins (2004).

As fontes de emissões de COVs incluem equipamentos e componentes das redes de transferências de produtos, de efluentes residuais, de tanques de estocagem e de sistemas abertos de tratamento de efluentes. Além dessas, incluem-se as fontes de emissões de COVs durante as operações de carregamento de produtos, cujo mecanismo de emissão é bastante similar às emissões em tanques de estocagem (MARTINS, 2004).

Para a eliminação dos COVs há disponível um grande número de opções. O uso dos diferentes métodos depende, basicamente, da composição da natureza do produto, do nível de concentração e das condições industriais (temperatura, pressão e taxa de fluxo).

Conforme Bengtsson (2004), muitos métodos têm sido utilizados para eliminar os COVs dos efluentes industriais, tais como incineradores, oxidantes térmicos regenerativos, oxidantes catalíticos

regenerativos e a biofiltração (DIEHL et al., 2000; GROENESTIJN; LIU, 2002).

As tecnologias que serão descritas a seguir podem ser aplicadas para a eliminação de compostos orgânicos voláteis, segundo Assunção (2003), Almeida (2005) e Silveira (2006).

a) Torres de absorção

No processo de absorção, os poluentes gasosos são removidos através da passagem por um líquido que reage com ele quimicamente, de acordo com Assunção (2003). As moléculas de COVs contidas na corrente gasosa são dissolvidas por transferência de massa em uma corrente contendo um solvente líquido resfriado. A força motriz para a transferência de massa é a diferença entre a pressão parcial do poluente na corrente de gás e a pressão de vapor (ou solubilidade) deste mesmo poluente na corrente líquida. Ou seja, quanto maior for a pressão parcial do poluente emitido e menor a pressão de vapor deste poluente na corrente líquida, maior será a eficiência de absorção e, consequentemente, de recuperação (HUNTER; OYAMA, 2000).

O tamanho de um sistema de absorção (Figura 9) é muito variável e pode ser projetado mediante utilização de um líquido que reaja com o poluente (absorção química). Porém, neste caso, a recuperação do poluente torna-se inviável, uma vez que ele já reagiu e formou outros compostos.

Figura 9 - Torre de absorção para recuperação de vapor.

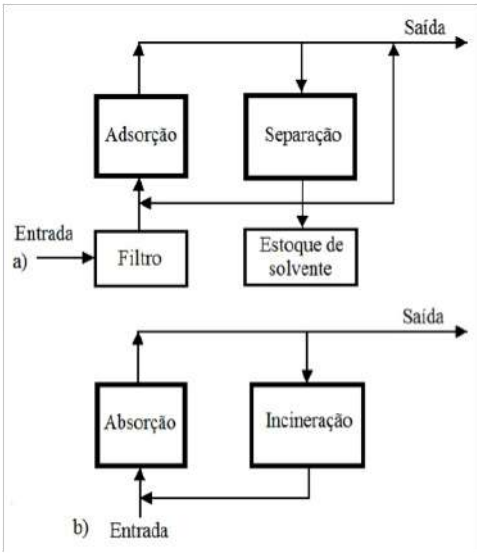
Fonte: Jordantec (2013).

b) Adsorventes

Adsorventes (Figura 10) são utilizados para remoção de certos poluentes gasosos no ponto da sua passagem por meio de um sólido poroso, tal como o carvão ativado. O gás é atraído e acaba aderindo a esse sólido. No processo de adsorsão, as moléculas de hidrocarbonetos aderem fisicamente aos poros ativados da superfície de um sólido, como o carbono ativado (comercialmente conhecido como carvão ativado). Este processo tem alta seletividade na adsorsão de butano e de compostos mais pesados. Com esta tecnologia é possível obter uma eficiência de recuperação de 99%. Como o carbono tem capacidade de adsorsão limitada, é necessário, em um sistema de coleta, que o processo seja contínuo, revezando em tanques específicos os modos de adsorsão e regeneração ou dessorsão (SMITHERS et al., 2002; ASSUNÇÃO, 2003; ALMEIDA, 2005).

A adsorção apresenta algumas vantagens sobre outros processo de recuperação de COVs, dentre elas a capacidade de recuperar o poluente para reuso, principalmente quando se trata da recuperação de um solvente de alto custo, e também de permitir a operação em uma ampla faixa de concentração de poluentes. De acordo com Martins (2004), a eficiência deste método pode exceder a 99%, quando bem projetado e operado. Entretanto, possui como desvantagem o elevado custo de manutenção do sistema e, além disso, não é um processo adequado para correntes de vapor que contenham grande variedade de constituintes, pois dificilmente se encontra um solvente líquido eficiente para muitas substâncias diferentes (HUNTER; OYAMA, 2000; SOUZA, 2004).

Figura 10 - Esquema do sistema de absorção com separação (a) e incineração (b).



Fonte: Alterado de Urashima e Chang (2000).

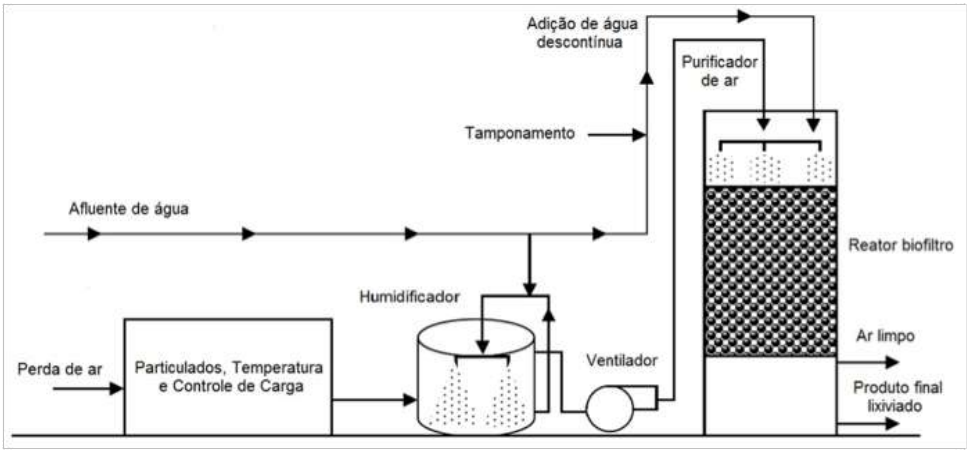
c) Biofiltros

A biofiltração (Figura 11) é um processo biológico que consiste, basicamente, de um reator recheado com material sólido, no qual se formam camadas biológicas contendo uma população microbiana (utiliza-se o processo de oxidação biológica) e uma corrente de ar contaminado atravessa um biofiltro. A seguir, os poluentes contidos na corrente são transferidos para as camadas biológicas e, posteriormente, são biodegradados em produtos simples como água e dióxido de carbono (CHOU; CHENG, 1997; MALHAUTIER et al., 2005).

Um fator primordial para a remoção dos COVs é a manutenção por períodos prolongados da umidade do meio para assegurar a atividade microbiológica. A umidade do meio filtrante deve ser de no mínimo 30%, com um ponto ótimo entre 50-55%. A composição com solo, poliestireno em esferas, cavacos de madeira e galhos, no reator, tem se mostrado eficiente.

A biofiltração é uma tecnologia econômica e efetiva para controle de odores e COVs na indústria química. O processo biológico pode significar vantagens econômicas sobre os métodos convencionais para tratamento de compostos orgânicos voláteis em gases.

Figura 11 - Diagrama esquemático de uma unidade de biofiltro para o tratamento de odores e organoclorados.

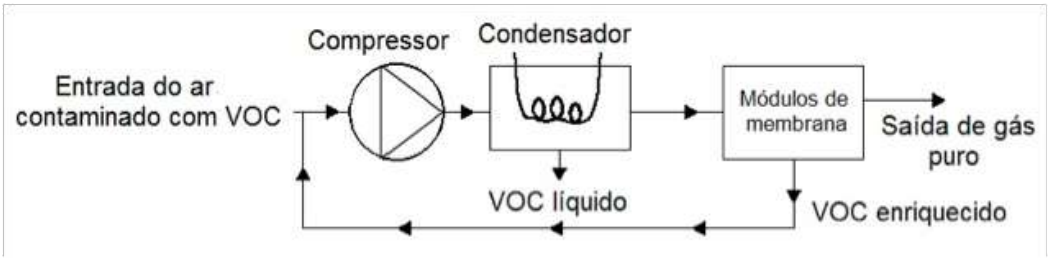


Fonte: Alterado de Kumar et al. (2011).

d) Separadores por Membranas

Processos de separação por membrana (Figura 12) são utilizados para remover compostos orgânicos de um fluxo de gás poluído, estabelecendo, assim, um gradiente de pressão parcial por uma superfície semipermeável vítria ou por um polímero especial (à base de borracha) que constitui a membrana, de forma que a mesma permita qualquer molécula de ar ou do poluente passar, preferencialmente, resultando em um poluente mais concentrado em um dos lados da membrana (HUNTER; OYAMA, 2000).

Figura 12 - Diagrama esquemático de fluxo de um sistema de separação por membrana.



Fonte: Alterado de Hunter e Oyama (2000).

Os sistemas de membrana são bastante apropriados para o processo de operação contínua, além de poderem ser usados com uma larga variação na concentração e na vazão da corrente de entrada. Possui como vantagens a facilidade de instalação, a não formação de resíduos secundários, o fato de ser um projeto compacto, de possuir alta eficiência e de ser uma tecnologia aplicada para concentrações de vários poluentes (HUNTER; OYAMA, 2000; ALMEIDA, 2005).

O sistema de membrana é uma forma de redução de COVs naqueles processos contínuos, nos quais os gases podem ser utilizados com grande flutuação de fluxo ou de concentração na conexão de entrada, e, nesse caso, o projeto é modular, o que simplifica a instalação e o aumento da capacidade. Normalmente, possui custos competitivos se comparados com a adsorção usando carbono ativado

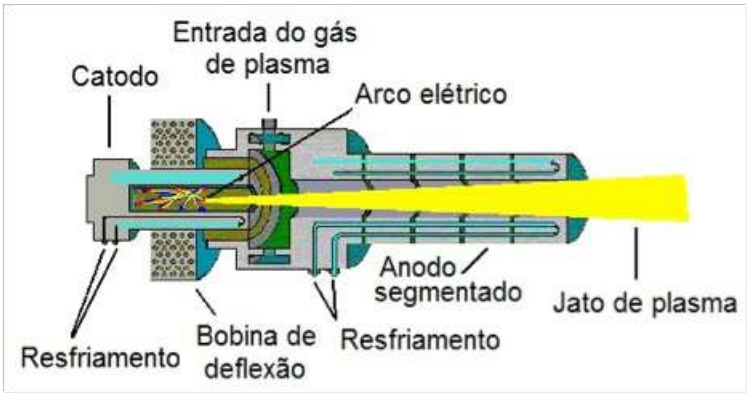
quando a concentração do COVs é superior a 1.000 ppm (HUNTER; OYAMA, 2000).

A tecnologia de membranas tem as seguintes características (SMITHERS et al., 2002): i) pode lidar com uma grande variedade de compostos orgânicos voláteis; ii) necessita de um volume fixo de gás; e iii) seu processo pode operar com uma alta concentração de entrada de hidrocarbonetos.

e) Tecnologia de Plasma

Conforme Menezes et al. (1999), quando um gás é aquecido a temperaturas elevadas, há mudanças significativas em suas propriedades. Em torno de 2.000 ºC, as moléculas do gás começam a se dissociar em estado atômico e, por volta de 3.000 ºC, os átomos são ionizados pela perda de parte dos elétrons, sendo este gás conhecido como plasma. Este apresenta boa condutividade elétrica e alta viscosidade quando comparado a um gás no estado normal. Um gerador de plasma (Figura 13) é um dispositivo que transforma energia elétrica em calor transportado por um gás. Com estes dispositivos, virtualmente, qualquer gás pode ser levado ao estado de plasma. O fluxo de calor pode ser medido e controlado e este fluxo pode ser utilizado para aquecer, gaseificar e promover reações químicas em um reator acoplado à tocha de plasma.

Figura 13 - Corte esquemático da geração de uma tocha de plasma, mostrando o processo de criação do jato aquecido de plasma.



Fonte: CCI (2015).

De acordo com Hunter e Oyama (2000), as tecnologias de plasma podem ser divididas em processos de altas e baixas temperaturas. No primeiro, o fluxo de gás contaminado é misturado com o oxigênio ou vapor de água e passa por um reator, onde um plasma em estado de gás ionizado em alta temperatura é mantido no reator por uma descarga elétrica (arco) ou por uma energia de radiofrequência.

No processo de baixa temperatura, a técnica de plasma a frio aquece apenas os elétrons no plasma por uma série de microarcos semelhantes a minúsculos parafusos iluminados. A temperatura dos elétrons fica em torno de 29.700 º C. O restante do gás, entretanto, não é aquecido.

Os principais atrativos do uso desta tecnologia são as seguintes:

- Elevadas temperaturas causam rápida e completa pirólise da substância orgânica, assim como funde e pode vitrificar certos resíduos inorgânicos, tornado-os estéreis;

- Alta densidade de energia possibilita a construção de reatores com menores dimensões para

as mesmas capacidades, favorecendo a construção de equipamentos móveis;

- O uso de energia elétrica reduz a vazão total de gás e, dessa forma, resulta em menores instalações para o processamento dos gases;

- Com menores instalações e alta densidade de energia, tempos de partida e paradas são reduzidos;

- Favorece a pirólise de substâncias sensíveis à radiação ultravioleta, como os organoclorados.

Em empresas de fabricação de produtos madeirados que utilizam cola, a redução das emissões de COVs (formaldeído, metanol, formol, isocianato ou monômeros de vinil) é realizada mediante instalação de lavadores, de equipamentos para oxidação térmica regenerativa, de sistema de bioremediação, entre outros. Estes equipamentos reduzem a emissão do processo de secagem da madeira (a maior fonte), da aplicação e cura da resina e da queima da resina dos materiais inservíveis.

f) Eliminação por Oxidação Térmica e Catalítica

A oxidação térmica (Figura 14) destrói os produtos químicos tóxicos e perigosos, como os COVs, contidos na emissão de vapores, quebrando a ligação destes hidrocarbonetos à alta temperatura e reagindo com oxigênio. Os COVs são convertidos em CO^2, vapor de água e calor. Estes produtos são liberados na atmosfera ou regenerados para minimizar os custos de operação, sendo esse processo conhecido como oxidação térmica regenerativa.

De acordo com Ferreira (2003 apud CHIPANSKI, 2006), a oxidação térmica considera, basicamente, os seguintes pontos de interesse básicos:

- O princípio da conversão dos COVs em CO^2 e H_2O por combustão;

- Fatores determinantes: temperatura (750 a 1.000 ^oC), tempo de residência dos gases no sistema de conversão (0,5 e 2 seg);

- Eficiência da conversão entre 95 e 99% com concentrações permitidas de 100 a 2000 ppm.

Figura 14 - Câmara de oxidação térmica regenerativa com recuperação de calor.

Fonte: GCESYSTEMS (2013).

A oxidação catalítica (Figura 15) é um método de produção de hidrogênio a partir de hidrocarbonetos. Em uma escala industrial, é o método dominante para produzi-lo. É uma tecnologia que destrói os COVs da mesma forma que a oxidação térmica, mas a presença de um catalisador permite que a destruição seja feita em temperaturas mais inferiores. Como há perda de calor no sistema, pode-se instalar um trocador de calor para o reaproveitamento energético na saída dos gases, baixando, assim, os custos operacionais mediante o preaquecimento do gás poluído pelo gás de saída e o arrefecimento do gás de saída para poder passar pelo lavador de gás. Em alguns casos, isso pode significar a autocombustão sem a necessidade de um aquecimento externo contínuo.

Figura 15 - Conversor catalítico.

Fonte: KONOKOGS (2013).

Ferreira (2003 apud CHIPANSKI, 2006) aponta que a oxidação catalítica leva em consideração o seguinte:

- Temperatura de processo (200 e 500 ºC) e tempo de residência inferior a 0,1 seg.;
- Poupança de energia e/ou de combustíveis;
- Possibilidade de operar com baixos teores em oxigênio;
- Utilização de maiores fluxos de corrente gasosa;
- Impedimento de formação de NO_X e de dioxinas a baixas temperaturas;
- Oxidação do monóxido de carbono;
- Instalações mais baratas e mais flexíveis;
- Leito de catálise otimizado facilmente instalável diretamente no veio do processo principal de uma planta industrial.

g) Condensação

Hunter e Oyama (2000) mencionam que a condensação envolve a transferência da fase gasosa dos compostos orgânicos para a fase líquida ou sólida mediante utilização de temperaturas extremamente baixas (-20 e -80 °C), fazendo com que a pressão parcial deles, na corrente do gás, exceda a

pressão de vapor de cada um deles, passando, então, para o estado líquido.

O processo de condensação pode ser feito de duas maneiras: por contato e sem contato entre o gás e o líquido refrigerante. O tipo sem contato ocorre quando as moléculas de COVs emitidas são capturadas e condensadas na superfície fria de um trocador de calor, cuja temperatura é a responsável direta pela eficiência do processo de recuperação. Outra variável importante na eficiência da condensação é a pressão de vapor e a concentração do poluente na corrente gasosa e a pressão de operação do sistema. Para uma eficiência de mais de 90%, é necessário instalar um segundo estágio de condensação (ASSUNÇÃO, 2003), tal como em um condensador criogênico usando nitrogênio líquido (Figura 16), o que torna o processo mais custoso.

A tecnologia de condensação, apesar de muito utilizada, possui as seguintes desvantagens, de acordo com Smithers et al. (2002):

- Descongelador regular, o que produz um efluente contaminado com hidrocarbonetos;

-A tecnologia é mecanicamente complexa, necessitando de uma manutenção intensiva;

- Em função da utilização de temperaturas operacionais muito baixas, o uso da energia é ineficiente, gerando custos operacionais elevados.

Figura 16 - Sistema de condensação criogênica para redução e recuperação de VOC.

Fonte: POLARIS (2013).

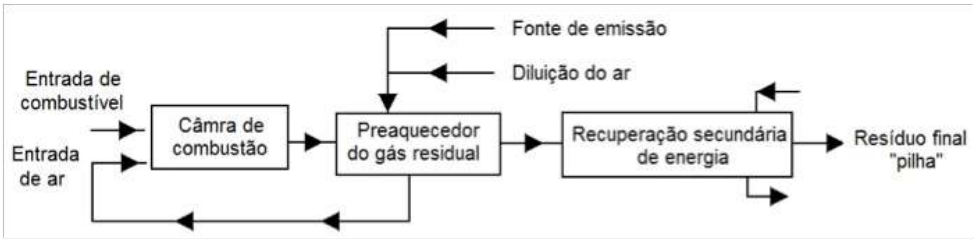
h) Incineração

A incineração remove os COVs através de combustão, convertendo-os em dióxido de carbono, vapor de água e pequenas quantidades de outros compostos. Existem, basicamente, duas formas de destruição de resíduos gasosos contendo compostos orgânicos voláteis por meio da incineração, a térmica e a catalítica.

Um incinerador térmico é uma chama estabilizada mantida por uma combinação de combustível auxiliar, compostos de gases residuais e ar suplementar adicionado quando necessário (Figura 17). Depois de passar através da chama, o gás residual é aquecido a partir da sua temperatura de entrada até a sua temperatura de ignição. A temperatura de ignição varia para diferentes compostos

e, geralmente, é determinada de forma empírica, sendo esta temperatura igual à taxa de reação de combustão que excede a taxa de perda de calor. Desta froma, o ar vai inflamar-se para um nível mais elevado quando a temperatura for aumentada.

Figura 17 - Diagrama esquemático de um incinerador térmico.

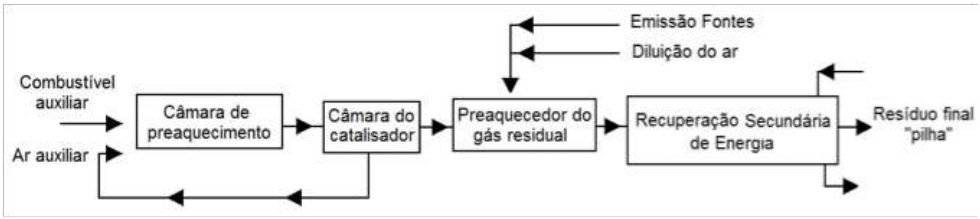


Fonte: Alterado de Vatavuk et al. (2000).

O nível requerido de controle de um COV tem de ser atingido dentro do tempo que ele passa na câmara de combustão térmica do reator. Quanto mais curto for o tempo de residência, maior será a temperatura do reator. A maioria das unidades térmicas é projetada para fornecer não mais de 1 segundo de tempo de residência para o gás residual, com temperaturas típicas de 650 ºC a 1.300 ºC.

A incineração catalítica se distingue da térmica pelo uso de um catalisador de platina ou cobre, permitindo que a combustão ocorra em uma faixa de temperatura mais baixa (320 a 650 ºC) com uma eficiência de destruição de 98% dos COVs. A corrente de gás é introduzida numa câmara de mistura, onde o gás também é aquecido. Este gás de combustão passa por um permutador de calor, onde é pré -aquecido, sendo, então, conduzido para uma câmara com catalisador. O oxigênio e os COVs migram para a superfície do catalisador por difusão de gás e são adsorvidos sobre a superfície do catalisador, onde ocorre a oxidação (Figura 18).

Figura 18 - Diagrama esquemático de um incinerador catalítico.



Fonte: Alterado de Vatavuk et al. (2000).

A utilização da incineração catalítica para o controle de gases poluentes tem sido restrita a compostos orgânicos que contêm apenas carbono, hidrogênio e oxigênio. De acordo com Vatavuk et al. (2000), gases que contenham compostos com cloro, enxofre e outros átomos podem desativar os catalisadores, os quais muitas vezes foram utilizados para o controle de COV. A maior parte do desenvolvimento de catalisadores tem incidido sobre a oxidação de compostos orgânicos voláteis contendo cloro, que são amplamente utilizados como solventes e desengordurantes e são, muitas vezes, objeto de preocupação no controle de COV.

7. Considerações Finais

A adoção e implementação de medidas não somente nas indústrias, mas também nas residências, principalmente no que se refere à emissão de formaldeído proveniente de painéis reconstituídos de madeira, devem realmente ser uma preocupação mundial. Alguns países tradicionalmente já as adotam e implementam, em especial o Brasil. Entretanto, ainda há muito a ser desenvolvido.

Além disso, a busca por elementos que possam substituir o formaldeído é necessária em centros de pesquisas, principalmente no que se refere ao seu poder de toxidez. A ciência está sempre buscando novos adesivos e elementos catalisadores para que isso ocorra.

CAPÍTULO 7

TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS APLICADAS À MADEIRA SÓLIDA E AOS PRODUTOS RECONSTITUÍDOS DE MADEIRA

Fabricio Gomes Gonçalves, Christiano Jorge Gomes Pinheiro, Luciana Ferreira Gomes,
Sabrina Barros Santiago, Sara Freitas de Souza

1. Introdução

No mundo moderno, a proteção à indústria, o cuidado com o meio ambiente, a preservação de árvores e a monitoração de florestas são objetivos da economia mundial. Sendo assim, a avaliação das propriedades da madeira e de seus subprodutos por meio de métodos de ensaios não destrutivos (END) vem ganhando cada vez mais espaço com a finalidade de melhorar o aproveitamento e a preservação do meio ambiente. De acordo com Stangerlin et al. (2010), sua aplicabilidade foi iniciada em meados da década de 1950, e no Brasil apenas no final da década de 1980.

Métodos de ensaios não destrutivos são técnicas essenciais que fornecem parâmetros para avaliação, classificação e identificação das propriedades físicas e mecânicas de materiais sem alterar sua capacidade de uso final, pois não é ncessária a extração de corpos-de-prova para realização dos ensaios (BUCUR, 1995; PELLERIN; ROSS, 2002).

Os END são versáteis, pois não ocorrem estritamente nas dependências laboratoriais, além de proporcionarem rapidez na obtenção dos dados com menor volume de trabalho (STAGERGELIN et al., 2010). Trata-se de uma metodologia com potencial em nível industrial para avaliar a qualidade dos produtos, porém cabe salientar que é apenas uma estimativa, pois é realizada por meio de amostragem e não da peça real em uso.

Os métodos de END podem ser classificados em termos de interesse em propriedades físicas e da aplicação específica, tais como a determinação do teor de umidade, densidade, detecção de defeitos em madeira como nós, entre outros. Outro critério de classificação das técnicas de END aplicado à análise de madeiras é o comprimento de onda característico da radiação eletromagnética (de raios-X, infravermelho, ultra-sônico de microondas, de ressonância magnética nuclear (RMN)), que interage com a amostra de madeira. O entendimento geral da interação entre as ondas eletromagnéticas e o material que se deseja estudar deve ser baseado em uma descrição precisa dos fenômenos teóricos (BUCUR, 2003; SOBUE, 1993).

Os métodos de END representam um grande espectro de técnicas de análise em madeira sólida e painéis reconstituídos de madeira, os quais são baseados na aplicação de ondas eletromagnéticas, acústicas e elásticas; na emissão de partículas subatômicas; na capilaridade, na absorção e em qualquer tipo de teste que não implique um dano considerável à amostra examinada. Há de se considerar que, com exceção da classificação visual, as demais técnicas se baseiam no uso de um estimador para avaliar as propriedades mecânicas em peças de madeira (MARIN, 2006) e também em painéis.

2. Principais técnicas de análises não destrutivas

2.1. Visual

Baseia-se na utilização da luz difundida ou refletida pela superfície da madeira, obtendo informações sobre o estado físico do objeto analisado. A inspeção visual da superfície da madeira consiste em um dos métodos mais antigos e tem como objetivo identificar defeitos que possam interferir na estrutura da madeira, fornecendo uma perspectiva qualitativa, porém não são detectadas as reais condições do material. Existem limitações às faces externas da madeira (SHIMOYAMA, 2005).

De acordo com Carreira e Dias (2006), a classificação visual é baseada na premissa de que as propriedades mecânicas de uma peça estrutural de madeira diferem das propriedades mecânicas da madeira isenta de defeitos devido a certas características de crescimento e que tais características podem ser vistas e julgadas pelo olho humano.

Com a inspeção visual é possível localizar áreas de deterioração na madeira. Isso pode ser analisado através de algumas características, tais como perda de cor, presença de defeitos, podridões (manchas e corpos de frutíferos) e nós, levando em consideração o tamanho, o número e a localização na madeira (SHIMOYAMA, 2005). Fungos, insetos, superfícies com orifícios, depressões, manchas, descolorações, rachaduras, trincas e áreas com depósito de solo demonstram o grau de deterioração na madeira (ROSS; BRASHAW; WANG, 2006).

Okimoto et al. (1995) realizaram uma classificação visual em que foram relacionados as características visíveis da resistência com um critério para rejeição ou aceitação de uma determinada peça, não sendo estabelecida nenhuma relação com a sua resistência.

Almeida et al. (2013) classificaram visualmente a madeira de *Schizolobium amazonicum* Herb e concluíram que a mesma possui pequeno índice de defeitos, pequena quantidade de nós, grã direita e, também, poucos empenamentos.

A madeira para uso estrutural, de acordo com Calil Júnior, Okimoto e Pfister [20--?], requer um bom controle de qualidade das peças, pois há necessidade de garantir sua rigidez e resistência mecânica. Tais garantias podem ser adquiridas com um controle de qualidade realizado associando ensaios mecânicos com ensaios visuais (aparência). Os mesmos autores sugerem que a classificação visual se dê por meio dos seguintes itens: a) defeitos de origem anatômica: presença de medula, faixas de parênquima, fibra ou grã inclinada e nós; 2) defeitos por ataques biológicos: insetos e fungos; 3) defeitos originados durante secagem da madeira: encanoamento, arqueamento, encurvamento, torcimento, escamas e rachaduras; e 4) defeitos de processamento da madeira: presença de alburno, arestas quebradas e variação da seção transversal.

Outro exemplo de critério para classificação visual é a norma ASTM D245-93 (ASTM, 2011), mas que não fornece as regras de classificação visual, estabelecendo apenas os critérios de como medir os defeitos e fornecendo meios para limitar os defeitos em função de uma razão de resistência, definindo, assim, o princípio de como as regras de classificação devem ser desenvolvidas.

Todavia, a impossibilidade de examinar a integridade interna do material é uma das maiores desvantagens desta prática. Desta forma, a inspeção visual sempre deve ser acompanhada de algum método complementar de avaliação não destrutiva, dentre os quais a vibração transversal é um dos mais utilizados.

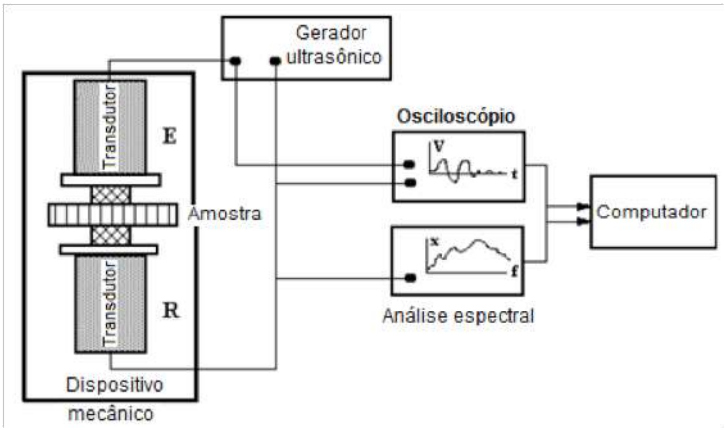
2.2. Ultrassom

O uso do ultrassom teve inicio na Europa, na década de 1950, pelo setor de engenharia civil, sendo utilizado inicialmente em investigações de concreto. Posteriormente, iniciaram-se os primeiros estudos teóricos para a aplicação do ultrassom na madeira com certas dificuldades devido às características anatômicas do material. Os primeiros resultados experimentais foram obtidos na Alemanha, em 1983, por Waubke (SANDOZ, 1989). Desde então, pesquisas têm sido desenvolvidas para comprovar a validade da técnica de ultrassom na classificação de peças de madeira.

O ensaio por ultrassom é uma das técnicas NDA, que se baseia no fenômeno de reflexão de ondas acústicas após a sua interação com obstáculos, perpendiculares à sua propagação e presentes na madeira. A onda reflete retornando até a fonte que a gerou. O ensaio ultrassônico é, sem sombra de dúvidas, o método de ensaio não destrutivo mais utilizado e o que apresenta o maior crescimento para a detecção de descontinuidades internas.

A disposição mais comum para aparelhos de ultrassom é composta por um gerador de ultrassom, transdutores piezoelétricos (emissor e receptor), um osciloscópio, um analisador espectral e um computador, como esquematizado na Figura 1. Os requisitos básicos de um transdutor de ultrassom são boa sensibilidade e resolução (BUCUR, 1999). Na maioria das vezes, os transdutores utilizados para a caracterização mecânica da madeira são aqueles com uma frequência central de 1 MHz.

Figura 1 - Disposição de aparelhos de ultrassom.



Fonte: Modificado de Bucur (1999).

Morales (2006) afirma que a aplicação e a medição pelo teste de ultrassom consistem no posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser avaliado (Figura 2). Segundo esta mesma autora, a onda ultrassônica é introduzida por um dos transdutores e captada pelo outro, com contagem do tempo em microssegundos efetuada pelo próprio equipamento de ultrassom, e os tempos registrados são empregados no cálculo de velocidade de propagação da onda (V) (Equação 1).

$$C=\rho.V2.10\text{-}6 \quad (1)$$

em que: C = constante dinâmica (MPa); ρ = densidade do material (kg m^{-3}); V = velocidade de propagação da onda (m s^{-1}).

Figura 2 - Equipamento de ultrassom para ensaio dinâmico com dois transdutores de 22 kHz.

Fonte: Miná et al. (2004).

Ainda conforme Morales (2006), após obtido o valor V, o teste de ultrassom permite avaliar o valor da constante dinâmica (C) segundo qualquer eixo, de acordo com o posicionamento dos transdutores, dada pela Segunda Lei de Newton. O cálculo de V é afetado pela frequência (f) e depende do comprimento da onda (λ) emitida pelo equipamento (Equação 2).

$$V = f.\lambda \quad (2)$$

em que: V = velocidade de propagação da onda (m s^{-1}); f = frequência (Hz); λ = comprimento da onda (m).

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

A técnica de ultrassom pode ser utilizada em diversas situações, tanto em árvores quanto em peças estruturais. A determinação das propriedades mecânicas da madeira usando propagação de ondas ultrassônicas é baseada na relação entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a densidade do material. Apresenta várias utilidades, permitindo desde a determinação da existência de nós, a presença de ataque de microorganismos ou insetos, o direcionamento das fibras e a decomposição, passando pela avaliação de elementos estruturais da madeira em uso, até a estimativa de alguns parâmetros como o módulo de elasticidade (GORNIAK; MATOS, 2000).

Na madeira, os fatores que interferem na propagação de ondas ultrassônicas são as propriedades físicas do substrato, as características geométricas da espécie (micro e macroestruturas), as condições do meio (temperatura e umidade) e o procedimento utilizado para tomada das medidas (frequência e sensibilidade dos transdutores, seu tamanho, posição e características dinâmicas do equipamento) (BUCUR; BÖNHKE, 1994).

Várias são as vantagens de se utilizar a técnica do ultrassom. Entre elas estão o custo de aquisição do equipamento, que é relativamente baixo se comparado ao das máquinas de classificação automática e o treinamento simples da mão de obra para utilização do equipamento, possibilitando que o método seja facilmente disseminado em revendedoras e indústrias de madeiras (OLIVEIRA, 2001).

Miná (2004), trabalhando com a avaliação não destrutiva em postes de madeira por meio de ultrassom, verificou uma boa correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de flexão estática, indicando que esta técnica possui certa precisão para este fim.

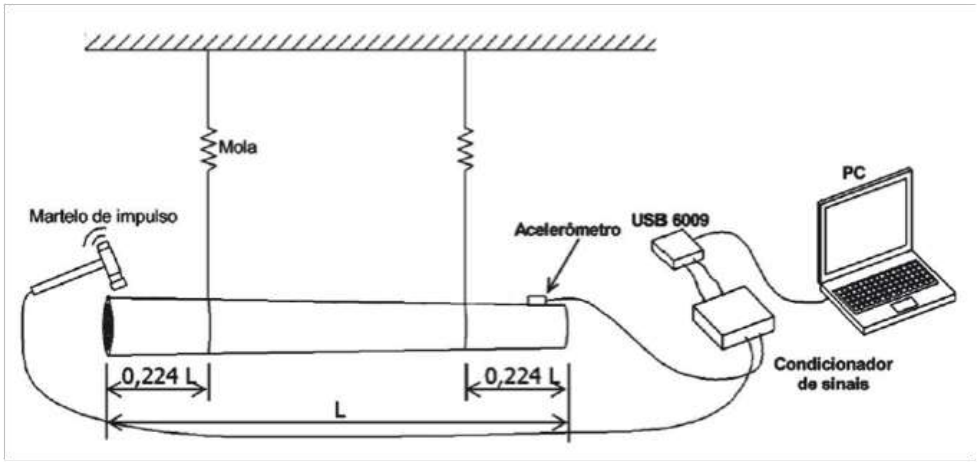
2.3. Vibração transversal

O ensaio de vibração transversal foi uma das primeiras técnicas não destrutivas a ser investigada para se determinar o módulo de elasticidade da madeira. Embora possua uma base simples, o método revela-se como algo de grande potencial de aplicação e investigação, principalmente por ser associado a um modelo matemático preciso e também por sua possibilidade de aplicação em peças de dimensões estruturais (BALLARIN; TARGA; PALMA, 2002).

As peças de madeira para usos em elementos estruturais necessitam passar por um processo de avaliação de qualidade a fim de observar se suas propriedades mecânicas atendem aos requisitos do projeto.

O ensaio de vibração transversal consiste na suspensão da tora por cordas de nylon presas com o objetivo de simular as condições de suspensão livre-livre (Figura 3). As cordas são posicionadas nos pontos nodais do primeiro modo de vibração, considerando-se uma viga prismática (CARREIRA et al., 2011).

Figura 3 - Arranjo do ensaio dinâmico por vibração transversal.



Fonte: Carreira et al. (2011).

Após os ajustes iniciais, a peça a ser ensaiada é colocada sobre os apoios metálicos e é liberada uma vibração por meio de um martelo. Os sinais provenientes da célula de carga são enviados para uma unidade de interface, localizada sobre um dos apoios, e este transmite para o computador. Por meio de um programa computacional, ocorre o cálculo do módulo de elasticidade de vibração

transversal (Equação 3) (SEGUNDINHO et al., 2012).

$$EVT = fr2\ W\ L32{,}46\ I\ g \quad (3)$$

em que: EVT = módulo de elasticidade dinâmico (MPa); fr = frequência de vibração transversal (Hz); W = peso da peça de madeira (N); L = distância entre apoios (m); I = momento de inércia da seção transversal (m^4); g = aceleração da gravidade (9,8 m s^{-2}).

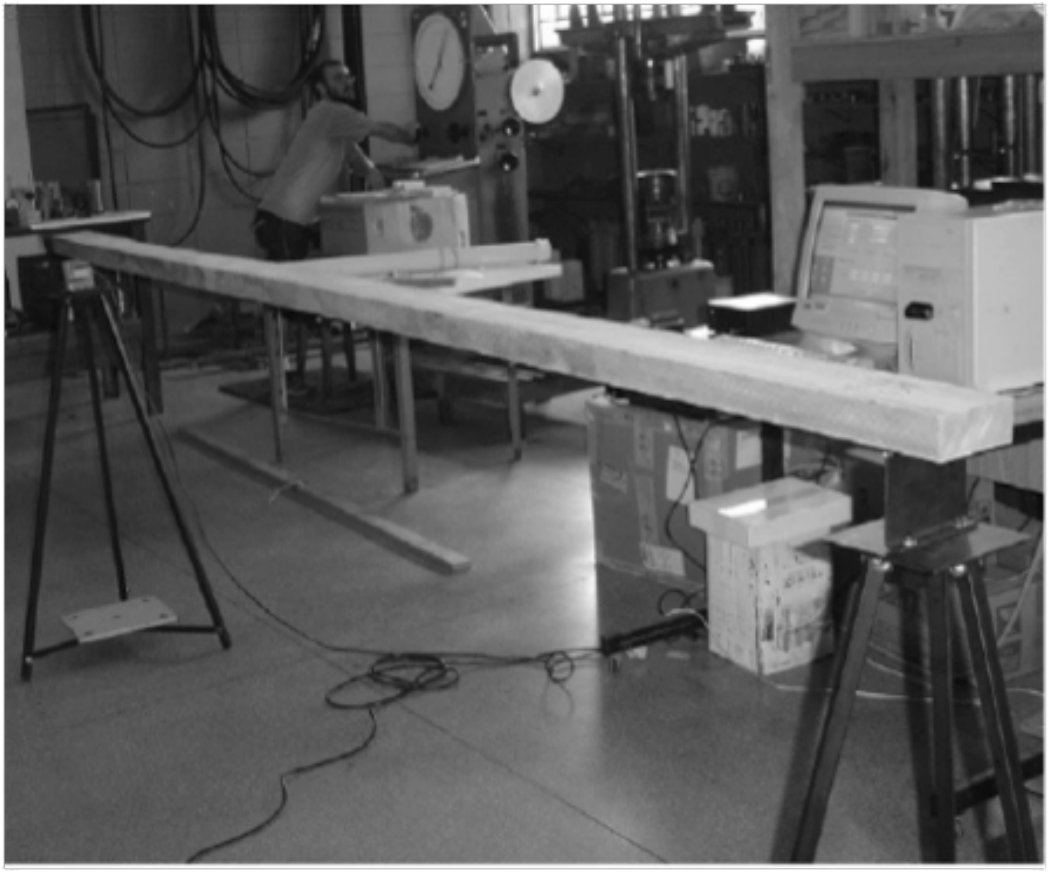
Em um estudo realizado por Targa, Ballarin e Biaggioni (2005), a fim de determinar o módulo de elasticidade de três espécies de eucalipto, constatou-se que os ensaios não destrutivos que foram conduzidos com uso do sistema *Beam Identification by Non-destructive Grading* (BING) permitiram a análise das vibrações do material nos domínios do tempo e da frequência (Figura 4). Os resultados obtidos revelaram boa correlação entre os dois tipos de ensaios empregados, justificando o início dos ensaios com peças de dimensões estruturais para a viabilização da técnica nas práticas de classificação estrutural.

Figura 4 - Arranjo geral utilizado no ensaio de vibração transversal.

Fonte: Targa, Ballarin e Biaggioni (2005).

Um teste realizado com equipamento criado no Brasil pela técnica de vibração transversal (Figura 5), para obter o módulo de elasticidade para a classificação mecânica de peças de madeira, demonstra uma forte correlação entre o módulo de elasticidade medido pelo ensaio estático de flexão e o obtido com a avaliação pelo equipamento de vibração transversal, evidenciando a elevada confiabilidade do método para a classificação de peças estruturais de madeira (CARREIRA; CARDIAN, 2008).

Figura 5 - Equipamento de vibração transversal.



Fonte: Carreira e Cardian (2008).

Em estudo realizado com madeira de maçaranduba (*Manilkara* sp.) por métodos destrutivos e não destrutivos, a fim de relacionar o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura obtidos por meio das técnicas de vibração transversal, *stress wave* e flexão estática (destrutivo), Rosa et al. (2014a) observaram que os métodos não destrutivos obtiveram boa estimativa do módulo de elasticidade estático, porém não foram capazes de estimar o módulo de ruptura da madeira.

Em pesquisa realizada sobre os efeitos do tratamento preservativo e adesivo nas características mecânicas de laminado colado de duas espécies de bambu, utilizando adesivos à base de emulsão de isocianato polimérico (EPI), melamina ureia formaldeído (MUF), acetato de polivinílico cross (PVAc) e resorcinol formaldeído (RF), Rosa et al. (2014b) constataram que os métodos de vibração longitudinal (Vl) e vibração transversal (Vt) demonstraram-se eficazes para a estimativa do módulo de elasticidade (MOE) dos bambus laminados colados. O método de Vt demonstrou ser o melhor método para estimativa do módulo de ruptura (MOR).

Segundo Carreira, Segundinho e Dias (2011), o ensaio de vibração pode ser utilizado para avaliar com precisão a rigidez de flexão em peças de madeira. Os autores buscavam uma estimativa do módulo de elasticidade à flexão em toras de madeira por meio de vibração transversal livre, comprovando uma boa correlação entre os módulos dinâmicos e estáticos de elasticidade.

Estes autores, em trabalho desenvolvido para avaliar rigidez à flexão de toras de madeira por meio de vibração transversal com *Eucalyptus* sp, tiveram dificuldade de avaliação. Os resultados obtidos indicaram que a técnica de vibração transversal tem potencial para ser aplicada na estimativa da rigidez à flexão de toras de madeira, porém, para uma avaliação completa e mais precisa, torna-se

necessário o conhecimento dos efeitos do esforço cortante e da umidade nas frequências naturais das peças (CARREIRA; DIAS, 2009).

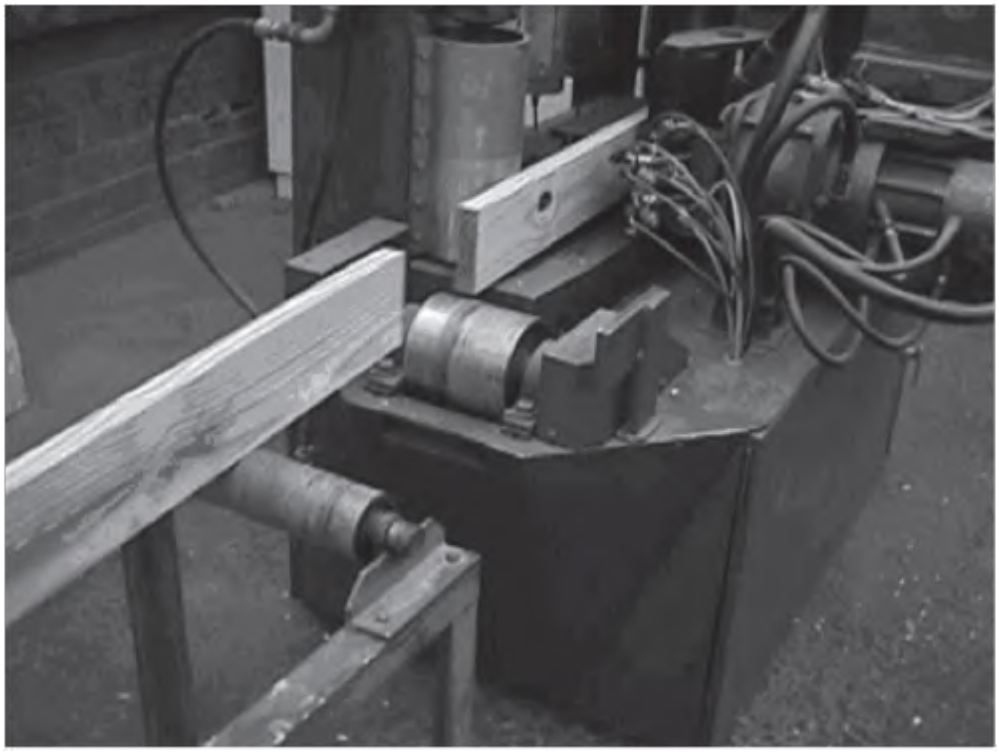
2.4. *Machine stress rate* (MSR)

A madeira é um material de fonte renovável, apresentando grande variabilidade em suas propriedades mecânicas, que necessitam ser adequadamente caracterizadas e avaliadas para correto uso. Buscando avaliar estas propriedades por meio de ensaios não destrutivos, pode-se destacar a classificação mecânica por tensões *machine stress rate* (MSR), a qual é um efetivo sistema de classificação e avaliação de peças estruturais de madeira, com alta produtividade, podendo todas as peças produzidas serem avaliadas e certificadas.

O processo de classificação por meio de ensaios não destrutivos tem finalidade de determinar os valores do modulo de elasticidade (MOE) e sua correlação com os módulos de resistência à flexão (MOR).

A avaliação NDA, por meio da técnica MSR em peças de madeira (espessura máxima de 38 mm), permite resultados rápidos e total automatização durante o processo, o qual consiste na passagem da peça por uma série de rolos, que aplicam uma força perpendicular ao eixo de menor inércia da seção transversal (a cada 15 cm de comprimento), ocorrendo a flexão e aferindo-se, assim, o módulo de elasticidade estático - MOE (Figura 6) (CANDIAN, 2007; CARREIRA, 2003).

Figura 6 - Classificação mecânica não destrutiva machine stress rate (MSR).



Fonte: Freitas e Goés (2005).

As vantagens deste sistema de classificação, conforme Freitas e Goés (2005), são as seguintes: i) as peças de madeira não são destruídas; ii) há alta produtividade de classificação, dependendo do desempenho da máquina utilizada; e iii) a obtenção da variabilidade das peças estruturais são reais, ponderando

que os defeitos existentes nas peças são avaliados indiretamente.

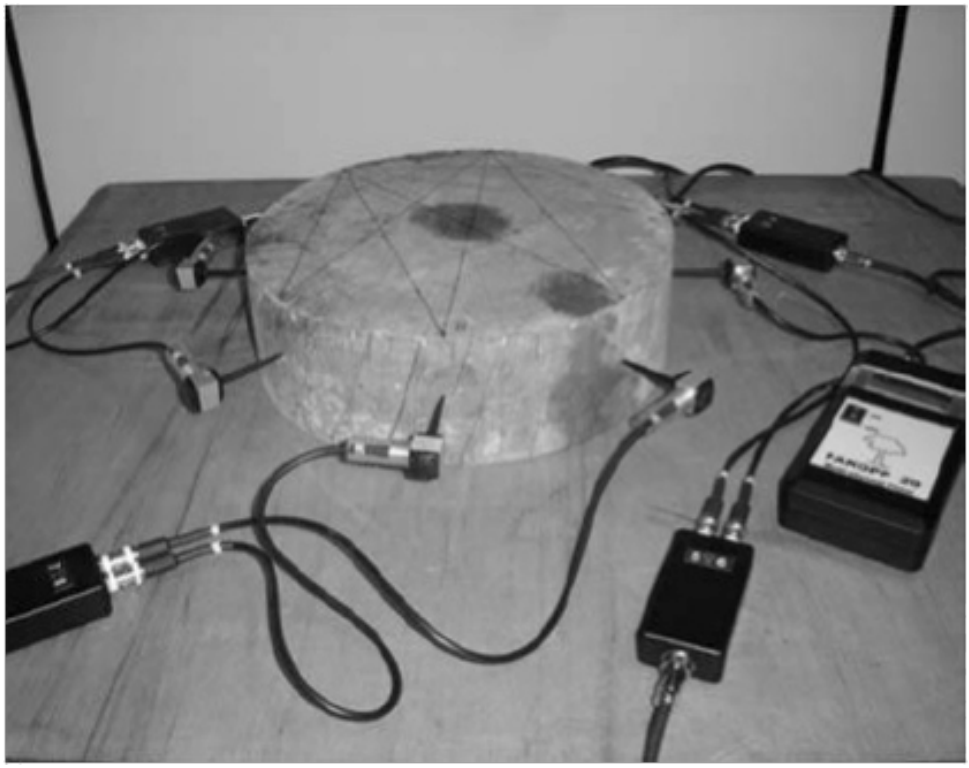
Espécies com crescimento acelerado podem apresentar muitos defeitos, tornando-se imprescindível a caracterização desse material para aplicação estrutural. Em um trabalho realizado na classificação visual de peças estruturais de *Pinus* sp, por meio da determinação da rigidez à flexão, foram utilizados três métodos: ensaio estático de flexão, equipamentos de MSR e vibração transversal. Carreira (2003) observou que a correlação entre $MOE_{estático}$ e $MOE_{dinâmico}$ foi de difícil aplicação prática.

2.5. Ondas de tensão

Ondas de tensão são, de acordo com Halliday e Resnick (2009) e Sears, Zemansky e Young (1984), perturbações que se propagam em um meio material à medida que este é deslocado de seu estado de equilíbrio, transportando energia.

Candian e Sales (2009) mencionam que a propagação de ondas de tensão apresenta como principal vantagem a possibilidade do estudo do interior da madeira, preservando as características físicas e mecânicas da peça e permitindo detectar de forma não destrutiva a presença de furos, deterioração e rachaduras (Figura 7).

Figura 7 - Ensaio de propagação sonora com oito transdutores fixados em disco de madeira.



Fonte: Candian e Sales (2009).

A propagação das ondas na madeira baseia-se na vibração de sua microestrutura e, fundamentalmente, sobre as propriedades elásticas do eixo de propagação (SANDOZ, 1996), sendo considerado um processo complexo e dinâmico. O processo é controlado pelas propriedades, orientação dos elementos constituintes e microestrutura de fibra e também pela forma geométrica do material avaliado (WANG;

SALENIKOVICH; MOHAMMAD, 2007). Dunlop (1981) confirma a complexidade deste processo, afirmando que a propagação das ondas na madeira depende, em grande parte, das propriedades mecânicas da parede celular, principalmente da camada S2, que se apresenta em maior quantidade na célula.

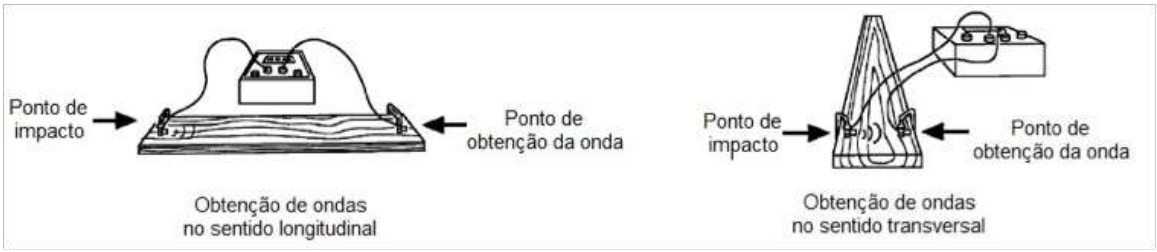
A avaliação da madeira a partir do emprego de ondas está relacionada, principalmente, ao método do ultrassom (acima 20 Hz). Matos (1997) explica que esta técnica está baseada no princípio de propagação de ondas de tensão, que é uma onda ultrassônica de baixa frequência, e que se propaga ao longo do eixo natural do material.

Ross e Hunt (2000) afirmaram que, devido à madeira ser um produto orgânico, suas propriedades podem variar de acordo com a direção na qual ocorra a excitação da onda de tensão (orientação da estrutura celular). O choque ocorrendo na extremidade fará com que a onda de choque seja essencialmente longitudinal ao longo do comprimento da peça. As células da madeira são dispostas em anéis em torno do centro da árvore, o que permitirá que a onda de tensão possa percorrer a peça de três maneiras diferentes: perpendicular (radial) ou em paralelo (tangencialmente) para os anéis ou atravessando os anéis com um ângulo entre 0° e 90°.

A onda longitudinal corresponde à oscilação de partículas ao longo da direção de propagação das ondas, de tal forma que a velocidade das partículas é paralela à velocidade da onda. Já a onda de cisalhamento está relacionada ao movimento perpendicular das partículas em relação à direção de propagação própria da onda. Por fim, a onda de superfície é, geralmente, restrita à região adjacente à superfície, onde as partículas se movem para cima e para baixo e para trás e para frente, traçando caminhos em forma elíptica (WANG; ROSS; CARTER, 2007).

Segundo Zhang, Wang e SU (2011), para a medição da velocidade de propagação de ondas há a necessidade de dois sensores estarem em contato com a madeira, sendo um deles destinado à emissão do impacto e o outro utilizado para a recepção da energia ondulatória proporcionada pelo impacto (Figura 8). Wang, Ross e Carter (2007) afirmam que, quando um impacto é aplicado sobre a superfície, ocorre uma perturbação ondulatória, a qual percorre a madeira como uma onda de tensão. A velocidade de propagação pode, então, ser determinada medindo-se o tempo necessário, em microssegundos, para que a onda de pulso único percorra a distância entre dois acelerômetros (ROSS; HUNT, 2000; ZHANG; WANG; SU, 2011).

Figura 8 - Esquema ilustrativo do aparelho para tomada de ondas de tensão em peças de madeira.



Fonte: Modificado de Ross e Hunt (2000).

A influência de diversas propriedades da madeira sobre a propagação da onda, tais como o teor de umidade, a massa específica, a constituição anatômica e a geometria do corpo-de-prova, é mencionada por Bucur (1983) como importante, pois interfere no comportamento da mesma.

Tecnologias baseadas em ondas têm sido utilizadas como ferramentas de avaliação de diversos materiais há muito tempo. De uma maneira geral, informações sobre propriedades da madeira, tais

como módulo de elasticidade, massa específica, teor de umidade e defeitos, podem ser obtidas através de medição e monitoramento da propagação de ondas em madeira e nos produtos obtidos a partir de seu processamento, o que é bem explorado para caracterizar as propriedades físicas e mecânicas da madeira e de seus produtos reconstituídos (WANG; ROSS; CARTER, 2007).

Del Menezzi, Silveira e Souza (2010), avaliando a viabilidade de utilização da técnica de ondas de tensão na estimativa de propriedades de flexão em espécies de madeiras amazônicas, verificaram que o método é adequado, pois permitiu identificar variações entre as espécies. Por outro lado, quando a variabilidade é baixa, como dentro da espécie, os modelos apresentaram baixa previsibilidade.

Em estudo com painéis estruturais com lâminas paralelas provenientes de madeira de *Eucalyptus grandis*, Pio (2002) concluiu que é possível utilizar a técnica de tensão por ondas para classificar lâminas em classes de rigidez. O autor também concluiu que o fator de rigidez aparentemente empírico é um importante instrumento para se estimar valores para o módulo de elasticidade dinâmico, o que irá determinar também o uso final dos painéis.

2.6. Ensaios radiográficos

O método por ensaios radiográficos foi um dos primeiros ensaios a ser estudado e aplicado. Ele se baseia na variação da atenuação da radiação eletromagnética (raios-X ou raios gama), causada pela presença de descontinuidades durante a passagem da radiação pela madeira, sendo a imagem registrada em um filme radiográfico ou em um sistema de radioscopia, do tipo intensificador e integrador de imagem, que mostra o resultado em um monitor de TV. As radiações gama e X são ondas eletromagnéticas com pequenos comprimentos de onda, menores que 1 angstron (10-10m), e altas energias, da ordem de quilo a mega elétron-volts. Essas características possibilitam a penetração na matéria.

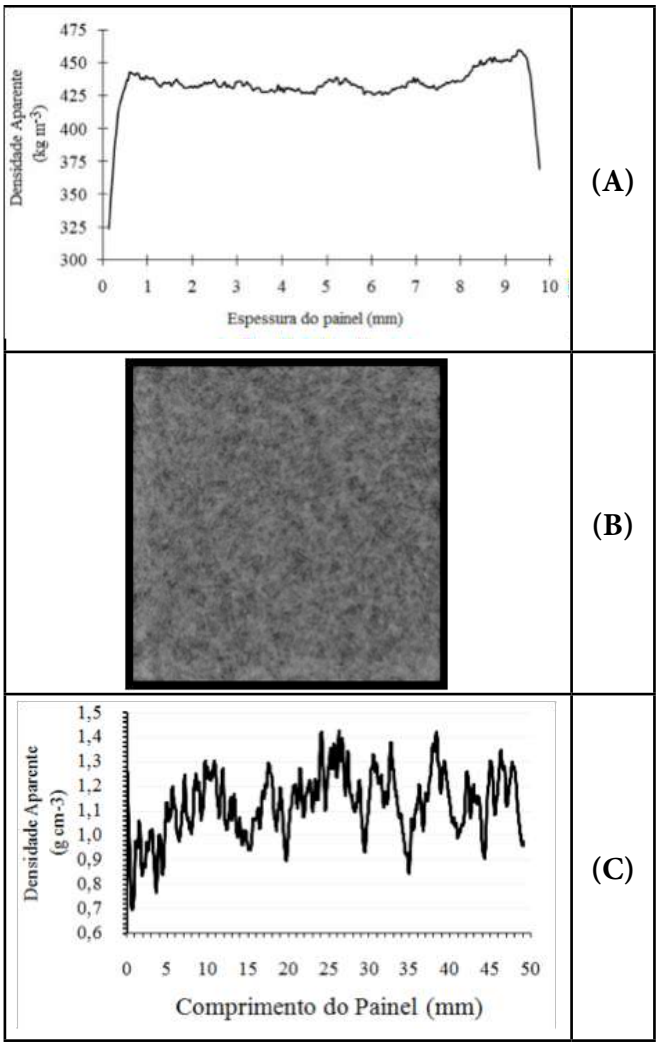
Esta técnica fornece uma imagem que possibilita verificar a localização de defeitos, além de avaliar as características internas do material. Ela utiliza a transmissão de radiação na forma de energia através do material a ser inspecionado, obtendo como resultado uma imagem da sua constituição pela diferença da radiação incidente $I_0(x)$ e da radiação absorvida I(x). Esta relação é associada à espessura da madeira (x) e à sua densidade (μ), o resulta na equação de Beer-Lambert (Equação 4) a seguir:

$$I(x)=I_0(x) \exp\left(-f_L \mu(x,y)\, dy\right) \quad (4)$$

O ataque por agentes xilófagos provoca perda de massa, originando zonas que são caracterizadas por possuírem menor densidade; essa peculiaridade pode ser revelada quando se utiliza ensaios de raios-X, e se no caso permanecer ativo o ataque, a partir deste método poderá ocorrer a identificação do agente em causa observando variações na tonalidade de cinza da imagem ou descontinuidades nos perfis densitométricos.

Em outras palavras, pode-se dizer que quando a densidade e a espessura do material limita a quantidade de radiação que atravessa o mesmo, se obtém, como resultado, uma representação bidimensional da variação de densidade do material que foi atravessado pelo feixe de raios-X (JÚNIOR, 2006). Estruturas de alta densidade radiológica, como os ossos, se apresentam claras e hipertenuantes na imagem tomográfica, mas o ar, pela sua baixa densidade, se apresenta escuro e hipotenuante (Figura 9 B).

Figura 9 - Imagens geradas a partir do equipamento de raios-X, sendo A, perfil densitométrico da espessura do painel de partículas de madeira de *Acacia mangium*; B, imagem radiográfica horizontal de um painel aglomerado de *Eucalyptus* spp; e C, perfil horizontal gerado a partir de tons de cinza pelo software livre *Image* J da imagem B.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O ataque por agentes xilófagos provoca perda de massa e origina zonas que são caracterizadas por possuírem menor densidade. Essa peculiaridade pode ser revelada quando se utilizam ensaios de raios-X e, se no caso permanecer ativo o ataque a partir deste método, poderá ocorrer a identificação do agente em causa, observando variações nas tonalidades de cinza da imagem ou em descontinuidades nos perfis densitométricos.

O ensaio radiográfico apresenta algumas vantagens quando comparado aos outros ensaios não destrutivos, dentre essas podemos citar a alta sensibilidade de inspeção, a facilidade de interpretar a imagem, a exatidão dimensional da imagem resultante, além do fato de que a impressão permanece por tempo ilimitado (JÚNIOR, 2006). Além disso, esse método investiga, inspeciona e auxilia no controle de qualidade na indústria, além e ser possível verificar a capacidade de penetração nos materiais, a diferença de absorção para diferentes materiais, e a capacidade de afetar um filme radiográfico, etc. (GARCIA, 2012).

Quando a penetração da radiação (raios-X ou raios gama) é realizada em uma peça de madeira

(isso se deve ao seu baixo comprimento de onda – entre 0,01 a 1,0A), parte dos fótons dos raios é removida do feixe incidente em uma quantidade proporcional à massa específica e à espessura da madeira (EVANS; EVANS; KIBBLEWHITE, 2000; GARCIA, 2012; HAUFFE; MAHLER, 2000; QUOIRIN, 2004).

Chen e Wellwood (2002) e Wang, Salenikovich e Mohammad (2007), em seus trabalhos utilizando o sistema de raios-X para verificar a densidade de painéis OSB comerciais, concluíram que através desta metodologia foi possível obter uma boa amostragem (ampla) na caracterização dos efeitos da densidade sobre outras propriedades dos painéis de madeira.

Surdi et al. (2014) utilizaram a técnica de raios-X para obter os perfis de densidade em painéis OSB, tentando estabelecer a relação desse método com a propriedade mecânica de resistência à ligação interna. Os autores constataram que a formação do colchão foi homogênea, sem irregularidade no processo de deposição das partículas ao longo dos painéis, e afirmaram também que os menores valores encontrados no perfil densitométrico podem estar associados ao fato do feixe colimado permitir uma atenuação micrométrica no sentido da espessura do painel, havendo também uma correlação positiva e significativa entre os valores de densidade aparente dos painéis obtidos por atenuação de raios-X e os resultados de ligação interna.

2.7. Tomografia computadorizada

Em 1972, a tomografia, como método de diagnóstico por imagem, foi apresentado à sociedade científica pelo inglês Godfrey N. Hounsfield. A tomografia computadorizada é um método que combina o uso de raios-X obtidos por tubos de alta potência com computadores adaptados para processar e produzir imagens com alto grau de resolução.

Nos atuais tomógrafos computadorizados, um tubo de raios-X emite um feixe de radiação laminar em forma de leque e de espessura muito fina que atravessa a madeira indo sensibilizar um conjunto de detectores. Este, por sua vez, se encarrega de transmitir os sinais obtidos a um dispositivo eletrônico que transforma os sinais obtidos em dígitos de computador.

Os atuais tomógrafos computadorizados exigem computadores velozes com processadores potentes e alta capacidade de armazenamento de dados. A plataforma de trabalho deve incluir ainda o tratamento gráfico das imagens, necessário para a reconstrução de modelos de reformatações multiplanares, reconstruções tridimensionais, modelos de navegação, etc.

Se o material é heterogêneo, o produto μx é substituído por uma integral de linha e a intensidade de saída do feixe torna-se uma função da posição. Desta forma, a atenuação é expressa por uma função $\mu(x,y)$ e a intensidade de saída do feixe pode ser expresso também pela Equação 4.

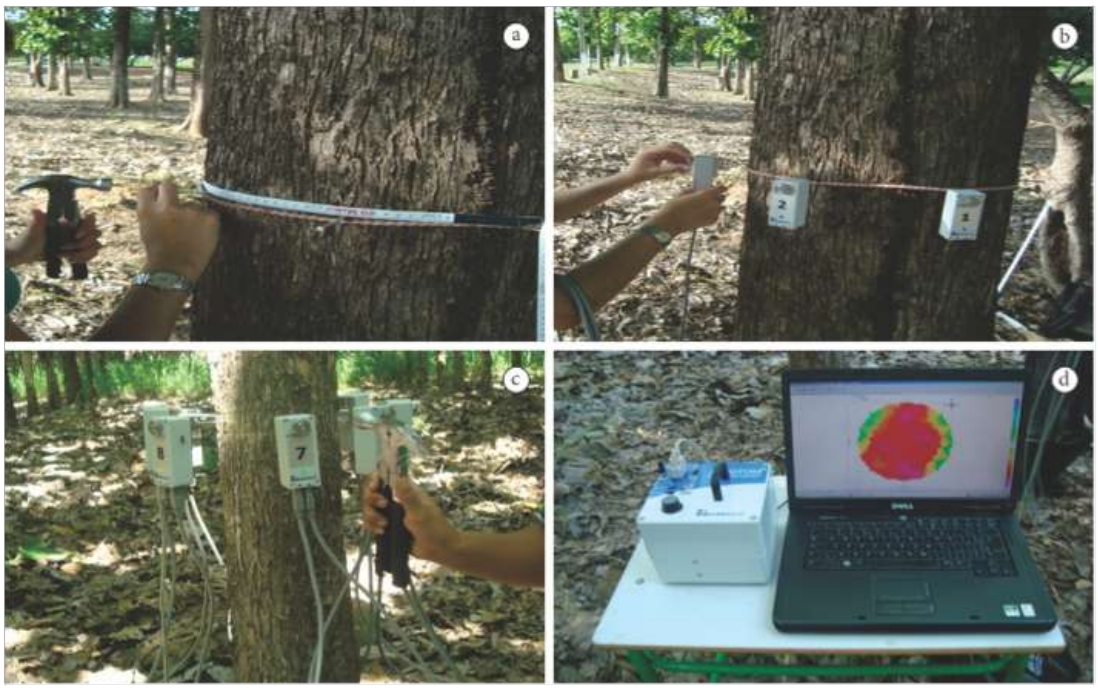
A tomografia de impulso se caracteriza por permitir a avaliação do interior do lenho de árvores e por possibilitar a passagem de ondas mecânicas, o que permite analisar a presença de alguns defeitos, que representemalteração das propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira, tais como fungos, ataques de insetos, rachaduras e nós. Seu funcionamento tem por base a reconstrução de seções transversais de objetos por meio de informações fornecidas pela passagem de ondas que são provenientes da superfície (RINNTECH, 2005).

Amodei et al. (2010) afirmaram que esta técnica é utilizada nos mais diversos setores. Na indústria madeireira possibilita a visualização do interior das toras de madeira, o que facilita e aperfeiçoa

a localização e orientação no momento do corte das tábuas. No setor elétrico e de telefonia possibilita a visualização do interior de postes, verificando, assim, a presença de falhas. Órgãos governamentais e de proteção do meio ambiente também fazem uso desta tecnologia para detecção de possíveis doenças e de degradação.

Segundo Rinntech (2005), o tomógrafo de impulso consiste em sensores fixados nas seções transversais da árvore, onde os mesmos, ao receberem pancadas de martelos, produzem ondas mecânicas e, através de um software, é medido o tempo de percurso e a velocidade entre os sensores, sendo posteriormente gerado um gráfico (imagem tomográfica) (Figura 10). A partir das informações geradas pelo gráfico é possível verificar alguns fatores, tais como a porcentagem de cerne e alburno, a madeira de reação, a presença de nós, defeitos internos e a podridão do lenho.

Figura 10 - Instalação de tomógrafo em árvores de *Tectona grandis* com 11 anos de idade: a) Fixação dos condutores metálicos; b) Distribuição dos sensores; c) Pancadas de martelete para produção de ondas mecânicas; d) Obtenção da imagem tomográfica.



Fonte: Amodei et al. (2010).

A tomografia computadorizada fornece dados quantitativos dimensionais e também dados sobre as características do material. A imagem final gerada tem por base a interação dos raios-X com a matéria, liberando energia luminosa e formando uma imagem digitalizada a partir de materiais de baixa e alta densidade, podendo ser utilizada industrialmente com diversos tamanhos e formas, altas energias e alto poder de penetração. O tempo necessário para coletar os dados do material depende de alguns fatores, tais como energia e intensidade da fonte de raios-X, tamanho e composição da amostra. A intensidade de raios-X é processada por um software, obtendo como resultado uma imagem em duas dimensões (GARCIA, 2012).

Na madeira, a tomografia de raios-X pode ser utilizada para visualizar e analisar as estruturas

internas das árvores (em amostras e em espécies vivas). Vários são os trabalhos que enfatizaram o uso de tomógrafos para o estudo da madeira.

Onoe et al. (1984) desenvolveram um tomógrafo portátil para analisar de forma não destrutiva árvores, postes de madeira e outros elementos. A tomografia gerada permitiu revelar a idade da árvore, anéis de crescimento, apodrecimento avançado e rachaduras. Na época do desenvolvimento de seu estudo, os autores indicaram possíveis usos futuros para o equipamento, tais como aplicação na fisiologia de plantas, dendrocronologia e madeira serrada.

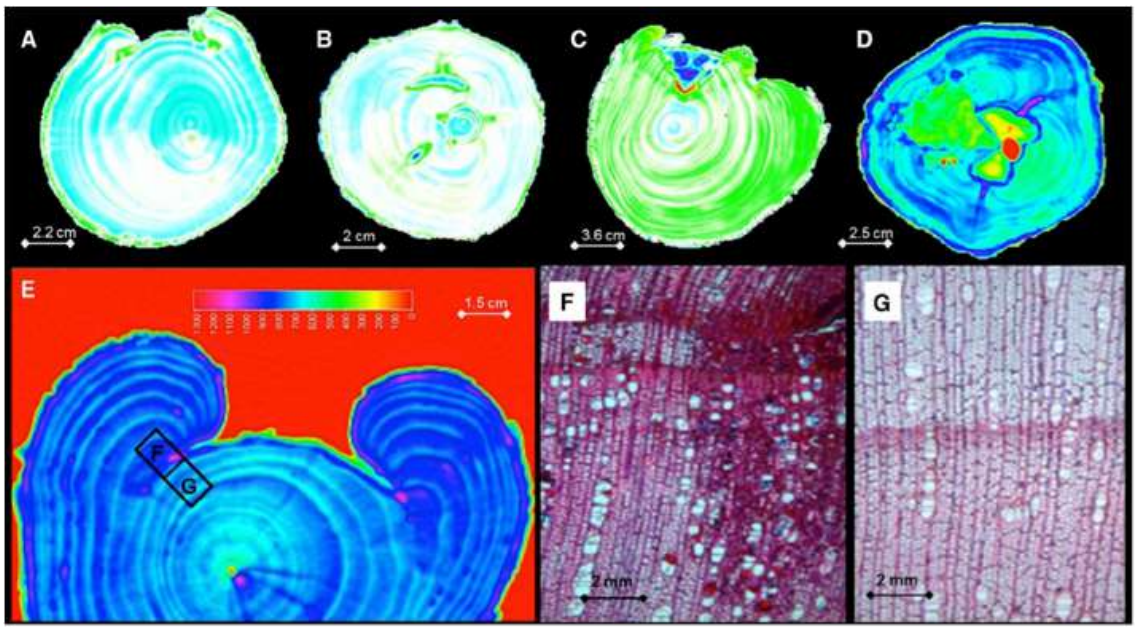
Esta técnica permitiu a Amodei et al. (2010) verificarem a presença de zonas distintas no lenho através da variação da velocidade de ondas mecânicas, indicada por zonas variadas de cores diferentes e reveladas em imagem tomográfica de *Tectona grandis*, indicando variações da densidade e umidade da madeira.

Gupta, Schmoldt e Isaacson (1999) também propuseram um novo método de tomografia tangencial com aplicação em toras de madeira. Rinnhofer, Petutschnigg e Andreu (2003) utilizaram um tomógrafo de raios-X de aeroporto para visualizar o interior de toras de madeira em marcenarias com o objetivo de determinar as melhores posições e padrões de cortes para obter produtos de maior qualidade e valor. Li, Abbott e Schmoldt (1996) também estudaram e desenvolveram um sistema de análise de imagens de toras de madeira por três processos: etapa de pré-processamento, classificação por rede neural e pós-processamento.

Ballesteros-Cánovas, Stoffel e Guardiola-Albert (2015) utilizaram a técnica de tomografia computadorizada associada a imagens e geoestatística na identificação de danos mecânicos na madeira de árvores que sofreram alagamentos. Com base em testes estatísticos não-paramétricos e análises de componentes principais (PCA), os autores identificaram indícios de características anatômicas microscópicas em áreas afetadas na madeira em processos de decomposição (Figura 11).

Nicolotti et al. (2003) utilizaram a tomografia elétrica associada ao ultrassom e a um georadar para detecção de zonas de degradação em árvores urbanas, comparando os resultados com o penetrômetro tradicional. A tomografia elétrica revelou zonas de baixa resistividade aproximadamente centradas no tronco, mostrando também que as áreas deterioradas estavam associadas fortemente com zonas de alta umidade e zonas de baixa resistividade. A tomografia ultrassônica demonstrou ser muito eficaz para a detecção da deterioração interna, como seu tamanho e forma. Com a técnica do georadar, o alto contraste medido permitiu a detecção da interface entre a secção deteriorada e as zonas intactas da árvore. O perfil penetrométrico apontou áreas de baixa resistência no interior dos troncos afetados.

Figura 11 - Imagem tomográfica transversal da madeira de espécies de folhosas presentes em mata ciliar que sofreram inundação. A é saudável, com ausência de cicatrizes internas e recuperação das taxas de crescimento após o ferimento; e B, C e D apresentam danos devido a múltiplas cicatrizes e a ausência de pós-ferimento de recuperação do crescimento. Nas figuras C e D nota-se a área de reação na fronteira do xilema (na cor verde em A e B), bem como isolamento da área deteriorada em C. As cores azuladas e esverdeadas-amareladas apontam para diferentes estados de decomposição. E representa uma visão transversal após o processamento do filtro para destacar o calo (em lilás). F e G apresentam cortes anatômicos transversais relacionados ao dano.



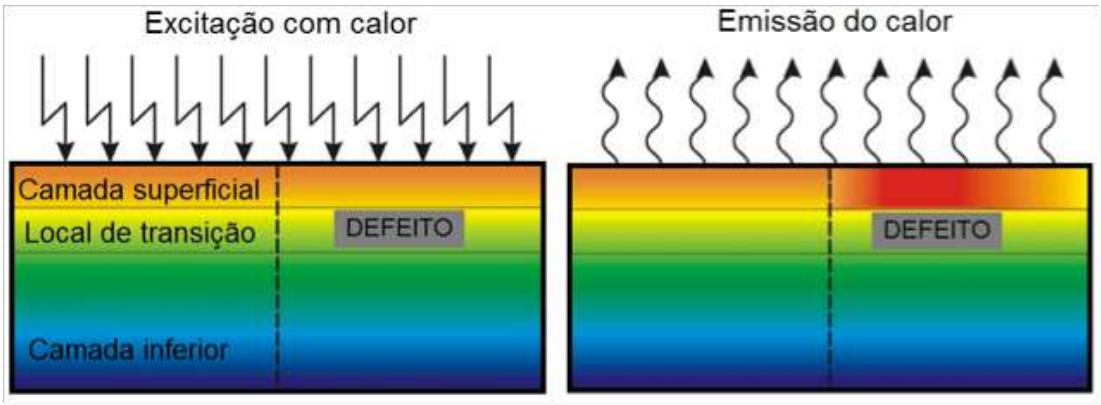
Fonte: Ballesteros-Cánovas, Stoffel e Guardiola-Albert (2015).

2.8. Detecção termográfica

A termografia infravermelha é um método de teste e avaliação rápida e não destrutiva que pode medir de forma rápida grandes superfícies, buscando defeitos internos, tais como falhas de colagem em elementos colados e/ ou pequenas falhas estruturais em peças de madeira.

De acordo com Meinlschmidt (2005), a técnica é baseada em um aquecimento que o corpo-de-prova é submetido, sendo que a dissipação da velocidade de irradiação deste calor é dependente de suas propriedades térmicas, como densidade, capacidade calorífica e condutividade térmica. O autor ainda menciona que havendo um defeito na subsuperfície, este cria uma barreira para o processo de difusão de calor e, portanto, a temperatura da superfície do defeito diminuirá mais lentamente do que a temperatura em outras regiões. A superfície superior de tais defeitos mostrará um ponto quente para um tempo maior do que seu entorno (Figura 12).

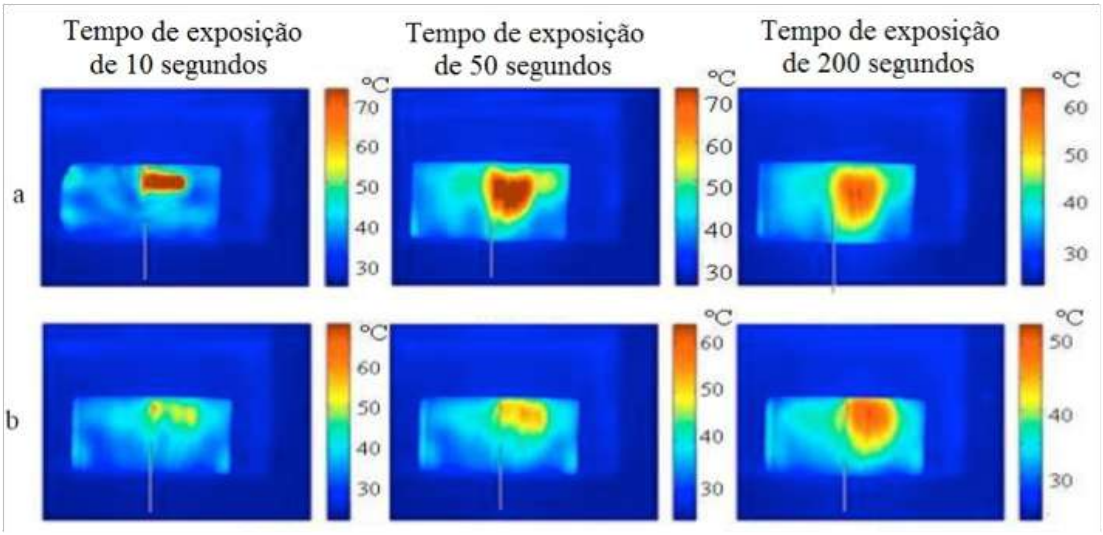
Figura 12 - Esquema ilustrativo do principio da aplicação da técnica de termografia de infravermelho, mostrando o impacto do calor uniformemente distribuído sobre a superfície (esquerda), a emissão de calor registada (direita) e a região mais quente (escuro) na superfície acima do defeito.



Fonte: Modificado de Meinlschmidt (2005).

A termografia por infravermelho também pode ser utilizada para detecção de pontos deteriorados na madeira. Wyckhuyse e Maldague (2002) realizaram esta técnica para este fim e afirmam que é plenamente possível, porém com precauções nas profundidades, nos tamanho dos defeitos e na umidade das peças a serem avaliadas (Figura 13).

Figura 13 - Pontos de defeito detectados por emissão de microondas em peças de madeira secas (a) e peças de madeira úmidas (b).



Fonte: Modificado de Wyckhuyse e Maldague (2002).

Na indústria de painéis aglomerados, por exemplo, as medições podem ser realizadas imediatamente na saída do painel da prensa, aproveitando, desta forma, o calor irradiado da produção. Nesse caso, diferentes temperaturas, tais como pontos frios e quentes, observadas na superfície, podem indicar defeitos na superfície ou mesmo no interior do painel. As temperaturas da superfície em painéis à base de madeira podem variar entre 40 °C, em OSB, e mais de 100 °C, em aglomerados.

Meinlschmidt (2005) menciona que a termografia por infravermelho pode ser realizada em prensas contínuas e descontínuas em aglomerados, com espessura entre 3 e 38 mm, a uma velocidade de 20 a 30 m min^{-1}, podendo detectar danos causador nas bordas por empilhadeiras.

A técnica também foi utilizada por López, Basterra e Acuña (2013) para estimar a densidade em peças de madeira por meio de procedimentos estatísticos e de imagens, apresentando-se como uma alternativa interessante para a caracterização desta propriedade física.

3. A radiação síncrotron

A aplicação da radiação síncrotron nas pesquisas em geral tornou-se um campo produtivo em laboratórios de luz síncrotron em todo o mundo. No tempo relativamente curto em que os síncrotrons foram disponibilizados para a comunidade científica, as características dos seus feixes têm sido aplicadas a todas as áreas da ciência que usam radiação ionizante, em especial em ensaios não destrutivos usando microtomografia computadorizada. A principal característica destas fontes é o espectro de

energia largo e contínuo que fornece um alto fluxo de fótons sob uma faixa de energia de até 50 keV ou maior. Além disso, o feixe possui uma alta colimação natural e um alto grau de coerência no espaço e tempo. Estas características em combinação com a ótica sofisticada diferenciam essas fontes das ferramentas de pesquisa padrão, como os tubos de raios-X ou as fontes de radiação gama.

Durante os últimos anos, diversos laboratórios síncrotron desenvolveram linhas de luz dedicadas às aplicações diversas. Essas linhas fazem uso não somente das excelentes características da fonte, mas também do fato de que a alta intensidade da radiação síncrotron permite selecionar e ajustar feixes de fótons monocromáticos com uma *bandwidth* de energia muito estreita.

Sempre que uma carga elétrica é acelerada, ela emite radiação eletromagnética. Uma partícula que é acelerada de forma harmônica gera um campo elétrico senoidal em função do tempo e este oscila de acordo com a frequência do seu movimento. Se a velocidade da partícula for bem inferior à da luz, essa emissão tem o seu valor máximo para ângulos perpendiculares à direção de aceleração. Por outro lado, nas proximidades da velocidade da luz, ocorrem mudanças interessantes na emissão de radiação relacionadas com as frequências emitidas e a forma (direção) como a partícula é emitida. Alterações mais profundas ocorrem a velocidades relativísticas no movimento circular em que o espectro de emissão de radiação torna-se quase contínuo, apresentando uma infinidade de harmônicos da frequência fundamental de oscilação. Esta radiação é conhecida como luz síncrotron (MARGARITONDO, 1995).

A radiação ou luz síncrotron é produzida por aceleradores anulares nos quais circula uma corrente pulsada de elétrons de alta energia ($E >> moc^2$) com velocidade praticamente igual à velocidade da luz. A radiação síncrotron é produzida pelo movimento circular destes elétrons em velocidades relativísticas nas tangentes às curvaturas de sua trajetória.

O processo de produção é iniciado por um canhão de elétrons de um acelerador linear. Os aceleradores lineares são aceleradores de partículas carregadas, como elétrons, prótons ou íons pesados. As partículas carregadas entram em um tubo onde existem campos elétricos alternados. Estas partículas são aceleradas primeiramente por um campo elétrico e entram em um tubo de corrente ou *drift tube*, onde são protegidas do campo elétrico e o atravessam com velocidade constante até a próxima abertura. Neste ponto as partículas são novamente aceleradas e, a cada abertura entre os tubos *drifts*, as partículas recebem mais e mais energia. Esse processo é capaz de acelerar as partículas carregadas com energias muito grandes.

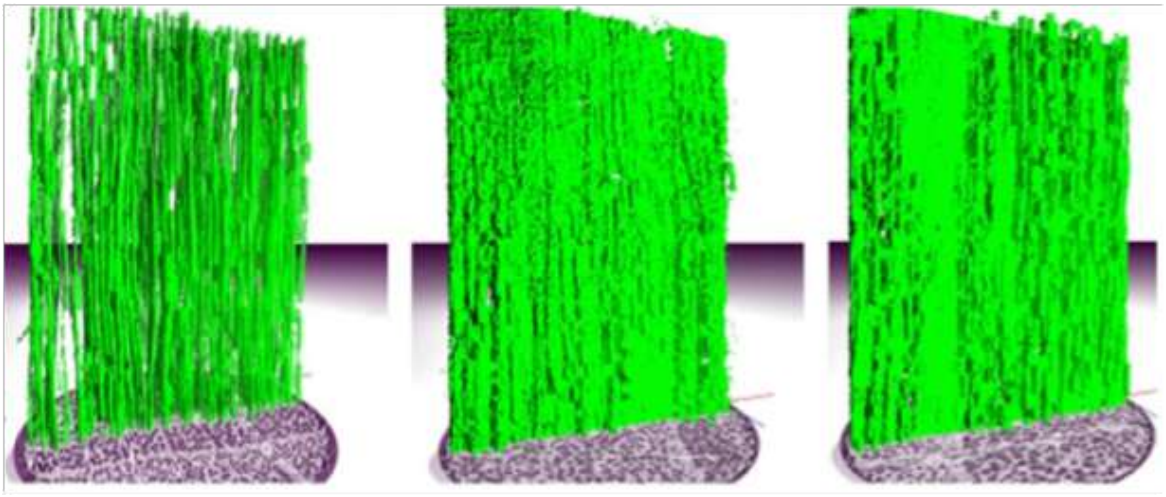
O feixe de elétrons gerado pelo acelerador linear é injetado em um anel de armazenamento, onde há três dispositivos básicos: os dipolos magnéticos, formados por imãs dipolares que produzem um campo magnético homogêneo no sentido vertical, que são responsáveis pela deflexão do feixe e consequente produção de luz síncrotron; os quadripolos ou sextupolos, que estão situados nos trechos retos do anel e servem para focalizar os elétrons e reduzir as aberrações cromáticas; e a cavidade de rádio frequência, que está situada em um ou mais trechos retos e é responsável por acelerar os elétrons injetados a baixa energia até a energia final e por fornecer aos elétrons, em cada passagem pelo interior da mesma, a energia perdida em cada volta devido à radiação produzida nas partes curvas de suas trajetórias para aumentar o tempo de vida do feixe (MARGARITONDO, 1995).

A utilização de luz síncrotron pressupõe o uso de monocromadores de modo a selecionar a região desejada do espectro eletromagnético. Os feixes de raios-X que podem ser obtidos em uma máquina de luz síncrotron são extremamente intensos, colimados e dotados de um elevado grau de coe-

rência longitudinal. Além disso, com a utilização de cristais monocromadores, é possível obter feixes praticamente monocromáticos com energia selecionável dentro de um amplo espectro de energia. O feixe é, por sua natureza, laminar com altura de alguns milímetros e com largura de algumas dezenas de centímetros no plano do objeto, o que o torna ideal para sistemas de imagem. As características geométricas do feixe podem também ser modificadas mediante o uso de cristais assimétricos ou de outras óticas de modo a adaptar-se a exigências específicas (ARFELLI et al., 2000).

Existe uma grande variedade de métodos e tecnologias que aplicam a radiação síncrotron, podendo ser citados angiografia, mamografia, microtomografia computadorizada, radioterapia, terapia por ativação fotônica, microfluorescência de raios-X, difração de raios-X, espalhamento a baixo ângulo, biologia estrutural, entre outros (CHAPPARD et al., 2006). Além disso, pesquisas contínuas nas áreas de imagem, tais como imagem por dupla energia, contraste de fase e por difração de raios-X, têm sido alvo de significativo desenvolvimento (BARROSO, 2007). Essas técnicas podem revelar informações das microestruturas e das microarquiteturas da madeira (MANNES et al., 2010) e de seus materiais reconstituídos de maneira que outras técnicas não podem demonstrar (Figura 14).

Figura 14 - Segmentos da linha de cola indicando diferenças distintas do comportamento de penetração de um modo espacial a partir dos adesivos poliuretanao, PVAc e ureia formaldeído, respectivamente, obtidos a partir da radiação síncroton.



Fonte: Mannes, Niemz e Lehmann (2009).

A microtomografia de raios-X é baseada no mesmo principio físico da tomografia computadorizada, porém com a vantagem de uma melhora na resolução espacial de alguns micrômetros. A princípio, a microtomografia não requer particular preparação de amostras, exceto checar que o tamanho da amostra seja adequado ao campo de vista do detector (FOV). Já os parâmetros experimentais devem ser otimizados para condições especificas.

No mundo moderno, a análise de microestruturas e microarquitetura de madeiras, seja para auxiliar nos diagnósticos, na análise da melhor liga ou na melhor técnica para alterar a qualidade de determinados produtos, tornou-se um grande aliado da caracterização de madeiras e painéis. Essa caracterização pode ser feita por meio de cálculos de densidade, superfícies, comprimentos e forma dos micro canais presentes na madeira, colas usadas em painéis, análise de porosidade, conectividade ou até mesmo da anisotropia.

Avanços recentes na microtomografia computadorizada (μTC) têm tornado possível a obtenção de dados tridimensionais (3D) de modo não destrutivo. A radiação síncrotron (RS) combinada com μTC (RS-μTC ou SR-μCT em inglês) tem possibilitado novas descobertas na análise 3D de diferentes estruturas complexas, principalmente nos estudos de madeiras e painéis. As propriedades naturais de colimação e a alta intensidade do fluxo de fótons da radiação síncrotron, mesmo após a monocromatização do feixe, permitem a RS-μTC reconstruir imagens 3D com uma alta razão sinal-ruído. A possibilidade da monocromaticidade do feixe elimina artefatos de endurecimento do feixe (*beam-hardening artifacts*), permitindo a quantificação da imagem para determinar a localização de detalhes específicos na madeira.

4. Principais desafios na utilização das técnicas não destrutivas

- Acessibilidade econômica dos equipamentos utilizados nos alguns ensaios;
- Muitos são os métodos não destrutivos, porém alguns necessitam de mão de obra especializada e treinamento prévio do operador para que os resultados obtidos sejam confiáveis;
- A determinação do comportamento e das características de uma árvore em campo é complexa, pois sua avaliação está relacionada a diversos fatores, tais como variação da geometria da árvore, idade, condições climáticas e práticas silviculturais (BODIG, 2000);
- Cascas, galhos, raízes e troncos mal formados possuem certa dificuldade geométrica e heterogeneidade para a aplicação de técnicas não destrutivas;
- A seção transversal, o comprimento e a forma geométrica afetam significativamente o comportamento da onda de tensão, gerar dados imprecisos ocasionalmente (WANG et al., 2004);
- Aumento da qualidade das tomografias (redução de ruídos) e reconhecimento automático de defeitos em tomógrafos de amostras de madeira usando redes neurais artificiais podem permitir melhores resultados (QUOIRIN, 2004).

5. Considerações Finais

O interesse em torno de ensaios não destrutivos para a determinação de propriedades físicas e mecânicas de madeiras é uma excelente alternativa para pesquisas em que certos tipos de detalhamentos são imprescindíveis.

Muitas são as técnicas não destrutivas, entretanto, cada uma possui sua função e aplicação. Na madeira, esses ensaios detectam falhas e irregularidades, além de verificar a influência das propriedades físicas e mecânicas em seu comportamento fisiológico.

Por meio de ensaios não destrutivos é possível obter a caracterização e classificação eficaz da madeira sólida, assim como de produtos reconstituídos de madeiras, sem a necessidade da extração de corpos-de-provas, não provocando prejuízos para o material analisado e mantendo suas características originais.

É imprescindível que a manipulação de equipamentos para realização de ensaios não destrutivos seja feita por pessoa com conhecimento prévio para garantir a confiabilidade dos resultados.

CAPÍTULO 8

MADEIRA LAMINADA COLADA (MLC): PRESCRIÇÕES TÉCNICAS DE CONFECÇÃO E UTILIZAÇÃO

Lorenzo Lube dos Santos, Macksuel Soares de Azevedo, Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

1. Introdução

O setor florestal brasileiro desempenhou forte crescimento nos últimos anos alavancado por pesquisas que contribuem para desmistificar a utilização das madeiras na construção civil, seja nas utilizações menos nobres, como na produção de escoras, formas e tapumes de obras, seja nas utilizações mais nobres, como em acabamentos internos, mobilharia fina e estruturas de edificações.

Sendo o Brasil um país de grande extensão territorial, de vasta diversidade climática e culturalmente ligado à produção vegetal, os sistemas de manejo florestal foram introduzidos e ganharam grande destaque mundial com o potencial produtivo. Atualmente, o país tem destaque na produção de espécies exóticas por proporcionar rápido crescimento, sendo um dos principais produtores do gênero arbóreo Eucalipto do mundo, impulsionado pelo mercado de produção de celulose e papel, que investe constantemente em pesquisas de melhoramento genético (BOSCHETTI, 2014).

Ainda assim, algumas espécies nativas brasileiras começaram a entrar em escassez no mercado. O principal motivo para isto é que, além da proteção governamental de determinadas espécies, alguns grupos vegetais demoram muitos anos para serem abatidos e transformados em produtos adequados para o consumo do mercado. Logo, a utilização de florestas exóticas plantadas para o suprimento do mercado, antes ocupado pela exploração das florestas nativas, tornou-se uma realidade para a maioria dos produtos de madeira.

No entanto, para a confecção de estruturas de madeira, é importante que, além de boas características físicas e mecânicas, a madeira possua dimensões muitas vezes superiores a dos indivíduos arbóreos oriundos das florestas exóticas plantadas. Foi para vencer esta limitação imposta pela dimensão natural das peças de madeira disponíveis no mercado que muitos pesquisadores têm depositado suas expectativas na madeira laminada colada (MLC). Trata-se de um produto "engenheirado" obtido a partir da união de peças de madeiras de pequenas dimensões para a confecção de vigas ou pilares mais robustos e a partir da adesão com adesivos específicos, que devem suportar todos os esforços que a madeira maciça.

Atualmente, são poucas as empresas que confeccionam MLC no Brasil. O país ainda não possui uma norma específica que disponha dos métodos mais adequados para a sua produção, no entanto, são muitos os pesquisadores que colaboraram com estudos a cerca do assunto. Até o momento, não há registro de nenhuma empresa produtora no estado do Espírito Santo, muito menos obras cuja MLC tenha sido aplicada exclusivamente com finalidade estrutural.

O conhecimento do material e a difusão do conhecimento tornam-se ferramentas de grande valia para que a MLC possa alcançar o mercado consumidor, visto que há uma real escassez da madeira serrada no mercado para a finalidade estrutural.

2. A utilização da madeira

Desde a sua existência, o homem vem utilizando a madeira para diversas finalidades. Muito se fala que sua primeira utilidade foi na confecção de moradias e armas para a caça e há registros históricos que comprovam que há cerca de três mil anos atrás os egípcios já produziam madeira laminada/serrada. Além disto, a madeira é um dos materiais mais estudados do mundo, já que é matéria-prima para diversos produtos e base para a construção civil sustentável.

A origem do nome Brasil provém de uma das principais madeiras nativas do local, o Pau Brasil (*Caesalpinia echinata*), que existia em abundância na época do descobrimento do país e chegou a ser o principal produto comercializado pelos exploradores. Tanto o Pau Brasil quanto outras madeiras, com características fundamentais para alguns produtos como tintas, barcos, naus e utensílios, foram protegidas por leis que limitavam seu corte para os interesses dos exploradores. Assim, surgiu o termo madeira de lei, que até hoje é utilizado para as madeiras mais valiosas ou nativas.

Desde o descobrimento, as matas brasileiras começaram a ser devastadas sem nenhum cuidado ou planejamento com a finalidade de suprir as necessidades momentâneas do homem, o que acarretou gradativa escassez deste produto no mercado local.

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2013), a área desmatada na região da Amazônia foi de 27.772 km² no ano de 2004, chegando ao topo dos anos pesquisados. Este número reduziu gradativamente, chegando a uma expressiva redução de 80% até o ano de 2012, quando 4.656 km² foram desmatados, o que demonstra preocupação com as matas nativas, a fiscalização de desmatamento e a escassez das florestas naturais.

No trabalho publicado por Aguiar et al. (2012) foi realizada uma estimativa de emissões de carbono pelo desmatamento na região amazônica, que apontou uma redução aproximada de 50% nas emissões no período de 2004 a 2009 (ano em que desmatou-se 7 mil km²), tendo como principal parâmetro de medida a redução do desmatamento. Outro parâmetro a ser observado é o cultivo de florestas exóticas, que absorve carbono do ambiente, produz a madeira e evita desmatamentos ilegais.

Oliveira e Hellmeister (1998) salientam que a atividade florestal, quando utiliza métodos racionais de exploração, é uma ótima forma de associação entre o desenvolvimento e a qualidade de vida. Os autores consideram que, além da produção de madeiras, o aprisionamento do dióxido de carbono e a liberação de oxigênio são indispensáveis para a manutenção do ambiente e da qualidade de vida.

Devido à escassez das madeiras de lei, a preocupação crescente com o ambiente e a necessidade deste material nos mais diversos campos de interação do homem, a utilização de madeiras provenientes de reflorestamento cresceu consideravelmente nos últimos anos, fato explicado também pelo alto nível de padronização deste produto. Este material é obtido por meio de fontes renováveis em curto prazo quando comparadas com espécies naturais. Outra vantagem das madeiras provenientes de reflorestamento é que para cada árvore cortada, uma nova é plantada, garantindo assim um ciclo de extração e suprimento confiável, sustentável e sem danos ao ambiente (LYPTUS, 2013).

De forma geral, a madeira possui grande versatilidade e muitas características positivas para sua aplicação na construção civil, dentre as quais Brito (2010) destaca baixo peso, alta resistência mecânica, baixo consumo energético no processamento, disponibilidade no mercado, fácil manuseio e

grande vida útil quando utilizadas as devidas técnicas de tratamento na madeira.

Além disso, o Brasil ocupa lugar de destaque mundial no cultivo de espécies exóticas. As madeiras de reflorestamento mais abundantes por aqui são o pinus e o eucalipto (BRITO, 2010), sendo a primeira uma conífera que possui baixa densidade, resistência mecânica reduzida, baixa resistência a organismos xilófagos, fácil trabalhabilidade e secagem. Já o eucalipto possui densidade média a alta, resistência mecânica superior a do pinus e boa resistência natural a organismos xilófagos, entretanto, requer mais atenção no processo de corte e secagem (OLIVEIRA e HELLMEISTER, 1998).

As duas espécies de madeira possuem alto nível de padronização e cada uma possui vantagens específicas. Se utilizadas da maneira correta, com tratamento adequado e com alto grau de tecnologia, podem ter durabilidade superior a muitas madeiras nativas consideradas de lei. Barillari (2002) comprovou em sua pesquisa que o pinus tratado pode resistir por mais de 30 anos em contato direto com solo e em pleno serviço. Por esse motivo, a autora estudou a disposição de madeiras com diversos tipos de tratamento em campos de apodrecimento, verificando que aquelas madeiras com tratamento adequado não sofreram perda significativa de massa durante o período de 21 anos.

Quando comparada com outros materiais de construção, segundo Rocco Lahr et al. (2007), a madeira requer menor quantidade de energia para produção. Concreto e aço, além de necessitarem de uma enorme quantidade de energia, requerem matérias-primas não renováveis e de atividades exploratórias impactantes ao ambiente. Os autores quantizaram a energia para a produção de 1 m^3 de madeira serrada, o que varia de 600 a 630 MJ, enquanto que para a produção de carvão e aço chegam a 1.920 e 23.4000 MJ m^{-3}, respectivamente. Além disso, enquanto a madeira é gerada com energia solar e absorve CO_2, concreto e aço necessitam da queima de carvão vegetal, mineral e óleo combustível, que liberam CO_2 e diversas outras substâncias tóxicas na atmosfera.

Por estas características, a madeira de reflorestamento é o material construtivo mais indicado quando o assunto é sustentabilidade. Ainda assim, todo material tem suas vantagens e desvantagens. Entre suas desvantagens, pode-se citar a grande variabilidade de defeitos, sua necessidade de secagem, a susceptibilidade ao ataque de organismos xilófagos e a sua heterogeneidade, o que dificulta bastante o processo de projeto e construção com madeira (BRITO, 2010).

Entre as principais desvantagens da madeira de reflorestamento, a limitação de dimensões afeta diretamente seu uso estrutural, uma vez que, quando submetida a grandes vãos, requer a utilização de seções muitas vezes indisponíveis no mercado ou de grande número de ligações. A solução para isto veio na concepção da madeira laminada colada (MLC), que faz parte dos chamados produtos "engenheirados" e utilizam técnicas modernas de engenharia para sua produção (TELES, 2009; CALIL NETO, 2011).

3. Breve histórico da madeira laminada colada (MLC)

A proposta inicial de utilização desse material foi de Friedrich Otto Hetzer no início do século XX devido à abundancia de peças de madeira de pequenas dimensões. Inicialmente, as peças confeccionadas só podiam ser utilizadas em ambientes secos, devido a limitações dos adesivos, mas com a

evolução tecnológica tanto dos adesivos quanto dos processos construtivos, hoje é possível confeccionar peças com mais de 40 metros de comprimento e 2 metros da altura de secção que, suportando as mais diversas exposições químicas e intempéries, podem compor grandes estruturas de pontes, telhados e pavilhões (MIOTTO, 2009; TELES, 2009; CALIL NETO, 2011; SENA-CRUZ et al., 2013).

Azambuja (2006) e Miotto (2009) destacam que a primeira aplicação da MLC na América do Norte foi em 1934 na construção de um dos laboratórios do *"Forest Products Laboratory"*, em Wisconsin, EUA. Depois disso, com a publicação de um boletim técnico, a partir do ano de 1939 a MLC passou a ser utilizada na construção de ginásios, igrejas, pontes e, principalmente, em aplicações não residenciais. Os autores destacam a longevidade das estruturas de pontes construídas nos Estados Unidos(EUA) durante os anos 60 e que estão em serviço até hoje.

Atualmente, este material tem sido estudado por muitos pesquisadores no Brasil, mas o país ainda não possui uma norma clara e forte para a padronização deste produto. Países como Alemanha, EUA e Canadá possuem normas específicas que auxiliam na confecção de projetos diversos em MLC. Calil Neto (2011) atenta para a necessidade de normas e padronizações de ensaios para este material, uma vez que o país é um dos maiores produtores de madeira do mundo, principalmente quando se trata de espécies de reflorestamento, como pinus e eucalipto.

4. Definição

Como o próprio nome sugere, a madeira laminada colada (MLC) vem do processo tecnológico da colagem de lâminas de madeira, originando, assim, um elemento mais robusto. Estas lâminas, que devem ter espessura inferior a 50 mm, são de tamanhos relativamente pequenos quando comparados com a dimensão final da peça e são coladas tendo suas fibras orientadas de forma que estejam paralelas entre si, como pode ser observado na Figura 2.1. (FIORELLI; DIAS, 2011; CALIL NETO, 2011).

Figura 1 - Viga de madeira laminada colada.

Fonte: Rewood (2013).

Anshari et al. (2012) ressaltam que, quando as lâminas de madeira são coladas, há uma redução na variabilidade do produto final, reduzindo o efeito de características negativas da madeira, como os nós. Além disso, os autores destacam o potencial do material, que pode ser desenvolvido para os mais diversos projetos e com as mais diversas dimensões. Dentre outras vantagens da MLC, Miotto (2009) destaca a variabilidade de formas, incluindo peças curvas, a possibilidade de aplicação de contra flechas, a redução dos defeitos inerentes da madeira e a elevação da qualidade final do produto.

Apesar de a madeira ser um material combustível, os elementos estruturais da MLC normalmente são peças robustas, que podem ser utilizadas em ambientes com risco de incêndio. Estes elementos, quando submetidos ao incêndio, carbonizam a camada superficial, criando uma camada protetora que reduz, consideravelmente, a velocidade de propagação do fogo no interior do elemento e assegurando os critérios estabelecidos pela NBR 14432 (ABNT, 2012) - Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações.

Por outro lado, a grande desvantagem da MLC é que no Brasil seu custo é elevado, uma vez que depende de um processo tecnológico controlado para que sua qualidade final seja satisfatória. A madeira puramente serrada gera quantidade inferior de resíduos, requer menos energia para ser produzida e é a base para a produção deste produto.

5. A escolha da madeira para a colagem

Basicamente, todas as madeiras podem ser aderidas com adesivos. Entretanto, algumas necessitam de adesivos especiais, que podem inviabilizar o custo do produto final. Uma recomendação encontrada em quase toda a literatura disponível é que as madeiras sejam da mesma espécie, principalmente de coníferas com densidades entre 0,40 e 0,75 g cm^{-3} ou folhosas com densidades baixas (ZANGIÁCOMO, 2003; FIORELLI, 2005; SZÜCS et al., 2008; CALIL NETO, 2011).

Plaster et al. (2008) realizaram um estudo com a madeira de eucalipto dividida em três classes de densidade, confirmando que este fator influi diretamente na qualidade da adesão. Para tanto, foram utilizados dois adesivos distintos, o resorcinol-formaldeído e o acetato de polivinila, e realizados ensaios de cisalhamento, que testou as linhas de cola.

A NBR 7190 (ABNT, 1997) indica o uso de madeira de pinus para a confecção de MLC, uma vez que sua densidade média é de 0,50 g cm^{-3}. Entretanto, Zangiácomo (2003) aponta em seu trabalho que apenas o parâmetro de densidade pode não ser ideal para a escolha da madeira, uma vez que considera a permeabilidade da madeira tão importante quanto à densidade. Frihart e Hunt (2010) vão além da densidade e da porosidade, atentando para as propriedades de retratibilidade da madeira que podem afetar na qualidade da MLC em longo prazo.

Estudos com diversas espécies de madeira e adesivos conduzidos no Brasil e no mundo mostram que algumas espécies fora dos padrões de densidade utilizados regularmente aceitam a adesão com adesivos mais sofisticados, como é o caso do estudo, publicado por Carrasco et al. (2012), que utilizou a espécie de *Eucalyptus citriodora* com densidade de 0,99 g cm^{-3} para análise da qualidade de MLC para dormentes. A tendência geral é que as madeiras de reflorestamento sejam utilizadas.

6. A escolha do adesivo aplicado na colagem

Frihart e Hunt (2010) explicam que o adesivo é responsável pela adesão das lâminas de madeira, o que envolve fatores químicos e mecânicos. Por ser um material poroso, a adesão das lâminas é realizada por um mecanismo de encravamento mecânico, fazendo com que os esforços solicitados sejam transmitidos entre os componentes aderidos e aumentando a resistência e a rigidez da madeira. Os autores ressaltam que o ideal é que a junta entre o adesivo e a madeira seja tão resistente quanto a própria madeira, sendo importante que o rompimento da ligação seja na madeira.

Para Calil Neto (2011), a qualidade da MLC depende diretamente da qualidade dos adesivos utilizados, sendo importante que sua junta seja de alta resistência, não havendo, assim, deslizamentos significativos entre as lâminas quando solicitadas a empreender esforços. Szücs et al. (2008) atentam para o uso do adesivo em concordância com o uso da estrutura, tomando o ambiente que ela estará exposta como base de referência, ou seja, avaliando dados como temperatura, umidade e exposição a agentes químicos. Além disso, vale a pena observar a relação entre o custo e o benefício do adesivo, tempo de cura, cor da linha de cola e a durabilidade do mesmo.

Os primeiros adesivos utilizados foram obtidos por volta de 1906 e produzidos á base de caseína (oriundos da proteína do leite). Entretanto, este adesivo não suportava as intempéries, o que limitou demais seu uso. Com o avanço tecnológico, novos adesivos sintéticos foram criados, possibilitando a confecção de peças maiores e mais resistentes. Alguns adesivos podem suportar grandes variações de umidade e temperatura (REMADE, 2003a).

Mesmo com adesivos mais resistentes, os adesivos à base de caseína ainda são utilizados pelo baixo custo. Algumas pesquisas, como a de Gao et al. (2010), comprovam que, com alguns ajustes e novas tecnologias, é possível utilizar este adesivo para estruturas que não sofrem grandes variações de umidade.

Segundo Miotto e Dias (2009), os adesivos mais utilizados no Brasil são o fenol-resorcinol-formaldeído (FRF) e o melamina-ureia-formaldeído (MUF), tendo o segundo a vantagem de tempo inferior para a cura e linha de cola transparente após a cristalização. Gao et al. (2010) citam também os adesivos à base de polímeros de isocianato (EPI), acetato de polivinila (PVA), etileno acetato de vinila (EVA) e butadieno estireno (SBR).

Iwakiri (2005) destaca que o adesivo à base de fenol-resorcinol, introduzido comercialmente na década de 1930, possui boa resistência à umidade, sendo considerado ideal para uso externo. Este adesivo veio a substituir a caseína, uma vez que permite a utilização de MLC na confecção dos mais diversos tipos de estruturas, como pontes e coberturas (FIORELLI, 2005).

Outro adesivo de destaque é produzido a partir de poliuretano líquido (PUR). Trata-se de um adesivo isento de formaldeído, produzido a partir de solventes e que pode ser aplicado em funções estruturais. Uma grande vantagem do poliuretano líquido é o tempo de cura reduzido, que pode ser de 30 minutos de aplicação e 75 minutos de prensagem (PURBOND, 2013).

Apesar das várias opções de adesivos disponíveis no mercado, existem pesquisas para o desenvolvimento de novos adesivos, como é o caso do adesivo produzido à base de resina extraída da mamona e desenvolvido por pesquisadores da Universidade de São Paulo (USP) (AZAMBUJA, 2006).

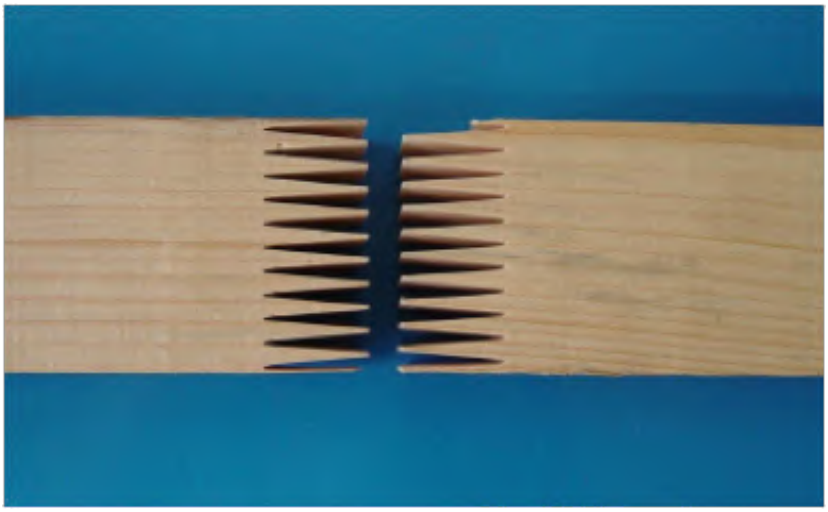
7. Confecção de elementos de madeira laminada colada

Uma vez selecionada a madeira e o adesivo, para que o processo de produção da MLC seja adequado, algumas etapas devem ser seguidas. Miotto (2009) resume este processo nas quatro seguintes etapas: secagem e classificação das lâminas, execução de emendas, colagem das lâminas e etapa de acabamentos.

Inicialmente, a madeira deve estar com um teor de umidade controlado e homogêneo, sem haver grandes gradientes de umidade na mesma peça e em peças adjacentes. Para Szücs et al. (2008), este gradiente não deve ser superior a 5%. O *American Institute of Timber Construction* (AITC), através da norma ANSI A 190.1 (2007), estipula um limite máximo de 16% de umidade na maior parte das aplicações. Estando dentro destes limites, as peças passam por classificação mecânica e visual para checar se estão em conformidade com a norma, atendendo, assim, à primeira etapa.

A segunda etapa consiste no processo e união de topo das lâminas de madeira, uma vez que o comprimento final desejado é superior ao das lâminas iniciais. A emenda mais comum é do tipo *finger joint*, também conhecida como emenda denteada ou de entalhes múltiplos, o que pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Emenda denteada.



Fonte: Miotto (2009).

Este tipo de emenda é unida com a aplicação do mesmo adesivo escolhido para a peça, que é aplicado e prensado para a obtenção da cura do adesivo. Espera-se com isso que a emenda obtenha o mínimo de 75% da resistência da madeira sem defeitos, classificando a emenda como de alto desempenho (SZÜCS et al., 2008).

Após a união de topo, as superfícies das novas lâminas devem ser aplainadas e as características mecânicas da junta devem ser tomadas. As mesmas são dispostas entre si para averiguar o distanciamento das juntas na configuração da peça, sendo aceitos os seguintes espaçamentos, de acordo com Szücs et al. (2008):

- O espaçamento das juntas nas lâminas externas deve ser superior a 20 vezes a espessura da lâmina de madeira;

- O espaçamento das juntas nas lâminas centrais deve ser superior a 12 vezes a espessura da lâmina de madeira;

- Em um comprimento de 30,5 cm, o número de emendas não deve ser superior à soma de lâminas dividido por 4.

Fiorelli (2005) recomenda ainda que, quando houver emendas na mesma lâmina, deve haver um distanciamento de 1800 mm entre as mesmas e um distanciamento de 150 mm de emendas em laminas adjacentes, entretanto, a NBR 7190 (ABNT, 1997) preconiza um espaçamento mínimo de 25 vezes a espessura da lâmina.

Tendo em vista que a configuração das lâminas de madeira aceita as exigências supracitadas, a etapa de colagem das lâminas pode ser executada após o acabamento final das peças. Para esta etapa, aplica-se o adesivo na gramatura especificada pelo fabricante, de forma a manter uma linha de cola homogênea para toda a peça, podendo a gramatura variar de acordo com cada adesivo. O mesmo acontece com o processo de prensagem e cura do adesivo. Após a cura do adesivo, é realizado o aplainamento de todas as faces da peça, retirando a cola que escorre das lâminas e qualquer irregularidade da peça (MIOTTO, 2009).

Para Calil Neto (2011), é necessário que todo o processamento e manipulação dos materiais adesivos tenham um controle de qualidade rigoroso, devendo ser constatada a sensibilidade dos resultados quanto a gradientes de umidade, temperatura, tempo e pressão. Vale ressaltar também que cada conjunto de materiais utilizados merece uma atenção diferenciada, pois a madeira é um material heterogêneo e as características dos adesivos são completamente diferentes.

8. Pesquisas recentes

Entre algumas pesquisas brasileiras, podem ser citadas as pesquisas de Zangiácomo (2003), que testou a MLC de diferentes espécies nativas com densidade de até 0,75 g/cm³, tais como Envira Branca (*Xylopia* sp.), Cambará (*Moquinia polymorpha*), Castanheira (*Bertholetia excelsa*) e Cedrinho (Erisma sp.). Além disso, o autor testou dois adesivos, um à base de resina resorcinol e o outro um adesivo poliuretânico à base de resinas extraídas da mamona. O autor concluiu que é possível a confecção de MLC com as espécies citadas, dando destaque ao Cedrinho, que obteve os melhores resultados mesmo tendo densidade inferior ao conjunto de madeiras testadas.

Issa e Kmeid (2004) estudaram as propriedades da MLC produzida com pinus com e sem reforço e sujeita a ensaios de flexão, conduzidos via ASTM D 198 (1994). Para o estudo, foram confeccionadas vigas coladas com reforço de polímeros de fibra de carbono e com reforço de placas metálicas, sendo três unidades com cada tipo de reforço e outras três sem reforço, tendo todas as vigas sido dimensionadas com 6 x 11 x 176 cm. A conclusão dos autores foi que as vigas reforçadas obtiveram, além de resistências maiores, uma ductilidade maior do que as vigas sem reforço.

Fiorelli (2005) avaliou o efeito da utilização de polímeros reforçados com fibras de vidro nas

propriedades de rigidez e de resistência de elementos estruturais da MLC. O autor testou a MLC utilizando a madeira de pinus com e sem o reforço. Concluiu-se que as fibras trouxeram resultados positivos para as propriedades da MLC, quando aplicadas na parte inferior das vigas confeccionadas, onde elas são mais tracionadas. Outra observação, realizada a partir de ensaios de delaminação, é que a adição de fibras de vidro trouxe maior confiabilidade em relação ao módulo de ruptura das peças.

Davids et al. (2005) estudaram o efeito do reforço de polímeros de fibra de vidro no desempenho de vigas de MLC, sujeitas a ensaio de flexão e verificadas através do método proposto pela ASTM D-2915 (2000). Os autores destacam que o reforço utilizado aumenta até 100% da resistência da linha de cola e reduz a variabilidade das vigas. Para este trabalho foram confeccionadas nove vigas com dimensões de 13 x 30,5 x 670 cm. Ao testar as vigas, os autores concluíram que houve melhoria dimensional e menor variação entre as vigas e que as vigas com reforço resistem significativamente mais. A madeira utilizada foi o pinus.

Azambuja (2006) testou a MLC de pinus e eucalipto com diferentes tipos de adesivos, tendo como finalidade indicar a melhor relação custo/benefício entre os mesmos. O autor utilizou os adesivos poliuretanos e à base de resina de mamona produzidos pelos pesquisadores do Instituto de Química de São Carlos (USP), que foram bastante adequados quando comparados com outros adesivos mais caros. Vale ressaltar que a utilização de adesivos alternativos pode ser uma saída para os altos custos da produção da MLC, principalmente aqueles oriundos de fontes renováveis, como é o caso da resina de mamona.

Teles (2009) avaliou a eficiência da MLC produzida com a madeira de Louro Vermelho, cuja densidade aparente média era de 0,76 g cm^{-3}, com diferentes gramaturas de adesivo. O autor constatou que a madeira pode ser empregada com bons resultados na confecção da MLC e que existe uma gramatura de cola diferente da estipulada pelo produto, que agrega colagem ideal para a espécie. O Louro Vermelho é uma espécie tropical nativa brasileira que possui grande quantidade de extrativos e pouca porosidade, logo, merece um tratamento diferenciado quanto às condições de colagem.

Miotto (2009) realizou uma extensa pesquisa com vigas mistas de MLC e concreto, formando vigas do tipo "T". O autor realizou diversos experimentos com MLC de lyptus com densidade aproximada de 0,78 g cm^{-3}, utilizando reforço de fibra de vidro. No processo de confecção destas vigas foi colocada uma camada de fibra de vidro na parte superior da última lâmina de madeira. O autor constatou que as peças confeccionadas com reforço obtiveram resultados melhores do que aquelas sem as fibras, principalmente no que diz respeito à rigidez e à resistência.

Bortoletto Junior (2009) realizou um estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas da MLC produzida com pinus (*Pinus merkusii*) e a própria madeira serrada, cuja densidade média era de 0,44 g cm^{-3}. O autor constatou que a resistência da MLC foi superior em relação à madeira serrada, de 11% a 18%, e houve um ganho de rigidez que variou de 14% a 29%. Além disso, foi possível verificar que a MLC tornou-se mais estável e homogênea.

Terezo e Szücs (2010) avaliaram o desempenho de vigas confeccionadas com a madeira de Paricá (*Schizolobium Amazonicum* Huber ex. Ducke), que possui baixa densidade e baixa resistência mecânica, mas agrega a facilidade de colagem. Os autores testaram dois tipos de adesivos, o FRF

e o API, chegando a resultados que podem classificar a MLC testada como de classe de resistência C20, tendo desempenho compatível com vigas de madeira serrada. Os dois adesivos não influenciaram significativamente nos valores de resistência e rigidez e o cisalhamento foi realizado na madeira, sendo a linha de cola mais resistente.

Cunha e Matos (2010) observaram o efeito de três adesivos, o FRF, o MUF e o PUR, utilizando a madeira de pinus (*Pinus taeda*), além de testar vigas "I" compostas por alma de painel de OSB e duas mesas de MLC. Os autores verificaram que o PUR apresentou desempenho ligeiramente melhor quando comparado com os outros e as vigas "I" confeccionadas com o PUR apresentaram desempenho estatisticamente superior àquelas com os demais adesivos.

Na pesquisa realizada por Calil Neto (2011) foram utilizadas as madeiras de pinus, teca e lyptus com tratamentos químicos diferenciados e dois tipos de adesivos, o PUR e o FRF. O autor propôs uma metodologia de ensaios para combinações espécie-adesivo-tratamento, na qual a madeira que mais se destacou com resultados positivos foi a madeira de pinus. Isto ocorreu devido a sua menor densidade e maior porosidade, além de madeiras coníferas aceitarem tratamentos químicos com maior facilidade. Observou-se que a madeira de teca utilizada pelo autor possuía lenho juvenil, uma vez que a medula estava exposta e havia ausência de cerne nas lâminas coladas.

Entre outros autores que trabalharam com os polímeros à base de fibras de vidro, podem ser citados Gentry (2011), que analisou a eficiência das fibras com ensaios de flexão e cisalhamento; Guan et al. (2005), que estudaram e validaram o efeito das fibras de vidro utilizando o método dos elementos finitos; e Lindyberg et al. (2012), que validaram o estudo com vigas com reforço destas fibras através de um modelo estatístico não linear, que utilizou noventa corpos–de-prova, sendo que a aplicação de 3% de polímeros de fibra de vidro na viga pode aumentar 100% da resistência a flexão da mesma. Novamente a madeira utilizada foi o pinus.

Segundinho et al. (2012) avaliaram a eficácia de métodos de ensaios baseados em frequências naturais de vibração a fim de compará-los com os métodos estáticos tradicionais. Em sua pesquisa utilizaram madeira serrada de pinus e eucalipto e constataram que há uma boa correlação de resultados entre o método de ensaio de flexão estática e o método de vibrações longitudinais.

A pesquisa desenvolvida por Carrasco et al. (2012) teve por objetivo avaliar o comportamento estrutural de dormentes confeccionados com a MLC de eucalipto (*Eucalyptus citriodora*), cuja densidade média era de 0,99 g cm^{-3}. Os autores realizaram ensaios de cargas estáticas e compararam os resultados com um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos, realizado no programa ANSYS. Eles concluíram que a MLC avaliada teve desempenho elevado e carga de ruptura 110% superior a valores preditos por outros pesquisadores.

Na pesquisa de De Luca e Marano (2012) foram confeccionadas vigas protendidas de MLC com duas barras de aço no sentido das fibras da madeira, utilizando a madeira de pinus. Os resultados foram bastante promissores, uma vez comparados com os resultados da MLC sem reforço, elevando as propriedades de rigidez, carga de ruptura e ductilidade em 25,9%, 48,1% e 43,8%, respectivamente. Alamsyah et al. (2008) estudaram o comportamento da MLC, produzida com Acácia (*Acacia mangium*) aderida com adesivo à base de FRF, observando os efeitos dos extrativos da madeira na colagem. Os autores concluíram que uma combinação de tempo de cura e aplicação de metanol na superfície de lâminas pode melhorar o

desempenho de colagem, reduzindo os efeitos negativos dos extrativos. Essa espécie de Acácia é conhecida pela grande oleosidade e quantidade de extrativos, que podem entrar em contato com o adesivo e interferir diretamente na colagem. A técnica do uso de metanol foi justamente para reduzir este efeito.

Wang et al. (2012) realizaram um estudo experimental sobre os possíveis tipos de fraturas que podem ocorrer na viga de MLC, podendo estas serem localizadas dentro da lamina de madeira ou na junta de cola. Os autores chegaram à conclusão de que os anéis de crescimento podem influenciar no tipo de fratura que a madeira pode sofrer, assim como o ângulo das fibras.

9. Obras em MLC

No estado do Espírito Santo, até a presente data, não existem registros de construções com MLC. No Brasil, existem algumas empresas que fabricam e comercializam peças retilíneas e curvas, principalmente confeccionadas com as madeiras de pinus e eucalipto. A seguir, serão apresentadas algumas construções que tem a MLC como material estrutural principal.

a) Casa Folha em Angra dos Reis, RJ

A Casa Folha foi construída na orla de Angra dos Reis, RJ, conforme Figura 3. O projeto é do engenheiro Fernando Fontenelle, da empresa Abilitá Projetos Estruturais. A estrutura foi confeccionada com diversos materiais, tendo os arcos da cobertura sido confeccionados com MLC curva de eucalipto. O projeto foi premiado com o prêmio Talento Engenharia Estrutural 2013 na categoria pequeno porte.

Figura 3 - Casa Folha em Angra dos Reis, RJ.

Fonte: ABENCE (2015).

b) Cúpula de Ginásio em Lages, SC

O ginásio poliesportivo Jones Minosso, da Prefeitura Municipal de Lages, SC, conforme Figura 4, foi inaugurado em outubro de 2004 e é coberto por uma cúpula em madeira laminada colada

(MLC) com o maior vão da América do Sul. Os 79 m de diâmetro da cobertura abrangem uma área de, aproximadamente, 5000 m^2.

O ginásio comporta cerca de 3500 pessoas na arquibancada e apresenta uma altura de quase 19 m. O sistema estrutural empregado foi o Varax. O projeto da cúpula foi realizado pela empresa Engetrel Ltda de São Carlos, SP, e executado pela empresa Battistella Indústria e Comércio Ltda de Curitiba, PR. A malha do sistema estrutural foi executada a partir de trechos pré-fabricados de vigas em MLC com seção transversal de 11,5 cm x 36,4 cm, com comprimento em torno de 6 m, que constituem a modulação triangular intertravadas por terças, e MLC, com seção transversal de 5 cm x 25 cm, que por sua vez foram travados, superiormente, por caibros de seção de 5 cm x 7,5 cm.

Figura 4 - Ginásio poliesportivo Jones Minosso pronto e imagens de diferentes etapas de sua construção, Lages, SC.

Fonte: Ferreira (2012).

c) Shopping Iguatemi em Fortaleza, CE

O Shopping Iguatemi de Fortaleza, CE, é a maior estrutura de madeira laminada colada do Brasil e foi executada pela Carpinteria Estruturas de Madeira e a Moretti Interholz, conforme Figura 5. Neste projeto existem peças de seção de 20 x 140 cm com 20 m de comprimento e curvada nas duas direções.

Figura 5 - Estruturas de madeira laminada colada no Shopping Iguatemi Fortaleza, CE.

Fonte: Carpinteria (2015).

As peças de MLC foram produzidas na Itália pela Moretti Interholz porque a indústria de MLC no Brasil ainda está despreparada para poder fornecer a quantidade de peças necessárias para esta obra no tempo previsto. Foram fabricados 1.200 m^3 dessa estrutura na Itália em apenas quatro meses. Se as peças fossem produzidas aqui no Brasil, levariam pelo menos 12 meses para serem concluídas, tempo inviável para a obra.

A montagem da estrutura é feita com chapas de aço galvanizado nas ligações das peças de madeira, de espessura variando entre 3/16" e 1/4", e utilizando pinos metálicos e parafusos passantes com porca e arruela. Essas chapas foram projetadas em computador e cortadas e furadas a laser para serem perfeitamente precisas. A estrutura foi toda projetada para ter peças de, no máximo, 12 m de comprimento. Assim, caberiam em contêineres fechados para serem trazidas de navio do porto de Gênova a Fortaleza.

10. Considerações Finais

Partindo-se das reflexões que foram apresentadasneste capítulo, pode-se verificar que o assunto é de suma importância para a construção civil. A MLC poderia ser padronizada, fabricada em série e comercializada em maiores proporções. Por isso, faz-se necessário que estudos comparativos com as principais madeiras utilizadas com fins estruturais sejam realizados, principalmente quando a MLC for produzida com madeiras oriundas de reflorestamento, baixo custo e melhor configuração para sua utilização.

Observou-se também que a MLC é fabricada com destinação específica, feita sob projeto, o

que pode elevar bastante os custos finais. Vale ressaltar que a produção em série pode reduzir os custos, além de oferecer a possibilidade de suprimento da madeira serrada, que é um recurso cada vez mais escasso no mercado.

A madeira mais indicada e mais utilizada nos trabalhos pesquisados foi o pinus. No entanto, o eucalipto também apareceu em bastantes pesquisas. As duas madeiras são oriundas de fontes renováveis e disponíveis, com abundância no mercado brasileiro. A madeira de pinus, por sua vez, é mais comum de ser encontrada em tábuas, sendo pouco utilizada para fins estruturais no Brasil, enquanto o eucalipto é utilizado para as mais diversas situações.

De forma geral, as pesquisas se dividem em três partes. A primeira parte tem como objetivo a melhoria do desempenho da MLC, efetuando estudos com reforços nas peças. A segunda parte estuda a relação custo/benefício com a finalidade de viabilizar o produto. Por fim, os demais estudos apresentam o uso de diferentes madeiras e adesivos em tratamentos ainda não pesquisados.

A partir do trabalho de Lindyberg et al. (2012) foi possível destacar um dos maiores centros de referência de estudos em MLC no mundo, localizado na Universidade de Maine, em Orono, EUA. Nos EUA há também a Associação de Engenharia da Madeira (APA), que promove estudos diversos em madeiras e, consequentemente, em MLC. Além disso, pode-se perceber que cientistas do mundo inteiro mostram interesse na área, principalmente os europeus e asiáticos. No Brasil, a Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) aparece com grande destaque internacional, possuindo também pesquisas importantes na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

USO DE ESTRUTURAS MISTAS DE MADEIRA E CONCRETO

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho, José Antônio Matthiesen, Antônio Alves Dias, Lorenzo Lube dos Santos

1. Introdução

O Brasil, um país de dimensões continentais, possui no seu território uma enorme quantidade de rios de pequeno e grande porte que necessitam da construção ou recuperação de pontes. Para atender a essa demanda, pode-se empregar materiais alternativos e, como uma possível escolha, indica-se uma composição mista dos materiais madeira e concreto. No entanto, isto só poderá ser utilizado em larga escala no nosso país quando existir uma normalização técnica direcionada para a aplicação das estruturas mistas de madeira e concreto, indicando a sua aplicação estrutural. No Brasil, os estudos atuais mostram a sua viabilidade econômica, o seu potencial estrutural e também a sua imensa durabilidade, quando comparada com as estruturas que utilizam outros materiais.

A utilização de estruturas mistas de madeira e concreto na construção de pontes certamente solucionará problemas relativos à sua durabilidade, principalmente na comparação destas estruturas com aquelas que usam somente madeira na sua composição. Desta maneira, será bem mais econômico construir pontes compostas de madeira e concreto do que pontes somente de concreto, aço ou mistas de aço e concreto. O uso desse material vai possibilitar também a recuperação das pontes já existentes. Entretanto, a viabilidade do uso desse material só ocorrerá quando for possível quantificar a eficiência da ligação entre a madeira e o concreto, o que pode ser feito por meio de vários tipos de conectores que são identificados, na sua maioria, como pinos metálicos (pregos, parafusos e chapas metálicas).

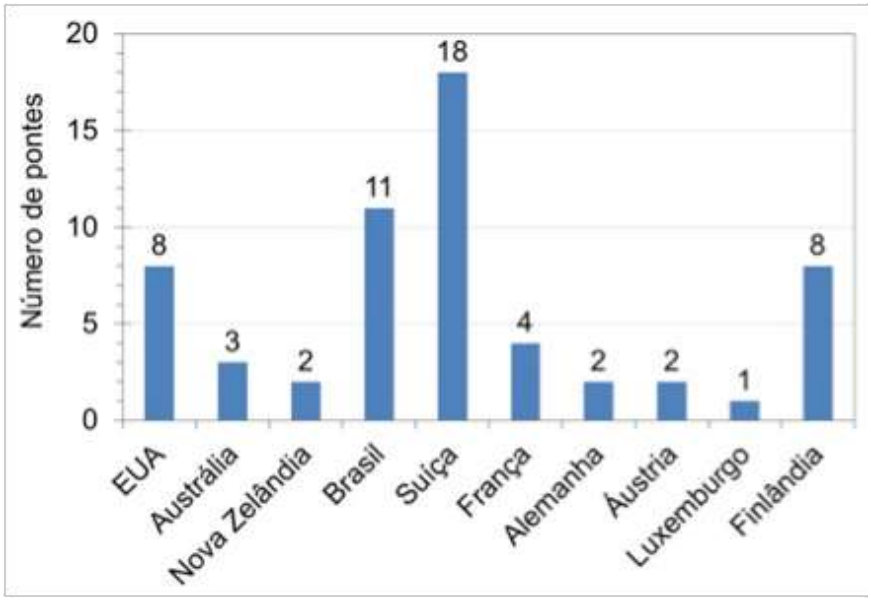
2. Panorama da utilização das estruturas mistas de madeira e concreto

As estruturas mistas de madeira e concreto, segundo Ceccotti (1995), atingem uma eficiência duas vezes maior que uma estrutura construída somente de madeira e sua rigidez é melhorada de três a quatro vezes. Os autores McCullough (1943), Pincus (1969) e Ahmadi e Saka (1993) fizeram comparações entre sistemas sem conexão e com conexão e constataram que ocorreu um aumento em torno de duas vezes para a resistência última. De acordo com Ceccotti (1995), as estruturas mistas de madeira e concreto são executadas de maneira rápida devido ao menor número de escoras e fôrmas, pois as vigas de madeira contribuem para o cimbramento desse tipo de estrutura. No que diz respeito à proteção das estruturas que ficam ao ar livre, como no caso de pontes e passarelas, é possível que essa proteção seja feita por meio de pingadeiras e de prolongadores.

A maioria dos casos das construções mistas de madeira e concreto realizadas no mundo foi promovida por autoridades públicas e programas de pesquisa acadêmicos. Considerando-se a relação custo/benefício, pode-se dizer que algumas das soluções apresentadas, tais como as existentes

no Brasil e na Austrália, demonstram certa competitividade, enquanto aquelas existentes na Europa parecem ter um custo semelhante àquelas tradicionalmente empregadas na engenharia de pontes, sendo escolhidas mais por razões estéticas, conforme aponta Rodrigues et al. (2010). Na Figura 1 está representada a distribuição mundial de 59 pontes de madeira e concreto.

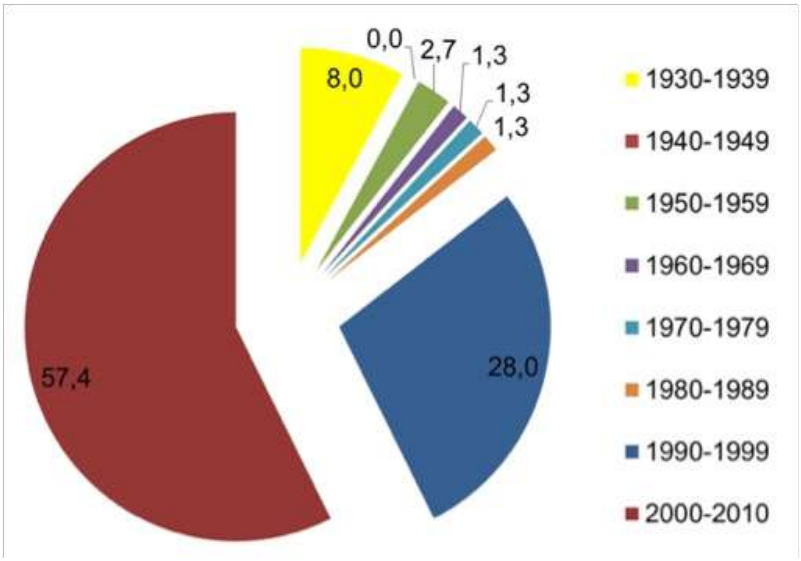
Figura 1 - Dados das construções de madeira e concreto existentes no mundo.



Fonte: Rodrigues et al. (2010).

Na Figura 2 é apresentada a porcentagem das construções de pontes de madeira e concreto nos últimos oitenta anos. Observa-se que mais de 85% foram construídas nos últimos vinte anos e mais de 50% nos últimos dez anos. Segundo Rodrigues et al. (2013), este recente aumento das construções de pontes em madeira e concreto ocorreu devido ao custo competitivo, à forma ambientalmente amigável e a recentes inovações tecnológicas que possibilitaram sua aplicação.

Figura 2 - Dados das construções de madeira e concreto no mundo.



Fonte: Rodrigues et al. (2013).

3. Estruturas mistas de madeira e concreto pelo mundo

Ao se pesquisar sobre as obras construídas pelo mundo, pode-se verificar que o primeiro relato sobre o uso de estrutura mista de madeira e concreto ocorreu nos Estados Unidosnos anos 1930, conforme descreveu McCullough (1943). A técnica construtiva de estrutura mista em madeira e concreto foi adotada e aplicada em pontes nos estados do Oregon e Delaware. O sistema utilizado nesses estados buscava, basicamente, atender a vãos curtos de forma a estabelecer um custo de execução intermediário entre viadutos em concreto armado e cavaletes em madeira não tratada.

No estudo realizado por McCullough (1943)verificou-se a existência de diversas formas de conexão para a interação entre o concreto e a madeira, tendo sido testados os seguintes sistemas de ligação para a transferência das forças tangenciais: pinos, entalhes, tubos metálicos, chapas de aço e combinações de entalhes e pinos. O estudo compreendeu também a determinação da resistência última e de flechas, dos efeitos de cargas repetidas, dos efeitos de mudança de temperatura e da posição do eixo neutro, além do desenvolvimento de teoria para o projeto de estruturas mistas.

A Figura 3 apresenta uma das três pontes estaduais construídas sobre o rio Silver Lake. Esta é uma das três pontes construídas entre 1936 e 1938 pelo departamento de rodovias do estado de Delaware como um teste do compósito de estruturas mistas de madeira e concreto.

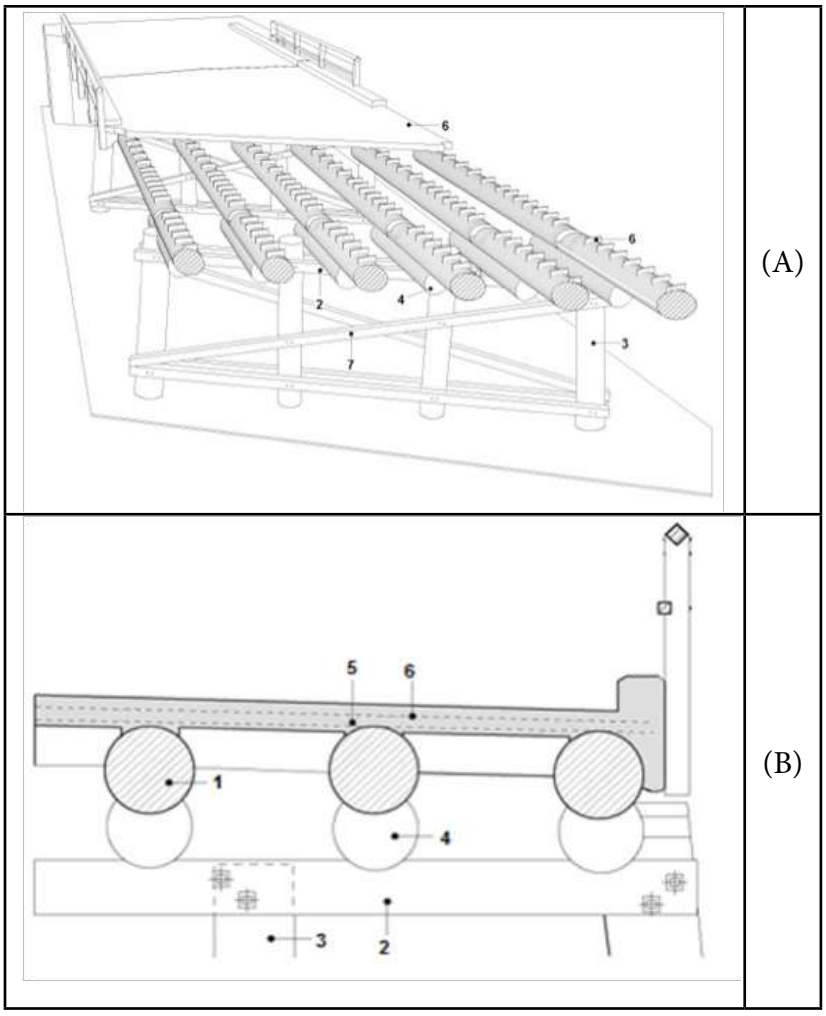
Figura 3 - Ponte de madeira e concreto, construída no estado de Delaware nos EUA, concluída em 1936 e substituída em 1995.

Fonte: DEIDOT (2010).

A primeira grande estrutura de madeira e concreto construída na Austrália, em 1955, foi a ponte *Maria River* na rodovia *Pacific Highway*, a 7 km ao sul de Kempsey, em New South Wales (Figuras 4 e 5). Nessa estrutura, placas de aço atuam como conectores de cisalhamento nos três vãos de 10 m das vigas roliças de madeira natural e da laje de concreto. O piso de concreto foi

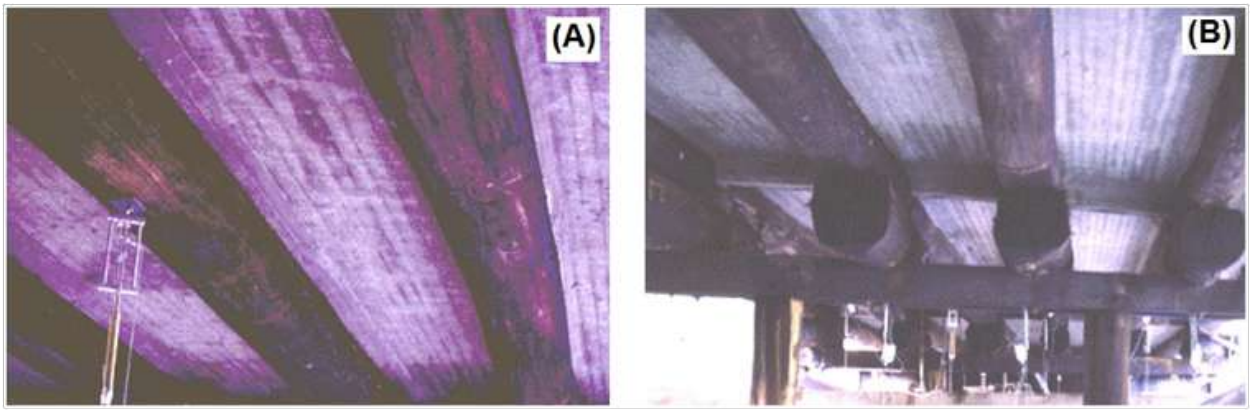
conectado a cada viga de madeira por uma placa de aço, no caso os conectores de cisalhamento. Tais conectores foram embutidos 38 mm dentro da madeira e, aproximadamente, 90mm dentro do concreto. Os conectores foram concentrados próximos do fim de cada viga de madeira, onde estão as maiores forças de cisalhamento. Nas extremidades, eles são espaçados em 250 mm, enquanto que na região central eles são espaçados em 500 mm. A inclusão das placas de aço como conector de cisalhamento aumentou significativamente a rigidez e a vida útil das pontes, quando comparadas com pontes similares de madeira. Experimentalmente, as pontes tiveram performances bem melhores do que aquelas que foram conservadas na *Pacific Highway*. Esse sucesso permitiu que uma nova geração de estruturas compostas de pontes de madeira e concreto fosse construída em outras localidades da Austrália.

Figura 4 - Projeto da ponte de madeira e concreto (A), construída ao sul de Kempsey, New South Wales, e seção transversal (B). Podem ser visualizados os seguintes itens: 1) viga roliça natural de 480 mm de diâmetro; 2) transversina (300 x 150 mm); 3) pilar roliço natural; 4) consolo de 480 mm de diâmetro; 5) conectores de placa de aço (250 x 125 x 25 mm); 6) laje de concreto; e 7) escora de 250 x 125 mm.



Fonte: TBA (2009).

Figura 5 - Vigas (A) e consolos (B) de madeira junto com a laje de concreto.



Fonte: TBA (2009).

Na Suécia, na década de 70, começou-se a construir, em escala industrial, estruturas mistas de madeira e concreto, assim como na Noruega e Finlândia (Figura 6) (BJORKMAN, 2002).

Figura 6 - Ponte de madeira e concreto na Finlândia em Tirva, Valkeala.

Fonte: FINNRA (1999).

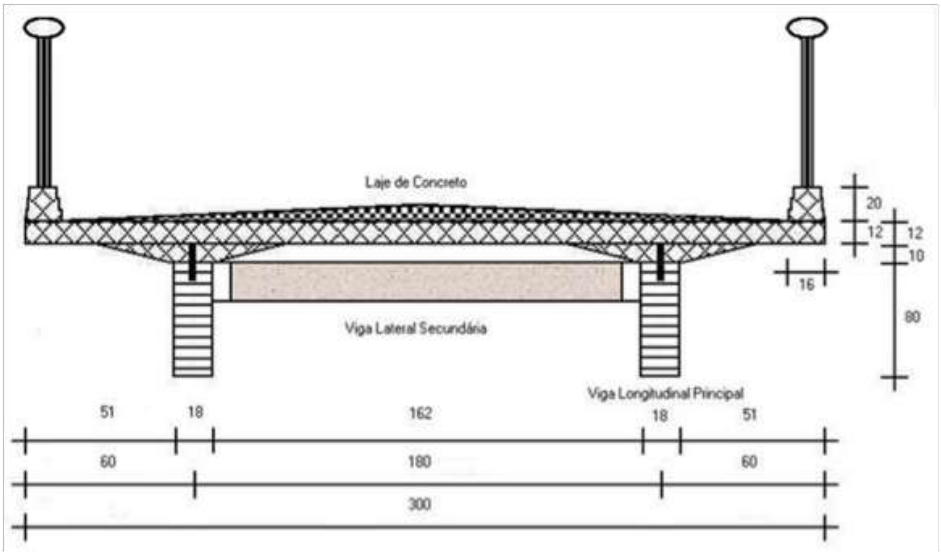
Segundo Yttrup e Nolan (1996) e Yttrup (1996), depois da construção de várias pontes experimentais, passou-se a fazer a aplicação dessa tecnologia na recuperação das estruturas de pontes de madeira e estas vêm sendo transformadas em estruturas mistas de madeira e concreto. A Figura 7 apresenta o sistema de vigas de madeira roliça com piso de concreto como uma alternativa viável para recuperação de pontes de madeira.

Figura 7 - Ponte de madeira e concreto em construção na Forestry, Tasmânia, Austrália.

Fonte: Yttrup e Nolan (1996).

Os pesquisadores Stojic e Cvetkovic (2001) fizeram um exemplo de aplicação de projeto dos elementos estruturais de uma passarela de acordo com os estados limites últimos e estados limites de utilização (Figura 8), em que foi dada uma descrição da estrutura, das propriedades geométricas dos elementos e do cálculo nominal dos carregamentos realizados, de acordo com o Eurocode (1993). O vão da passarela era igual a 12 m e a distância entre as duas vigas principais de madeira e concreto de 1,8 m. A seção transversal abrangia diferentes materiais, tais como pino de aço com cabeças conectadas ao longo da interface das vigas com espaçamentos calculados e laje de concreto com altura horizontal bem definida para que mantivesse a sua rigidez, tendo sempre o cuidado de manter as vigas principais compostas em certos pontos do comprimento, onde estão conectadas. Estas conexões foram realizadas por cavilhas e chapas de aço. O sistema estático da estrutura é suportado por duas vigas simplesmente apoiadas. O suporte dos apoios é feito por chapas de aço para prover o trabalho de uma estrutura de acordo com as normas de análise estrutural.

Figura 8 - Seção transversal da passarela (medidas em cm).



Fonte: Stojic e Cvetkovic (2001).

Esta passarela, segundo Stojic e Cvetkovic (2001), teve uma revisão característica que foi baseada na investigação em campo das estruturas compostas de madeira e concreto durante os últimos anos do século XX. Os novos conceitos europeus foram aplicados nos cálculos dos elementos estruturais. Para a combinação da madeira com o concreto em um material composto, foram usadas as melhores propriedades de cada um dos materiais (a elevada resistência à tração da madeira e a elevada resistência à compressão do concreto). Dependendo das diferentes condições de construção, podem ser encontradas mais razões para aplicação desse tipo de estrutura em comparação com o concreto ou aço.

As vantagens das estruturas mistas de madeira e concreto podem ser fundadas em diferentes fatos, tais como a capacidade de suportar carregamentos poder ser dobrada e as condições de serviços ficarem melhor resolvidas contra insolação, resistência ao fogo e efeitos de vibrações e durarem mais ao longo do tempo. Além disso, pode ser reduzida, diretamente nas construções, o peso próprio da estrutura em relação ao concreto e também em relação a algumas estruturas de aço que podem ser usadas para o mesmo tipo de construção.

No norte da Europa as construções de pontes mistas de madeira e concreto são inferiores a vinte anos. Um bom estudo de caso é o *The Nordic Timber Bridge Project*, cujo objetivo foi construir mais pontes de madeira, ao invés de aço, e pontes de concreto em países europeus nórdicos. Este programa de cooperação entre Suécia, Finlândia, Dinamarca e Noruega era triplo, pois visava (i) promover programas de pesquisa especializados; (ii) difundir informações técnicas sobre pontes de madeira; e (iii) informar os agentes relevantes, tais como arquitetos, engenheiros e políticos, sobre as potencialidades estéticas e ambientais e os baixos custos de construção e vida útil de pontes de madeira (KLEPPE; AASHEIM, 2010). Este programa serviu como base para a construção de um grande número de pontes de madeira nesses países. Um dos exemplos mais significativos no mundo de pontes mistas de madeira e concreto é a Ponte Vihantasalmi, construída na Finlândia em 1999 (Figura 9).

Figura 9 - Ponte mista de madeira e concreto construída na Finlândia.

Fonte: Nordic Timber Council (2002).

Na Europa Central, as pontes mistas de madeira e concreto foram também introduzidas na década de 1990. A Suíça foi pioneira nesta solução estrutural, tendo a primeira ponte construída em 1991 (MEIERHOFER, 2010). Várias outras pontes foram construídas desde então, incluindo pontes em arco, como a Ponte Ragoztobel (Figura 10).

Figura 10 - Ponte mista de madeira e concreto construída na Suíça.

Fonte: STB (2010).

Seguindo o exemplo da Suíça, outros países da Europa Central, como Áustria, França, Alemanha e Luxemburgo, adotaram o uso de pontes mistas de madeira e concreto. A Figura 11 apresenta a ponte Sanne, a primeira a ser construída na França (FLACH; FRENETTE, 2004), e a Figura 12 apresenta a ponte *Birkberg*, construída na Alemanha (RAUTENSTRAUCH et al., 2010).

Figura 11 - Ponte *Sanne* de madeira e concreto construída na França.

Fonte: Flach e Frenette (2004).

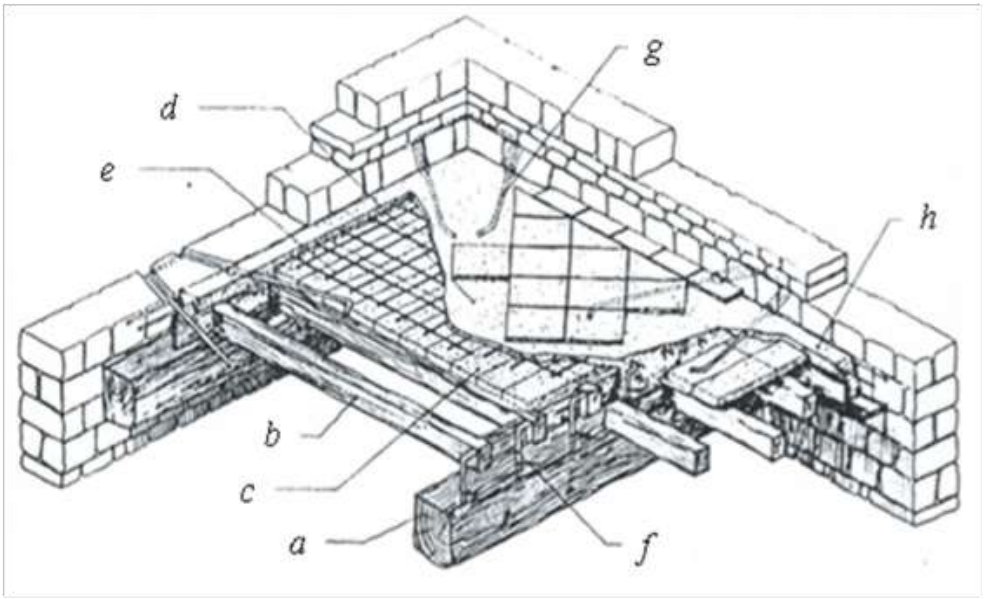
Figura 12 - Ponte *Birkbergde* de madeira e concreto construída na Alemanha.

Fonte: Rautenstrauch et al. (2010).

Ao contrário do que ocorreu na Europa Nórdica, na Europa Central a escolha deste material compósito misto não resultou de qualquer projeto de pesquisa promovido por autoridades públicas e a principal razão para a adoção da madeira, na construção dessas pontes, parece ter sido o respeito pelo ambiente natural (STB, 2010).

Estruturas mistas de madeira e concreto também podem ser utilizadas sem forma de vigas ou painéis e se adequam a diversas modalidades de construções, tais como residências, estabelecimentos comerciais e escolas (Figura 13) (CECCOTTI, 1995).

Figura 13 - Aplicação de estrutura mista em madeira e concreto. Sendo: (a) viga principal; (b) viga secundária; (c) blocos; (d) laje de concreto; (e) malha de aço; (f) conectores de aço colados na madeira; (g) estribos; e (h) armadura de reforço.



Fonte: Ceccotti (1995).

4. Estruturas mistas de madeira e concreto no Brasil

No Brasil foram construídas milhares de pontes secundárias de madeira em estradas vicinais durante o século passado, o que não requereu habilidades e nem conhecimentos técnicos avançados. Até o final dos anos 1900, a maioria dessas pontes de madeira foi altamente degradada, indicando um quadro muito negativo da madeira como material estrutural a ser utilizado em pontes (SORIANO; MASCIA, 2009). Segundo Calil (2010), a primeira ponte mista de madeira e concreto foi construída em 1974, no Estado de São Paulo, e durou até o início dos 2000.

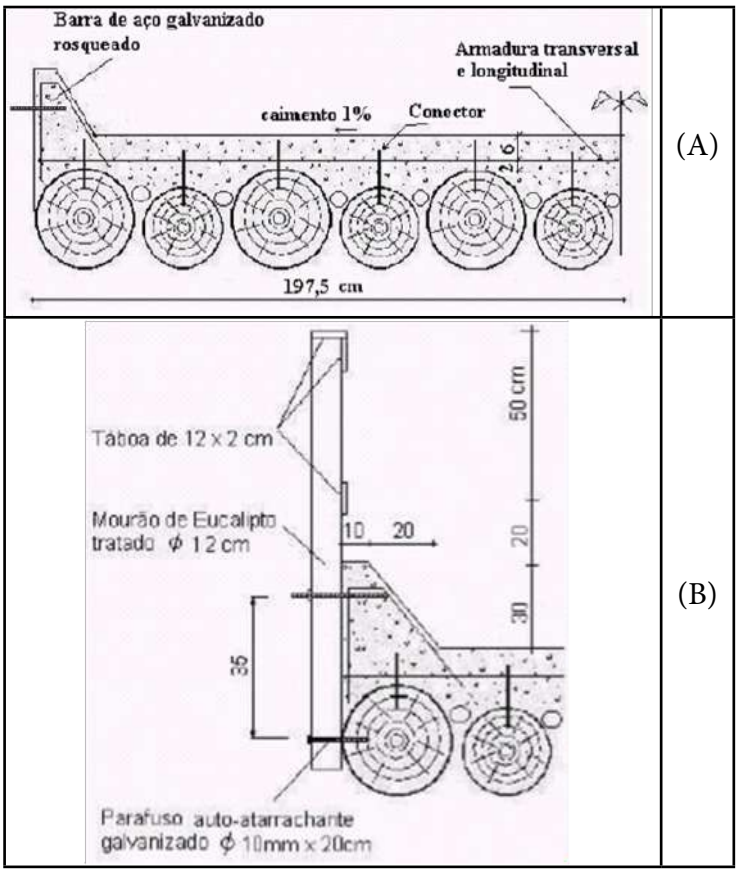
Talvez incentivada pelo sucesso desta experiência, a Universidade de São Paulo promoveu, no início do século XXI, um programa de investigação sobre pontes de madeira denominado *Programa Emergencial das Pontes de Madeira para o Estado de São Paulo* (CALIL, 2008). O principal objetivo deste programa foi construir pontes com um custo competitivo e uma durabilidade que pode ser comparada de forma positiva com a de outros materiais estruturais.

Durante o desenvolvimento do projeto, ocorreu o envolvimento de vários trabalhos de mestrado, doutorado e pós-doutorado, o que gerou a construção de oito novas pontes mistas de madeira e concreto para subsidiar vias vicinais, todas elas concebidas pelo Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeira da Universidade de São Paulo.

No trabalho de Pigozzo (2004) estudou-se os conectores em "X" formados por barras de aço ancoradas na madeira com resinas epóxis como elementos de ligação entre a laje de concreto e as vigas de madeira. O objetivo foi fornecer subsídios para a literatura, auxiliando, assim, os projetos e o dimensionamento desses tabuleiros mistos na construção de protótipos reais na Classe 45, segundo a NBR 7188 (1985); e também analisar o desempenho desse protótipo por meio de provas de carga, avaliando, inicialmente, o tabuleiro de madeira e, em seguida, analisando o comportamento da estrutura mista. Nesse estudo foi projetado e construído um tabuleiro misto denominado Ponte Florestinha (Figura 14), localizada na estrada municipal que liga o município de Piracicaba a Anhambi, SP.

Para a construção da Ponte Florestinha foram utilizadas 12 vigas naturais de *Eucalyptus citriodora*, tratadas com CCA, com comprimento de 7 m. Essas vigas foram intercaladas às bases para obter espessuras médias constantes e diâmetro médio no centro do vão de 28,5 cm. Em todas as seções transversais aplicou-se concreto armado com resistência característica à compressão igual a 15 MPa, com moldagem *in loco* e com acomodação perfeita sobre as irregularidades naturais das superfícies das vigas de madeira. A laje de concreto apresentou uma espessura mínima final de 8 cm na crista das peças roliças e uma espessura média de 12 cm.

Figura 14 - Seção transversal adotada para a Ponte Florestina, destacando-se o nivelamento das vigas pela parte inferior (A) e o detalhe do guarda rodas e do guarda corpo (B).



Fonte: Pigozzo (2004).

Para o posicionamento definitivo das vigas, elas foram travadas transversalmente no centro do tabuleiro, utilizando cabos de aço e formando tramas duplas alternadas (Figura 15). O comportamento dos cabos de aço não é suficientemente eficiente quanto às distribuições de cargas verticais entre as vigas, mas é eficiente para impedir o afastamento relativo entre as vigas na horizontal. Essas tramas permitiram que um veículo trafegasse sobre as vigas de madeira sem dificuldades ou riscos de segurança durante a prova de carga, portanto, podem ser consideradas como elementos secundários, sem função estrutural, após a execução da laje de concreto.

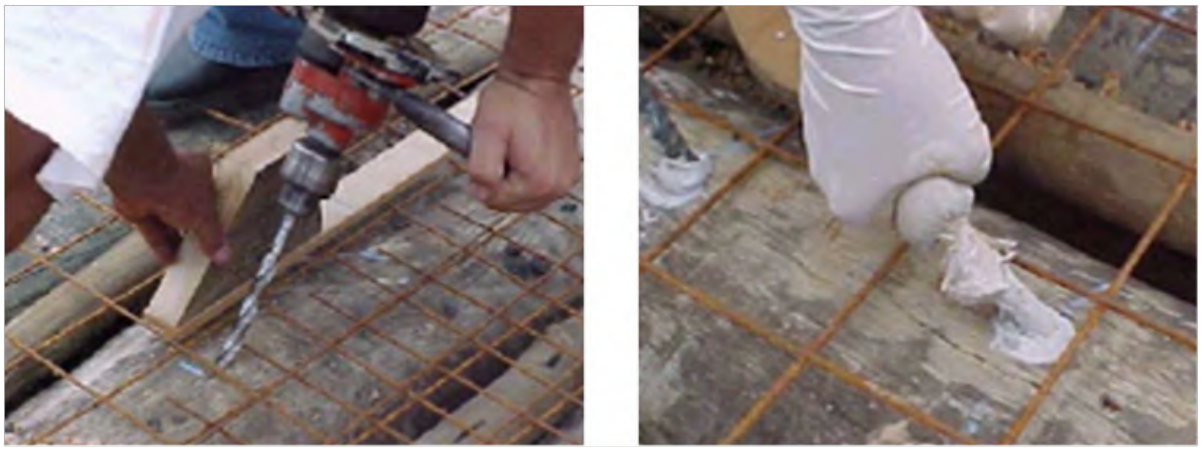
Figura 15 - Instalação das vigas de madeira na Ponte Florestina.

Fonte: Pigozzo (2004).

Os conectores utilizados na Ponte Florentina foram de aço de alta resistência (CA50), que possui resistência característica ao escoamento igual a 500 MPa e possui superfície filetada. Estes conectores foram colados com resina epóxi fluida em furos com diâmetro maior, mantendo a espessura de 1,25 mm para a linha de cola.

Entre os vários sistemas de injeção possíveis, utilizou-se um que fosse descartável e de baixo custo, evitando processos de limpeza com solventes fortes. A resina foi injetada a partir da extremidade interna do furo e, quando aflorou, obteve-se o volume exato para a ancoragem da barra (Figura 16). As barras foram introduzidas com pequenas rotações, permitindo a saída do ar contido e evitando a formação de bolhas na linha de cola.

Figura 16 - Instalação dos conectores e injeção da resina epóxi.



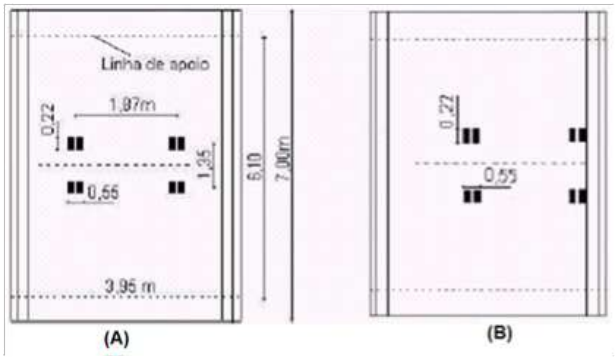
Fonte: Pigozzo (2004).

Os resultados obtidos a partir do ensaio de provas de carga, conforme as Figuras 17 a 19, mostram que o tabuleiro misto se comporta como laje ortotrópica e as vigas de madeira formam um sistema estrutural estaticamente redundante, permitindo, assim, a redistribuição de esforços por meio da laje de concreto quando um carregamento se posiciona sobre uma viga mais flexível.

Figura 17 - Provas de carga nas vigas e na ponte concluída.

Fonte: Pigozzo (2004).

Figura 18 - Posicionamento do trem-tipo sobre o tabuleiro, sendo A, o carregamento 1 centrado; e B, carregamento 2 na lateral.



Fonte: Pigozzo (2004).

Figura 19 - Terceira prova de carga na ponte já construída, sendo A, o carregamento 1; e B, carregamento 2.

Fonte: Pigozzo (2004).

Segundo Pigozzo (2004), as vigas de madeira entrelaçadas com os cabos de aço apresentaram deslocamentos verticais máximos da ordem de 4,5 cm, sob a região de aplicação das cargas, para o carregamento 1, enquanto que o tabuleiro misto apresentou deslocamentos, na mesma região, da ordem de 0,5 cm, mostrando a alta rigidez do sistema misto.

A partir dos resultados experimentais, constatou-se a possibilidade de se aperfeiçoar a altura do tabuleiro, levando as tensões internas e os deslocamentos mais próximos dos estados limites. O custo desse tabuleiro misto, executado com recursos e mão de obra da Prefeitura Municipal de Piracicaba, correspondeu a US$ 100,00 m^{-2} (R$300,00 m^{-2}) por metro quadrado. O baixo custo, a facilidade de execução e os interesses sociais evidenciam o sistema misto para pequenas pontes em estradas vicinais.

A ponte mista de madeira e concreto denominada Caminho do Mar, conforme as Figuras 20 a 25, localizada na rodovia SP 148, no município de Cubatão, SP, é, sem dúvida, aquela que melhor exemplifica esse tipo de construção no Brasil. Foi construída a partir do *Programa Emergencial das Pontes de Madeira para o Estado de São Paulo* (CALIL et al., 2006). Possui 24 m de comprimento, 7,2 m de largura, duas faixas de tráfego e foi projetada para suportar a classe de carregamento TB 30, segundo a NBR 7188 (1985), sendo utilizadas 16 longarinas roliças de Eucalyptus citriodora, tratadas com CCA (diâmetro médio de 33 cm). Ela tornou-se emblemática por apresentar geometria esconsa e utilizar fundações com pilares de madeira roliça engastados em bloco de concreto armado.

Figura 20 - Ponte mista de madeira e concreto Caminho do Mar, SP, Brasil.

Fonte: Calil et al. (2006).

Figura 21 - Prova de carga na lateral esquerda da ponte Caminho do Mar, SP, Brasil.

Fonte: Calil et al. (2006).

Figura 22 - Prova de carga na lateral direita da ponte Caminho do Mar, SP, Brasil.

Fonte: Calil et al. (2006).

Figura 23 - Vista lateral da ponte Caminho do Mar, SP, Brasil.

Fonte: Calil et al. (2006).

Figura 24 - Vista inferior do tabuleiro da ponte Caminho do Mar, SP, Brasil.

Fonte: Calil et al. (2006).

Figura 25 - Vista superior do tabuleiro com os conectores metálicos da ponte Caminho do Mar, SP, Brasil.

Fonte: Calil et al. (2006).

Além da aplicação das estruturas mistas de madeira e concreto em pontes, há possibilidades de aplicação também em restaurações de piso (SORIANO, 2001). Foi possível perceber que, além de uma excelente solução estrutural para a recuperação de pisos, as estruturas mistas de madeira e concreto apresentam um bom aspecto visual (Figura 26).

Figura 26 - Laje de piso em micro concreto e madeira.

Fonte: Soriano (2001).

5. Considerações Finais

No Brasil, existe a necessidade da construção de novas pontes e restauração de outras existentes no interior do país para o escoamento da produção agroindustrial. Não há dúvidas de que o estudo do material madeira e concreto e, consequentemente, a sua aplicação trarão uma nova perspectiva na construção de pontes mistas que possibilitem o desenvolvimento econômico dessas regiões.

A grande rapidez de execução *in loco*, o baixo custo, a não utilização de mão de obra e de equipamentos muitos especializados e a grande durabilidade são fatores essenciais para o desenvolvimento desses sistemas estruturais.

As estruturas mistas de madeira e concreto vêm sendo utilizadas há algum tempo nos países mais desenvolvidos e, apesar de recentemente a utilização de madeira laminada colada (MLC) estar ganhando notoriedade por apresentar uma conotação mais estética em todo o mundo, a utilização de peças brutas de madeira ainda possuem seu lugar.

Para um tipo de material que começou sendo utilizado para se fazer reformas em estruturas que utilizavam somente madeira, este material conseguiu se destacar como um material estrutural na construção civil, principalmente porque atendia aos esforços estruturais ao qual era submetido. Apesar do largo emprego desse material, ele ainda não está normalizado e isso se deve, principalmente, ao fato de existirem muitas dúvidas a respeito da garantia de uso da ligação entre os dois materiais, a madeira e o concreto.

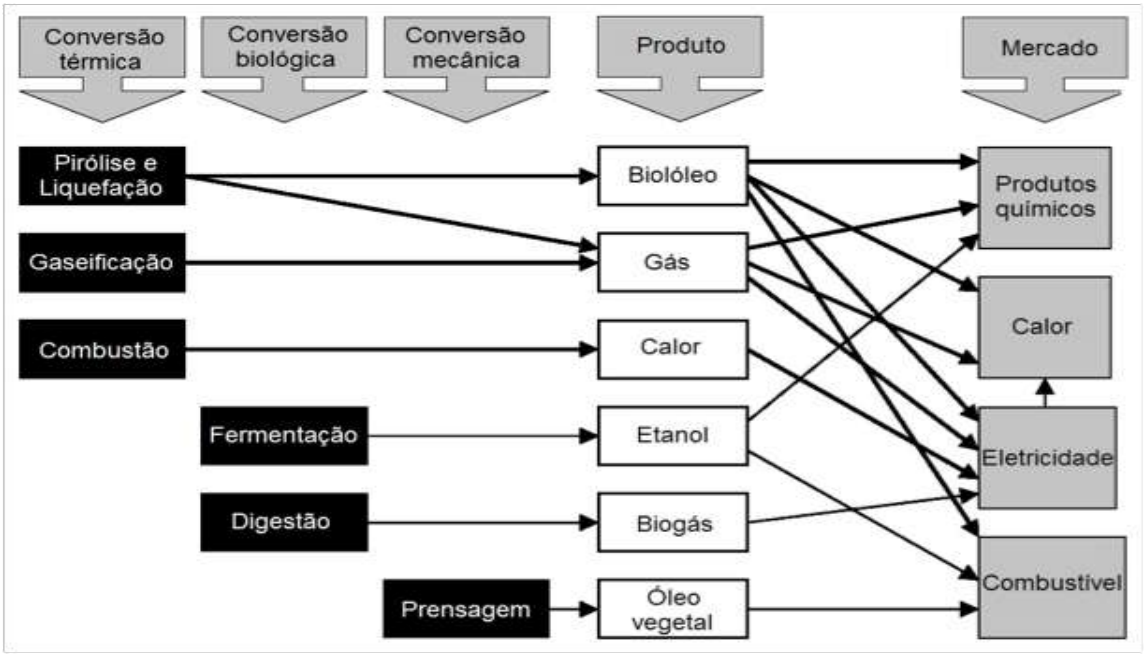
COMBUSTÃO E CARBONIZAÇÃO DA BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

Paulo Fernando Trugilho, Thiago de Paula Protásio, Marina Donária Chaves Arantes,
Isabel Cristina Nogueira Alves de Melo, Claudinéia Olímpia de Assis

1. Contextualização

A madeira ou a biomassa lignocelulósica podem ser utilizadas tanto na forma direta como por meio da sua conversão em outros produtos de interesse (Figura 1). Espera-se que a biomassa venha a se tornar um dos principais tipos de matéria-prima no futuro, porque além da sua disponibilidade e custos moderados, possui características energéticas satisfatórias e a possibilidade de ser convertida em vários biocombustíveis, produtos químicos e biomateriais.

Figura 1 - Rotas de conversão da biomassa em diversos combustíveis e produtos.



Fonte: Bridgwater (2006).

A forma mais simples de uso da madeira, e não menos importante, é a sua combustão direta para a cocção de alimentos ou para a geração de calor, utilizada, por exemplo, na secagem de grãos ou para a produção de vapor em caldeiras e, consequentemente, para a geração de bioeletricidade.

Em países da África e da Ásia e em algumas regiões do Brasil, onde existe uma maior dependência dos recursos naturais, a combustão direta se destaca e é considerada o principal processo termoquímico utilizado nas residências para aquecimento e cocção.

No Brasil, as formas de conversão da biomassa mais utilizadas são a carbonização ou pirólise para produção de carvão vegetal de uso siderúrgico e a combustão completa. No entanto, pesquisas estão sendo desenvolvidas visando à fermentação dos açúcares presentes na biomassa e, consequente-

mente, na produção de etanol celulósico ou etanol de segunda geração (SANTOS et al., 2013). Dessa forma, por meio de um processo de conversão bioquímico da biomassa, é possível obter um combustível líquido importante para a matriz energética brasileira e que poderá resultar no melhor aproveitamento dos resíduos gerados pelo processamento industrial da madeira, bem como pela atividade agroindustrial.

Outro processo de conversão biológica ou bioquímica da biomassa é a digestão anaeróbica para a produção de biogás, que consiste em um combustível gasoso rico em metano (CH_4). O biogás obtido por meio dessa rota pode ser utilizado na geração de bioeletricidade e energia térmica (Figura 1), bem como em motores de combustão interna. No Brasil, já existe um projeto desenvolvido pela Itaipu Binacional para a produção de biogás em pequenas propriedades rurais da região oeste do Paraná, a partir do aproveitamento dos dejetos da atividade agropecuária.

Quanto à gaseificação da biomassa lignocelulósica, pode-se dizer que é pouco utilizada no Brasil, mas teve grande importância durante a Segunda Grande Guerra. A gaseificação é um processo de conversão termoquímico realizado a altas temperaturas, envolvendo a oxidação parcial dos elementos constituintes dos combustíveis (ASSUMPÇÃO, 1981). É a transformação de um combustível sólido em um combustível gasoso, ou seja, é a transformação da madeira em gases combustíveis, sendo o CO, o H_2 e o CH_4 os produtos principais. Esse processo permite a obtenção de um combustível gasoso com melhores características de transporte, melhor eficiência de combustão e que também pode ser usado como matéria-prima para outros processos.

A pirólise *flash* ou pirólise rápida da biomassa, ainda pouco difundida no Brasil, também é uma forma de conversão termoquímica da biomassa (combustível sólido) em um combustível líquido, denominado bio-óleo. Este pode ser transportado para uma biorrefinaria e, por meio de um processo de gaseificação para produção de gás de síntese (CO e H_2) e, posteriormente, síntese catalítica de *Fischer-Tropsch*, pode-se obter inúmeros combustíveis líquidos (biogasolina, biodiesel, etanol, metanol e bioquerosene, por exemplo), além de biomateriais. Cortez et al. (2013) destacaram que o processo de pirólise *flash* é uma alternativa de pré-tratamento da biomassa para viabilizar o seu transporte, haja vista a baixa densidade energética dos resíduos lignocelulósicos, como a serragem de madeira ou o bagaço de cana-de-açúcar.

É importante mencionar que o termo biorrefinaria pode ser considerado relativamente novo e consiste em uma unidade produtiva que integra rotas de conversão e equipamentos capazes de produzir combustível, eletricidade e produtos químicos de maior valor agregado, a partir de biomassa, por meio de processos químicos, físicos, mecânicos e biológicos. Nessas unidades industriais podem ser utilizadas, concomitantemente, diferentes rotas de conversão da biomassa lignocelulósica visando à produção de diversos biocombustíveis e produtos.

O Brasil, por ser um país com grande capacidade de produção de biomassa, tem a oportunidade de agregar valor aos resíduos lignocelulósicos e a possibilidade de gerar conhecimentos técnicos e científicos e de minimizar impactos ambientais por meio do uso das biorrefinarias. Segundo Vaz Jr. (2011), os setores energéticos e químicos são os que melhor poderão aproveitar as possibilidades técnicas e econômicas dessas unidades industriais sustentáveis. O primeiro por meio da produção de bicombustíveis e geração de bioeletricidade; e o segundo, pela obtenção de

produtos químicos de alto valor agregado.

A seguir serão discutidas as principais formas de conversão da biomassa em energia utilizadas no Brasil, detalhando-se a influência significativa do combustível lignocelulósico na obtenção de calor ou na produção de carvão vegetal.

2. Combustão

Combustão é uma reação de oxidação que o combustível sofre, ocorrendo quando a quantidade de O_2 é suficiente para transformá-lo em gases, deixando como resíduo somente os óxidos minerais (cinzas). É uma reação francamente exotérmica com variação de entalpia negativa (-ΔH), isto é, com liberação de energia. O carbono e o hidrogênio, no caso da biomassa lignocelulósica, combinam-se com o O_2, liberando energia calorífica ou térmica.

Logo, o calor resultante da oxidação da biomassa poderá ser utilizado somente para o aquecimento ou para a produção de vapor em caldeiras e, consequentemente, a geração de energia elétrica. Atualmente, tem-se utilizado esse processo de conversão termoquímico da biomassa nas usinas produtoras de açúcar e etanol para a geração de bioeletricidade, por meio da queima do bagaço de cana, e para o fornecimento de calor nas caldeiras e produção de vapor (CORTEZ et al., 2013). Esse resíduo é gerado após a extração do caldo da cana e apresenta poder calorífico superior (PCS) semelhante a outros materiais vegetais (18,89 MJ kg^{-1}), inclusive a madeira de *Eucalyptus* (NEVES et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2013a).

Existem duas formas de combustão, a saber:

a) Combustão completa ou direta, que ocorre na presença de O_2 em excesso;

b) Combustão incompleta ou indireta, que ocorre na presença controlada de O_2.

Quando a combustão é completa, todo o hidrogênio do combustível combina-se com o oxigênio para formar água (H_2O) e o carbono combina-se com o oxigênio para formar dióxido de carbono (CO_2). Entretanto, outros gases podem ser formados nesse processo, tais como o metano, o monóxido de carbono, o hidrogênio, o nitrogênio e outros hidrocarbonetos de baixa massa molecular, pois nem todo carbono e hidrogênio são oxidados devido, principalmente, à concentração de oxigênio na atmosfera e às distintas etapas da combustão (BRAND, 2010; CORTEZ et al., 2013; NOGUEIRA; LORA, 2003). Dessa forma, uma das formas de se medir a intensidade da combustão é pela concentração de CO no meio, que é um gás oxidável.

A combustão envolve uma série de reações químicas que ocorrem simultaneamente. Quando uma reação química ocorre, as ligações entre as moléculas dos combustíveis são rompidas e os átomos se rearranjam para formar os produtos. Logo, a variação de entalpia da reação será um balanço entre a variação de entalpia das ligações que foram rompidas e a variação de entalpia das ligações que foram formadas. No caso das reações exotérmicas, a entalpia de formação dos produtos é menor que a variação de entalpia de formação dos reagentes, ocorrendo, portanto, liberação de calor (-ΔH).

Porém, para que as reações se iniciem, é necessário o fornecimento de certa quantidade de energia, a chamada energia de ativação. Na Tabela 1 estão os valores médios da energia de

ativação da combustão da madeira e do carvão vegetal de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Observa-se que o carvão vegetal, por ser um combustível de maior poder calorífico, possui menor energia de ativação da combustão quando comparado à madeira (SOARES, 2011).

Segundo Soares (2011), uma menor energia de ativação implica uma menor energia necessária para que a reação de combustão se inicie, o que pode ser um parâmetro de desempate na escolha de materiais para fins energéticos com características semelhantes, tais como composição química, poder calorífico e rendimentos da carbonização.

Tabela 1 - Energia de ativação da combustão da madeira e do carvão vegetal.

Idade (anos)	Energia de ativação (kJ mol^{-1})	
	Madeira	Carvão vegetal
3	109,90	101,37
5	108,52	100,92
7	109,90	101,60

Fonte: Soares (2011).

As principais reações da combustão da madeira estão descritas a seguir:

a) $C(s) + O_2(g) \leftrightarrow CO_2(g) - H$ (combustão completa) ➔

Pela equação (a) tem-se que, $H = HCO_2(g) - (HC(s) + HO_2(g))$ Variação da entalpia ou variação de energia (H) é de -94.052 cal mol^{-1}.

Dividindo-se a variação da entalpia pela massa molecular do carbono (12 g mol^{-1}), tem-se 7.838 cal g^{-1} de carbono.

b) $C(s) + 1/2O2(g) \leftrightarrow CO(g)$, H = -26.416 cal mol^{-1} (combustão incompleta)

c) $CO(g) + 1/2O2(g) \leftrightarrow CO2(g)$, H = -67.636 cal mol^{-1}

d) $H2(g) + 1/2O2(g) \leftrightarrow H2O(l)$, H = -68.317 cal mol^{-1} (água retida no sistema na forma líquida)

e) $H2(g) + 1/2O2(g) \leftrightarrow H2O(g)$, H= -57.798 cal mol^{-1} (água sai do sistema na forma de vapor)

Subtraindo-se (e) de (d), obtêm-se a quantidade de energia que a água, na forma de vapor, leva com ela, ou seja, o calor latente do vapor de água. Calor latente é definido como o calor necessário para a mudança de fase de uma substância qualquer. Nesse caso, o valor será de 10.519 cal mol^{-1} que, sendo dividido pela massa molecular da água (MM=18 g mol^{-1}), tem-se a quantidade de energia por massa, que será de 584 cal g^{-1} de água ou, aproximadamente, 600 cal g^{-1}.

f) $S(s) + O2(g) \leftrightarrow SO2(g)$, $H = -71.040$ cal mol^{-1}

Considerando-se a massa molecular do enxofre igual a 32 g mol^{-1}, tem-se 71.040/32 = 2.220 cal g^{-1} de enxofre.

Os inconvenientes de combustíveis com a presença do enxofre são a liberação de gases SO_x durante as reações da combustão, que podem causar chuva ácida, acidificação de solos e corrosão dos equipamentos destinados à conversão energética (BILGEN; KAYGUSUZ, 2008; OBERNBERGER et al., 2006), além do seu menor valor calórico.

Um aspecto ambiental muito importante da biomassa lignocelulósica e dos combustíveis dela originados é a sua baixa concentração de enxofre que, aliado ao seu caráter renovável, permite a sustentabilidade da produção energética. García et al. (2012) reportaram que as emissões de SO_2 são negligenciáveis em combustíveis de biomassa. Sobre o carvão vegetal de clones jovens de *Eucalyptus*, Protásio et al. (2013b) também relataram ausência de enxofre na sua composição química elementar.

Um fator decisivo que influencia a combustão da biomassa vegetal é a sua composição química imediata. Os materiais lignocelulósicos são combustíveis ricos em voláteis que constituem, em média, 68% a 87% da sua massa seca, conforme apresentado na Tabela 2.

Os materiais voláteis da madeira ou de outros materiais vegetais são uma complexa mistura de gases e líquidos oriundos da decomposição térmica dos componentes químicos moleculares, ou seja, a celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos (YANG et al., 2007; AMUTIO et al., 2012). Observa-se ainda que há uma tendência de aumento do poder calorífico superior com o acréscimo do teor de materiais voláteis, haja vista que é o componente majoritário da biomassa lignocelulósica.

Tabela 2 - Composição química imediata de algumas biomassas lignocelulósicas

Resíduos lignocelulósicos	TMV* (%)	TCZ (%)	TCF (%)	PCS (kcal kg^{-1})
Casca de arroz	68,3	16,8	14,9	3.863
Madeira de cedro australiano	80,6	1,0	18,4	4.756
Casca de café	76,5	4,9	18,6	4.606
Colheita do milho	77,7	6,8	15,4	4.515
Bagaço de cana	86,0	0,9	13,1	4.511
Madeira de eucalipto	85,8	0,3	14,0	4.572
Madeira de pinus	86,6	0,4	12,9	4.864
Casca do coco babaçu**	78,4	1,7	19,9	4.414

* TMV, TCZ, TCF: teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo; PCS: poder calorífico superior.

Fonte: Protásio et al. (2013a); **Protásio et al. (2014a).

Esses materiais voláteis promovem uma fácil e rápida combustão da biomassa (PROTÁSIO, 2014; WERTHER et al., 2000), pois as reações de combustão homogênea (entre os gases voláteis e o ar) são facilmente realizadas quando comparadas às reações de combustão heterogênea (entre o combustível sólido e o ar). Isso faz com que o processo de combustão transcorra em seis etapas consecutivas

bem definidas, conforme as seguintes relatadas por Nogueira e Lora (2003) e Brand (2010):

- Secagem: ocorre em temperaturas inferiores a 200°C, sendo responsável pelo consumo de 20% da massa do combustível;

- Emissão de voláteis: ocorre em temperaturas de até 400°C;

- Ignição dos voláteis: ocorre até 600°C, chegando à perda de 40% da massa do combustível;

- Combustão dos voláteis (combustão homogênea): ocorre até 800°C, na qual 60% da massa do combustível é perdida;

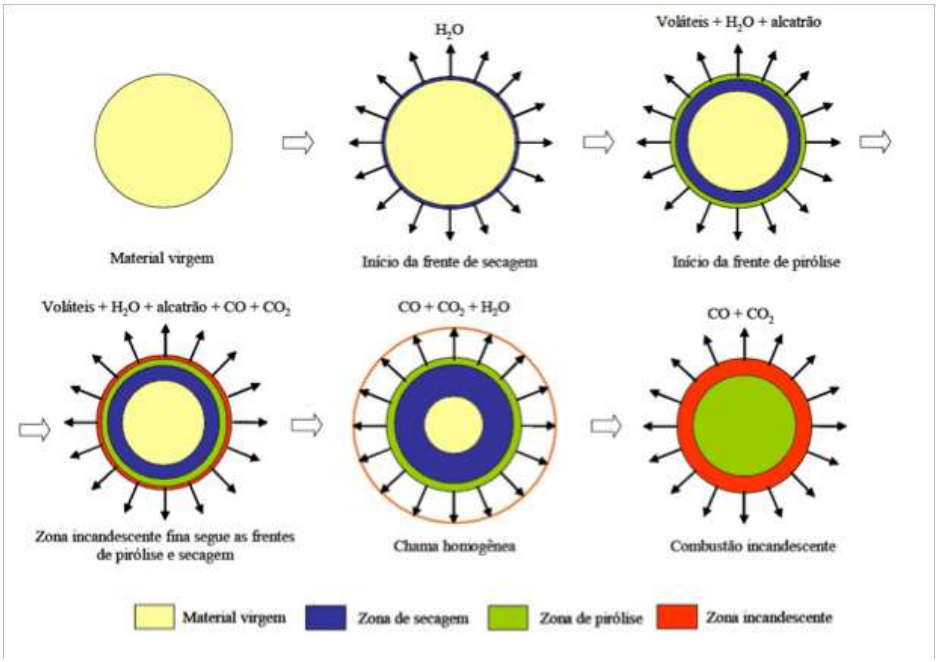
- Extinção da chama dos voláteis: ocorre acima de 800°C, com continuidade da perda de massa do combustível;

- Combustão dos resíduos de carbono (incandescência): que ocorre acima de 800°C, restando somente as cinzas ao final do processo.

De forma análoga, Castro (2005) dividiu as etapas da combustão da seguinte forma: secagem, pirólise, ignição, queima com chama, extinção da chama dos voláteis e incandescência, conforme pode ser visualizado na Figura 2.

No caso de uma peça de madeira submetida à oxidação completa, ocorre também pirólise, pois as reações homogêneas da combustão, ou seja, as reações entre os materiais voláteis e o oxigênio consomem grande parte do O2 disponível e isso resulta em uma zona de pirólise, pois a quantidade estequiométrica de ar é insuficiente para promover a oxidação total do combustível lignocelulósico.
É válido mencionar que a quantidade de ar disponível, o fluxo gasoso ou as características físicas do combustível, tais como a umidade, a densidade, a porosidade e a granulometria, podem afetar consideravelmente as temperaturas geradas em cada etapa da combustão e a perda de massa do material.

Figura 2 - Fases da queima de um cilindro de madeira sujeito a um fluxo de calor externo.



Fonte: Castro (2005).

Essas etapas de combustão de biomassa lignocelulósica, como briquetes, *pellets* e madeira, podem ser avaliadas em laboratório por meio de ensaios específicos, tais como as análises termogravi-

métrica (TGA), térmica diferencial (DTA) e de calorimetria exploratória diferencial (DSC), realizadas em atmosfera de ar sintético ou de oxigênio puro.

Trabalhos publicados na literatura internacional têm avaliado o desempenho dos materiais durante o processo de oxidação completa e a sua facilidade de ignição por meio dessas análises térmicas e, a partir dos resultados obtidos, são calculados parâmetros característicos dessa reação exotérmica.

Geralmente, para avaliar as características da combustão dos materiais lignocelulósicos ou do carvão mineral, são consideradas a temperatura de ignição (T_i), a temperatura final da combustão (T_f), o índice característico da combustão (S), o índice de ignição (D_i), o tempo correspondente à máxima taxa de combustão (t_p), o tempo de ignição (t_{ig}), a taxa máxima de combustão e a taxa média de combustão (WANG et al., 2011; WANG et al., 2012; MOON et al., 2013; QIAN et al., 2012; LIU et al., 2013). Protásio (2014) avaliou esses parâmetros para a casca do coco babaçu *in natura*, biomassa brasileira, e para o carvão vegetal dela produzido, considerando diferentes temperaturas finais de carbonização.

A temperatura de ignição é definida como a temperatura na qual a taxa de combustão aumenta 1% min^{-1}, iniciando-se o maior processo de combustão. Já a temperatura final da combustão é definida como a temperatura na qual a taxa de combustão diminui 1% min^{-1} e refere-se ao final do maior processo de combustão (MOON et al., 2013; WANG et al., 2011; WANG et al., 2012).

Já os índices característicos da combustão (S) e da ignição (Di) são obtidos por meio das Equações 1 e 2 e com base nos parâmetros obtidos na análise termogravimétrica em atmosfera de ar sintético ou oxigênio puro (LIU et al., 2013; MOON et al., 2013; QIAN et al., 2012; XIANG-GUO et al., 2006).

$$S = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right) máx \left(\frac{dm}{dt}\right) médio}{Ti^2\ xTf} \qquad (1)$$

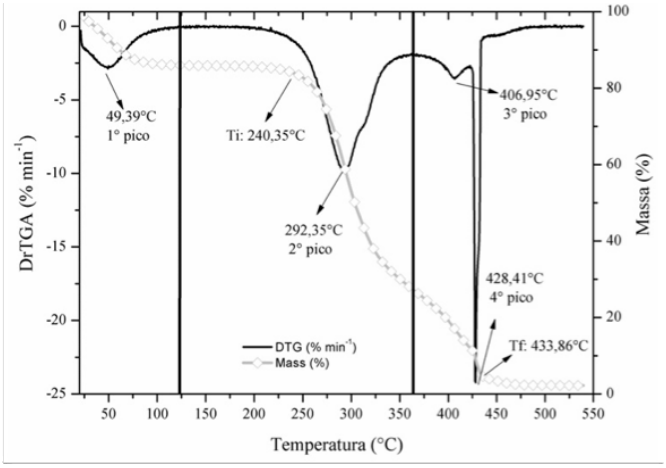
em que: S é o índice característico da combustão; $(dm/dt)_{máx}$ é a taxa de combustão máxima (% min^{-1}); $(dm/dt)_{médio}$ é a taxa de combustão média; Ti é a temperatura de ignição (°C) e T_f é a temperatura final da combustão (°C).

$$S = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right) máx \left(\frac{dm}{dt}\right) médio}{Ti^2\ xTf} \qquad (2)$$

em que: D_i é o índice de ignição; $(dm/dt)_{máx}$ é a taxa de combustão máxima (% min^{-1}); tp é o tempo correspondente à máxima taxa de combustão (min) e tig é o tempo de ignição (min).

A Figura 3 ilustra a perda de massa em função da temperatura (curva TGA) e a curva DrTGA ou DTG (derivada primeira da curva TGA) da combustão da casca do coco babaçu *in natura*.

Figura 3 - Curvas TGA e DrTGA da combustão da casca do coco babaçu *in natura*, em que Ti é a temperatura de ignição e T_f é a temperatura final da combustão.



Fonte: Protásio (2014).

Observa-se que a temperatura de ignição (Ti) da casca do coco babaçu foi de 240,35°C e a temperatura final da combustão (Tf) foi de 433,86°C. Essas temperaturas foram consideravelmente inferiores às observadas para o carvão vegetal produzido, pois a relação materiais voláteis/carbono fixo da casca do coco babaçu é elevada (3,95), conforme relatado por Protásio (2014) e Protásio et al. (2014a).

A madeira ou os materiais lignocelulósicos possuem menores temperaturas de ignição e de final da combustão comparativamente ao carvão vegetal e isso é explicado pela relação entre os teores de materiais voláteis e carbono fixo (TMV/TCF). Quanto maior for a relação materiais voláteis/carbono fixo, menor será a temperatura de ignição do combustível, ou seja, mais facilmente o material irá se inflamar e menor será o tempo para que a combustão se inicie.

A maior quantidade e a emissão rápida de materiais voláteis são fatores que contribuem decisivamente para acelerar a ignição do combustível em uma temperatura inferior (MOON et al., 2013), haja vista que a combustão homogênea é mais fácil de ocorrer, conforme discutido anteriormente. Logo, a diminuição da relação TMV/TCF do carvão vegetal explica a sua maior temperatura de ignição (PROTÁSIO, 2014).

Além disso, deve-se considerar que a relação TMV/TCF do carvão vegetal diminui com o aumento da temperatura final de carbonização (ver item 3) e, consequentemente, ocorre um aumento do tempo de ignição e do tempo correspondente à maior taxa de combustão, bem como a diminuição dos índices S e D_i dos carvões produzidos em temperaturas mais elevadas (PROTÁSIO, 2014).

Vale ressaltar que o índice característico da combustão (S) reflete a reatividade do carvão vegetal durante toda a reação de oxidação (XIONG et al., 2014). Quanto maior for esse índice, melhor será a performance do combustível durante a combustão, ou seja, o carvão vegetal com maior índice de ignição possui maior facilidade de inflamar (QIAN et al., 2012).

Além disso, observam-se na Figura 3 três estágios de degradação térmica da biomassa *in natura* do coco babaçu. O primeiro estágio ocorre da temperatura ambiente até, aproximadamente, 125°C e corresponde à secagem da amostra. Nesta fase a perda de massa referente à umidade foi de 14,05%, conforme reportado por Protásio (2014).

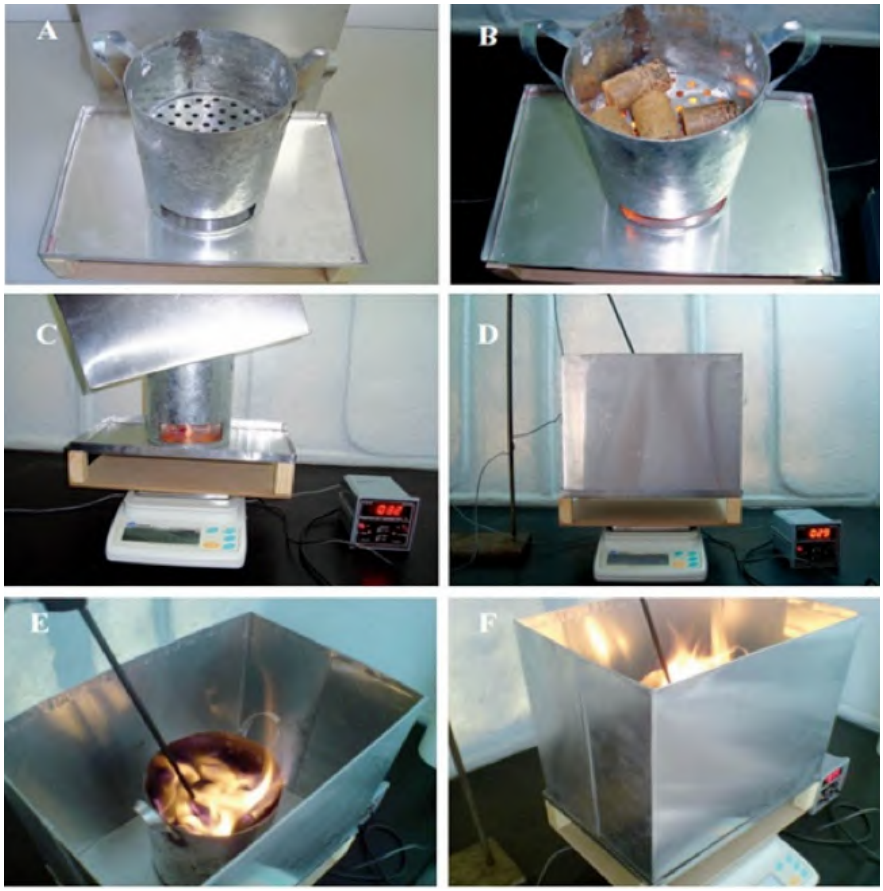
O segundo estágio, fase de desvolatilização dos componentes majoritários que formam a biomassa (Li et al., 2013), inicia-se logo em seguida, após um ligeiro período de estabilidade térmica, e se

estende até, aproximadamente, 360°C. A fase de desvolatilização corresponde à degradação das hemiceluloses, da celulose e de parte da lignina, resultando, assim, na liberação e ignição dos materiais voláteis (combustão homogênea), levando à formação do resíduo sólido de carbono ou carvão vegetal (FERNANDES et al., 2013; KAI et al., 2011; MAGDZIARZ; WILK, 2013).

Quanto ao terceiro estágio, observa-se um pico estreito em 428,41°C relacionado à decomposição da lignina residual e à oxidação incandescente do carbono fixo formado na segunda e terceira fases. Esse estágio corresponde à combustão homogênea dos gases liberados pela decomposição da lignina e à combustão heterogênea do carbono sólido (FANG et al., 2006; KAI et al., 2011; MAGDZIARZ; MOON et al., 2013; WILK, 2013). Mais informações sobre o processo de combustão da biomassa do coco babaçu e do carvão vegetal podem ser encontradas no trabalho de Protásio (2014).

Outra maneira simples e rápida de avaliar a combustibilidade da madeira ou de produtos obtidos a partir dos resíduos vegetais, tais como briquetes e *pellets*, é o chamado teste de combustibilidade desenvolvido por Quirino e Brito (1991) e reproduzido por Paula et al. (2011), como observado na Figura 4.

Figura 4 - Teste de combustibilidade desenvolvido por Quirino e Brito (1991), destacando-se: (A) combustor; (B) combustor com briquetes e início da combustão; (C) anteparo protetor sendo colocado; (D) conjunto combustor, base, balança e medidor de temperatura; (E) posição do sensor do medidor de temperatura; e (F) combustão.



Fonte: Paula et al. (2011).

O teste de combustibilidade possibilita a verificação da temperatura e da massa que está sendo consumida a cada instante durante a combustão. Isto permite elaborar curvas de temperatura x tempo, massa x tempo e massa x temperatura (QUIRINO; BRITO, 1991), como o pode ser observado na Figura 5 para a madeira de eucalipto.

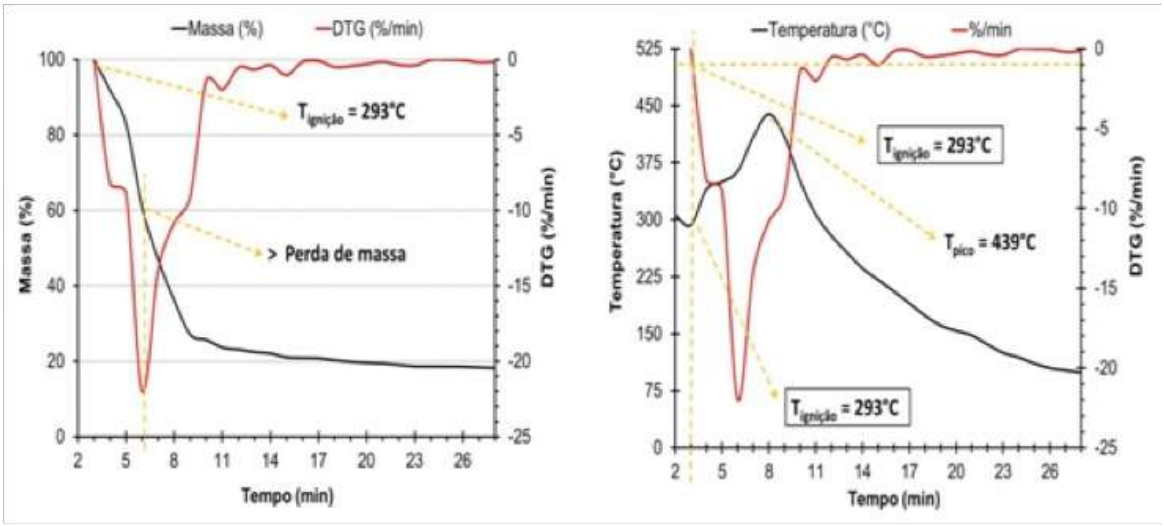
A partir de valores obtidos em pontos característicos destas curvas, é possível elaborar um índice denominado índice de combustão ou índice de combustibilidade (ICOM), conforme apresentado na Equação 3. O ICOM é um número adimensional. As unidades se anulam no cálculo das porcentagens e estas se cancelam com a divisão por 100, conforme relatado por Quirino e Brito (1991).

$$ICOM = A \times B / 100 \times C \quad (3)$$

em que: ICOM é o índice de combustão; A é a porcentagem do tempo de teste no qual a temperatura permanece acima de 150°C, tomada em relação ao tempo total de 120 min; B é a porcentagem da temperatura máxima atingida no teste, em relação à temperatura de 150°C; e C é a porcentagem da massa total consumida gerando temperaturas acima de 150°C.

Dessa forma, podem-se comparar diferentes madeiras, biomassas residuais ou briquetes por meio do seu desempenho na combustão, pois se espera que um bom combustível sólido forneça as mais altas temperaturas durante o maior tempo e com o menor consumo de massa (QUIRINO; BRITO, 1991). Um aspecto importante desse ensaio é que as massas dos diferentes combustíveis testados devem ser, aproximadamente, semelhantes, bem como a umidade, pois, caso contrário, os resultados não poderão ser comparados com confiabilidade.

Figura 5 - Teste de combustibilidade do briquete de casca de café.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Paula et al. (2011) encontraram ICOM de 0,56 e 0,52 para o carvão vegetal e a madeira, respectivamente. Certamente, a distinta composição química imediata e o maior poder calorífico do carvão vegetal explica o seu maior índice de combustibilidade.

Quanto aos sistemas típicos de combustão de madeira e biomassa, pode-se destacar os seguintes: queima em grelha, queima de combustível pulverizado e queima em leito fluidizado. O sistema convencional de queima é o que se dá sobre grelhas, que podem ser fixas ou móveis, com distintos modelos, tais como a grelha plana resfriada, a grelha inclinada, a grelha basculante e a grelha rotativa (BRAND, 2010; NOGUEIRA; LORA, 2003).

Vale ressaltar ainda o uso dos fogões à lenha utilizados em várias regiões no Brasil para cocção de alimentos e/ou aquecimento de água por meio de serpentinas. Nesse quesito, pesquisas precisam ser desenvolvidas visando à melhoria da eficiência energética desses aparelhos domésticos de queima, haja vista as elevadas perdas termodinâmicas da conversão da lenha em energia calorífica.

3. Carbonização ou pirólise lenta

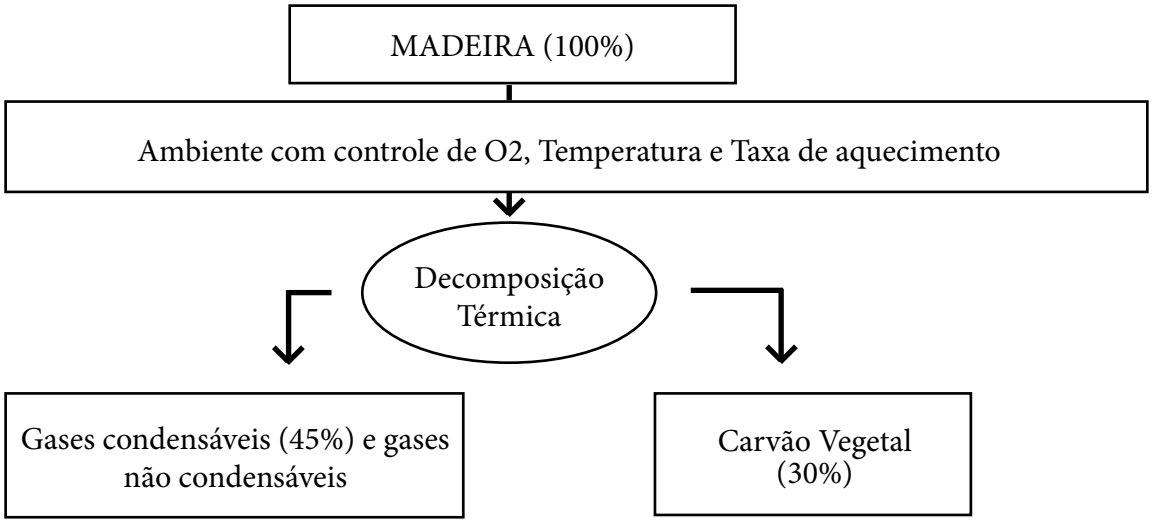
3.1. Definição

Carbonização é o processo pelo qual a madeira é transformada em carvão vegetal, quando aquecida em local fechado, na ausência ou presença controlada de ar (oxigênio). Uma parte da madeira permanece como resíduo sólido (carvão vegetal) e a outra parte é transformada em gases. Em outras palavras, a carbonização é a decomposição térmica dos compostos químicos que compõem a madeira em condição controlada. A Figura 6 ilustra o esquema da produção de carvão vegetal e seu balanço teórico de massa.

A carbonização da madeira envolve fenômenos complexos que possibilitam a geração de um elevado número de compostos. O objetivo desse processo termoquímico é a concentração de carbono no carvão vegetal, aumentando a densidade energética do combustível e tornando-o mais adequado para ser utilizado industrialmente como biorredutor nos altos fornos siderúrgicos.

Essa concentração de carbono ocorre pela volatilização dos outros componentes químicos elementares da madeira ou da biomassa lignocelulósica, como o oxigênio e o hidrogênio, e, consequentemente, uma fração considerável do carbono também é volatilizada (ver item 3.3).

Figura 6 - Esquema da produção de carvão vegetal considerando uma temperatura final de carbonização de, aproximadamente, 450°C e uma taxa de aquecimento de 100°C h^{-1}.



Fonte: Elab orado pelos autores.

A fração gasosa, resultante da decomposição térmica da madeira, é dividida em duas, ou seja, uma condensável e outra não condensável. A fração condensável, ou líquido pirolenhoso, é composta pelo ácido pirolenhoso e pelo alcatrão insolúvel.

O ácido pirolenhoso é formado basicamente pelos ácidos acético e fórmico, metanol, acetona, solventes metilênicos e alcatrão solúvel diluídos em, aproximadamente, 70% de água. Já o alcatrão insolúvel é caracterizado por uma mistura complexa, de caráter fenólico, contendo mais de 400 compostos na sua constituição. Estas duas frações são facilmente separadas por decantação, pois o alcatrão insolúvel é mais denso que o ácido pirolenhoso. A coloração do ácido pirolenhoso é voltada geralmente para o marrom castanho, enquanto que o alcatrão insolúvel possui coloração mais escura. A coloração das duas frações sofre influência da madeira utilizada.

A fração gasosa não condensável é formada, principalmente, pelos gases CO_2, CO, CH_4, C_mH_n, e H_2, sendo que cada um deles são volatilizados em maior intensidade numa faixa específica de temperatura. Por exemplo, as emissões de CO aumentam com a temperatura de pirólise, devido à decomposição da celulose e da lignina, enquanto a volatilização de CO_2 diminui. Isso ocorre porque o CO_2 é produzido, principalmente, pela degradação das carboxilas (R–COOH) presentes nas hemiceluloses que, por sua vez, possuem baixa estabilidade térmica (AMUTIO et al., 2012). Já em temperaturas mais elevadas (500-600°C) ocorre, de forma mais expressiva, as emissões de CH_4 e H_2 devido, principalmente, à decomposição térmica da lignina (YANG et al., 2007).

3.2.Etapas da carbonização

De forma didática, pode-se dividir o processo de carbonização em quatro etapas, de acordo com a temperatura (MEDEIROS; RESENDE, 1983; OLIVEIRA, VIVACQUA FILHO, GOMES, 1982), como o descrito a seguir:

a) abaixo de 200°C: secagem e início da decomposição térmica;

b) de 200 a 280°C: predominância das reações endotérmicas, com a liberação de ácido acético e ácido fórmico, metanol, água e gás carbônico (CO_2);

c) de 280 a 500°C: predominância das reações exotérmicas, que levam à liberação dos gases combustíveis, como o CO, CH e alcatrões;

d) acima de 500°C: o carvão já é bem estável e há apenas pequenas quantidades de voláteis, principalmente H2, que são liberadas.

Essas etapas podem ocorrer de modo simultâneo em peças de maior dimensão, caracterizando períodos e/ ou zonas de carbonização com temperatura variada. As biomoléculas presentes na madeira, principalmente a celulose, as hemiceluloses e a lignina, sofrem uma série de reações de decomposição durante a carbonização sob a ação do calor, originando como produtos os gases voláteis e o carvão vegetal. Os diversos componentes da madeira reagem em diferentes temperaturas, produzindo uma mistura de produtos (DAVIS, EBERHARD, 1991).

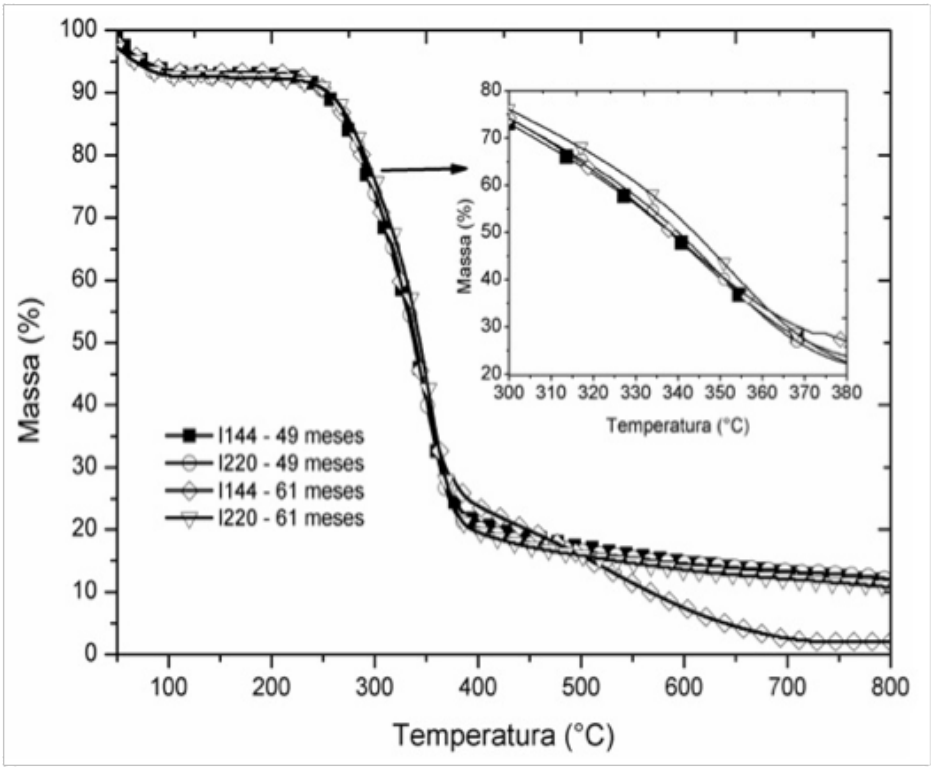
A decomposição térmica da madeira tem sido estudada e vários trabalhos têm sido publicados na tentativa de melhor compreender o que acontece quando a madeira é submetida ao aquecimento, suas reações e, consequentemente, a qualidade do produto final. As análises termogravimétrica e de calorimetria exploratória diferencial têm sido frequentemente utilizadas nos estudos de decomposi-

ção térmica da madeira (CARNEIRO et al., 2013; PEREIRA et al., 2013a; PROTÁSIO et al., 2014b; SANTOS et al., 2012).

A análise termogravimétrica evidencia o comportamento da madeira quando aquecida, sendo possível verificar em que temperatura é iniciada a decomposição térmica e, ainda, em qual faixa de temperatura a decomposição térmica é mais pronunciada, conforme a Figura 7. Observa-se que a madeira se decompõe termicamente em duas etapas típicas e diferentes durante a carbonização. Inicialmente, a massa decresce rapidamente em função da degradação térmica da celulose e das hemiceluloses (holocelulose) e, em seguida, durante a segunda etapa, a massa decresce de forma menos intensa devido, principalmente, à decomposição térmica da lignina, que é mais resistente.

Já com a análise de calorimetria exploratória diferencial torna-se possível a identificação dos picos e/ou das faixas de ocorrência das reações endotérmicas e exotérmicas do processo e a quantificação das variações de entalpia envolvidas.

Figura 7 - Perda de massa em função da temperatura da madeira dos clones comerciais de *Eucalyptus* spp em atmosfera de nitrogênio.

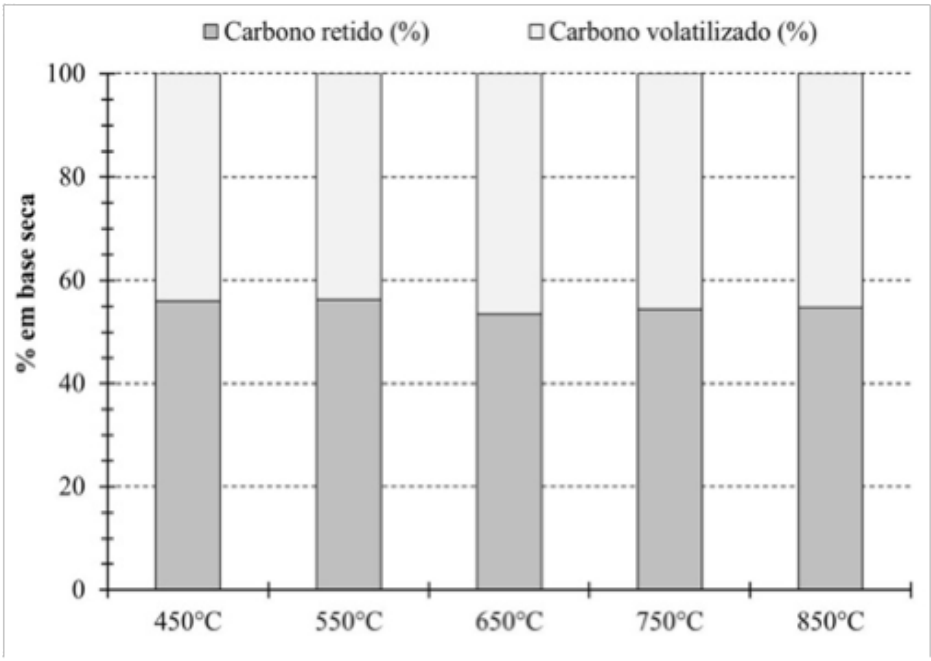


Fonte: Protásio et al. (2014b).

3.3 Balanços de massa e energia da carbonização

O balanço de carbono da carbonização da biomassa lignocelulósica tende a ser semelhante para diferentes temperaturas finais (Figura 8). Observa-se que, aproximadamente, 55% do carbono presente na biomassa permanece retido no carvão vegetal, enquanto 45% é volatilizado.

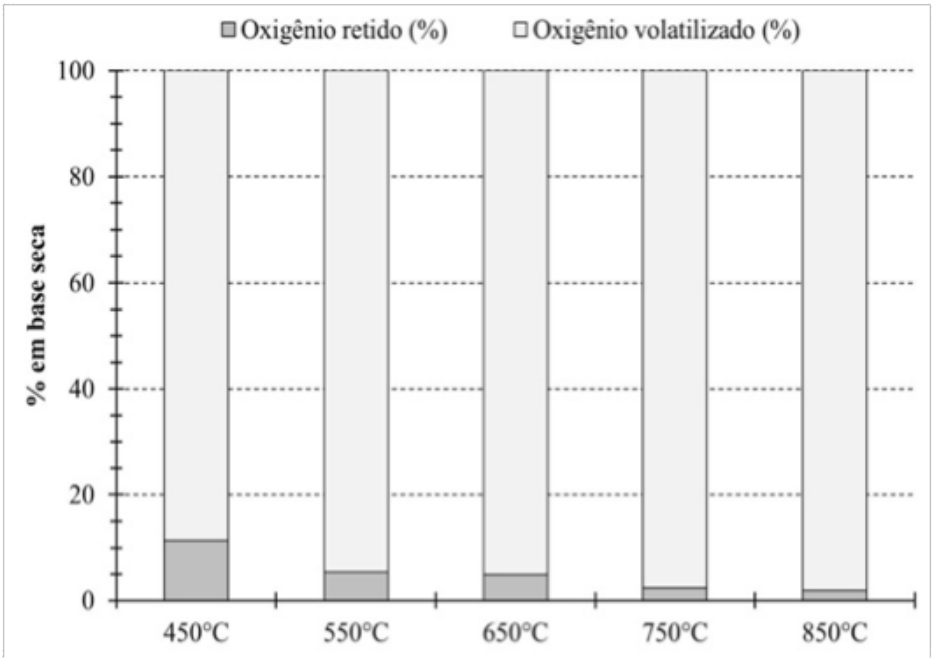
Figura 8 - Balanço de carbono da carbonização da casca do coco babaçu em função da temperatura final do forno.



Fonte: Adaptado de Protásio et al. (2014c, 2014d).

Já a quantidade de oxigênio volatilizado aumenta, consideravelmente, com o acréscimo da temperatura final de carbonização (Figura 9). A quantidade de oxigênio presente na biomassa, que permanece retida no carvão vegetal, varia de 11% para 2% nas temperaturas de 450°C e 850°C, respectivamente. Dessa forma, de 89% a 98% do oxigênio é volatilizado considerando-se essas temperaturas de pirólise.

Figura 9 - Balanço de oxigênio da carbonização da casca do coco babaçu em função da temperatura final do forno.



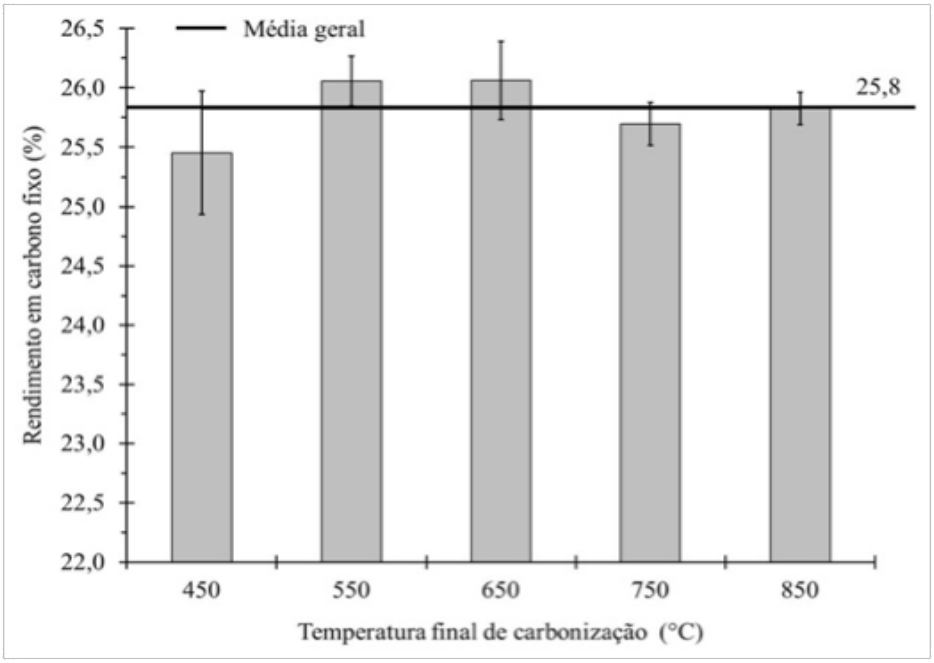
Fonte: Adaptado de Protásio et al. (2014c, 2014d).

Pereira et al. (2013b) afirmaram que, aproximadamente, 90% do oxigênio presente na madeira é volatilizado durante o processo de carbonização, enquanto 60% do carbono permanece retido, considerando a temperatura final de 450°C e a composição química elementar do carvão vegetal e da madeira para a realização dos cálculos.

Quanto ao rendimento em carbono fixo (RCF), que expressa a quantidade de carbono presente na biomassa lignocelulósica e que ficou retido no carvão vegetal, sabe-se que esse parâmetro não é influenciado estatisticamente pela temperatura final de carbonização (Figura 10), conforme relatado por Protásio et al. (2014c).

Por exemplo, a carbonização da casca do coco babaçu resulta em um rendimento em carbono fixo de, aproximadamente, 26% (Figura 10). Em outras palavras, a cada 100 kg de biomassa vegetal carbonizada há, aproximadamente, 26 kg de carbono fixo (em base seca). Deve-se lembrar que em 100 kg de biomassa lignocelulósica seca há, em média, 48 kg de carbono elementar.

Figura 10 - Rendimento em carbono fixo da carbonização da casca do coco babaçu em função da temperatura final.



Fonte: Adaptado de Protásio et al. (2014c).

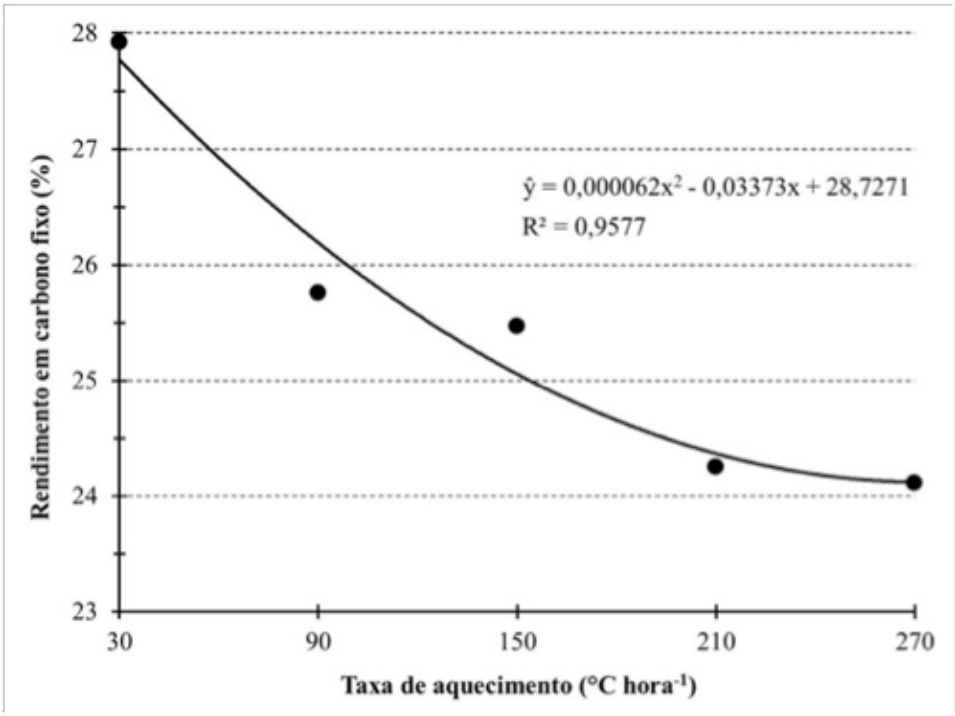
O RCF também é pouco influenciado pela matéria-prima de origem, conforme pode ser constatado na Tabela 3 (ver item 3.5). Para a carbonização da madeira de clones de *Eucalyptus*, o rendimento em carbono fixo relatado na literatura varia de 25% a 27% em base seca (NEVES et al., 2011; REIS et al., 2012; PROTÁSIO et al., 2013b), ou seja, ocorre algo semelhante ao observado para a carbonização da casca do coco babaçu ou para a da madeira de várias espécies de *Eucalyptus* em diferentes idades (ver item 3.5).

Esse rendimento é obtido pelo produto do teor de carbono fixo e do rendimento gravimétrico em carvão vegetal e sabe-se que essas duas últimas variáveis apresentam correlação negativa (PROTÁSIO et al., 2011; TRUGILHO; SILVA, 2001). Dessa forma, no cálculo do rendimento em carbono fixo é

mantida uma proporcionalidade, em que o rendimento em carvão tende a reduzir e o teor de carbono fixo tende a aumentar com a temperatura final de carbonização (TRUGILHO; SILVA, 2001; VIEIRA et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2014c, 2014d).

Já a taxa de aquecimento do forno influencia, consideravelmente, o rendimento em carbono fixo, conforme pode ser visualizado na Figura 11. Quanto menor for a taxa de aquecimento do forno, maior será o rendimento em carbono fixo, pois maior é a facilidade de ocorrer reações secundárias entre os gases oriundos da decomposição da biomassa e, consequentemente, propiciar a formação da fração sólida.

Figura 11 - Efeito da taxa de aquecimento no rendimento em carbono fixo da carbonização da madeira de *Acacia mangium* considerando a temperatura final de 450°C.

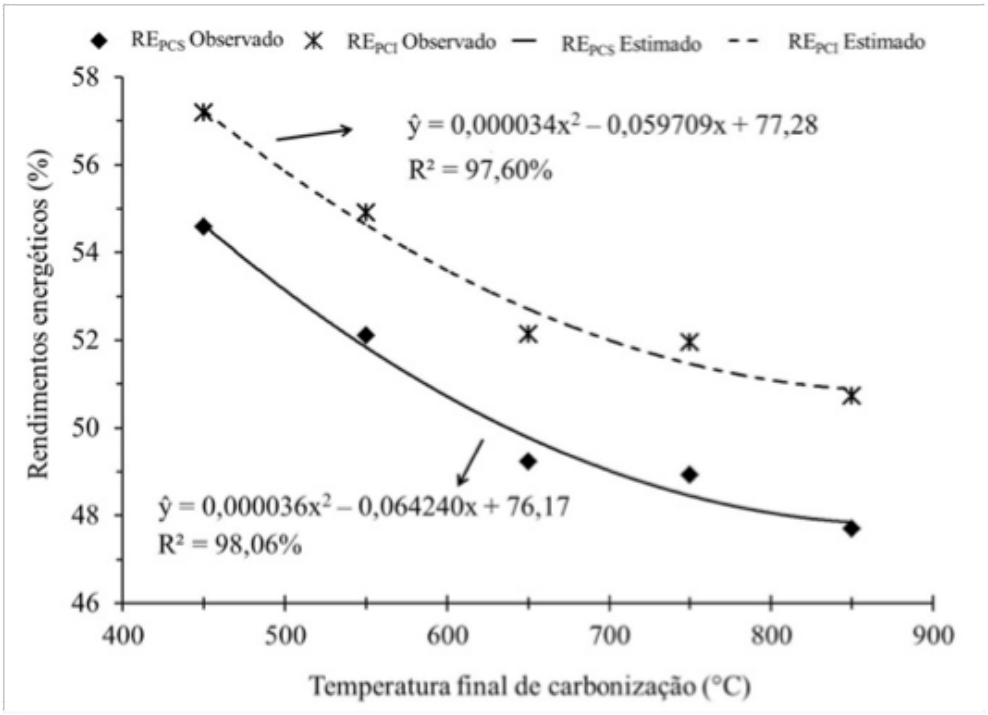


Fonte: Elaborado pelos autores.

Quanto aos rendimentos energéticos da conversão, observa-se que esses parâmetros diminuem com o aumento da temperatura final de carbonização (Figura 12). Uma parte da energia estocada na madeira permanece no carvão vegetal e a outra parte é perdida nos gases (condensáveis e não condensáveis), haja vista que a energia não pode ser criada nem destruída, mas simplesmente transformada de uma modalidade para outra (Princípio da Conservação da Energia – 1ª Lei da Termodinâmica). As perdas de energia situam-se entre 45 a 52% (base PCS) e entre 43 a 49% (base PCI) para as temperaturas finais de carbonização de 450°C a 850°C, respectivamente.

No entanto, os gases combustíveis oriundos da carbonização podem ser reaproveitados na geração de energia e contribuir, decisivamente, para aumentar a eficiência do processo de conversão da biomassa em carvão vegetal e reduzir a poluição do ar (CARDOSO et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2013).

Figura 12 - Rendimentos energéticos da carbonização da casca do coco babaçu em função da temperatura.



Fonte: Protásio et al. (2014c).

Protásio et al. (2014c) observaram-se que o rendimento energético calculado com base no PCI (RE_{PCI}) foi maior que o rendimento energético obtido com base no PCS (RE_{PCS}). Os autores afirmaram que isso ocorreu devido à volatilização do hidrogênio na constituição química da biomassa durante a pirólise e à maior concentração de carbono no carvão. Dessa forma, o PCS e PCI do carvão vegetal tendem a ser semelhantes e a relação entre o PCI do carvão vegetal e da biomassa *in natura* é maior que a relação entre o PCS desses combustíveis. É válido lembrar que o PCI é calculado em base seca e desconsidera a quantidade de energia necessária para evaporar a água formada pelo hidrogênio contido na constituição química do material.

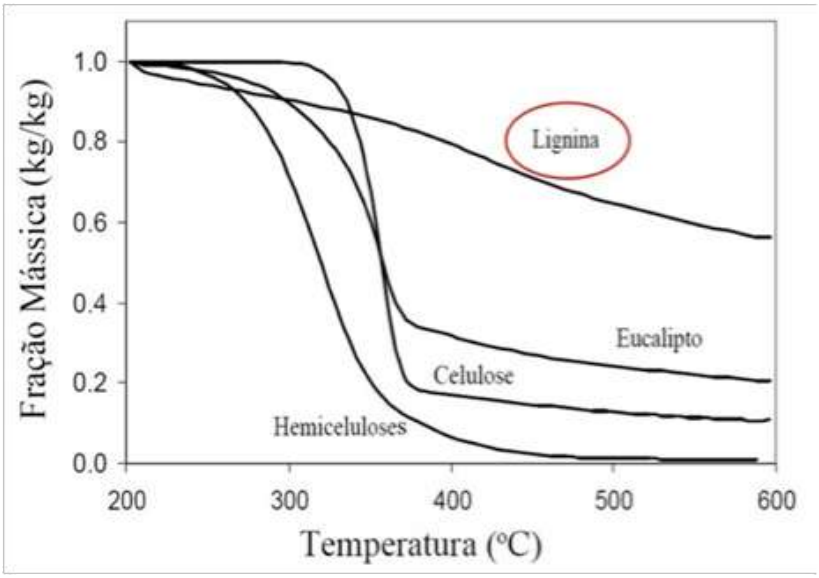
3.4. Fatores que afetam a produção do carvão vegetal

A matéria-prima, o sistema de carbonização e a mão de obra são os fatores que afetam a qualidade e a produção do carvão vegetal. Com relação à matéria-prima, as principais características a serem monitoradas são as seguintes: espécie, idade, local, umidade, teores de lignina, cinzas, holocelulose e extrativos, densidade básica e fatores anatômicos, ou seja, porcentagem de fibras, fração e espessura da parede celular e a porosidade, diâmetro da peça e produção de massa seca. Geralmente, se utilizam essas características da madeira como índices de qualidade visando à otimização da produção de carvão vegetal com qualidade adequada para ser utilizado como biorredutor nos altos fornos siderúrgicos, além do uso doméstico.

O teor de lignina na madeira afeta diretamente a produção de carvão vegetal, pois as madeiras com maiores teores de lignina irão produzir maior quantidade de carvão vegetal. Segundo Sarkanen e Ludwig (1971); Oliveira, Vivacqua Filho e Gomes (1982); Raad et al. (2006) e Yang et

al. (2007), a lignina é o componente da madeira mais estável termicamente, quando comparada com a celulose, com as hemiceluloses e com a própria madeira (Figura 13). Este fato está relacionado com a estrutura química complexa e com os tipos de ligações presentes na estrutura dessa macromolécula.

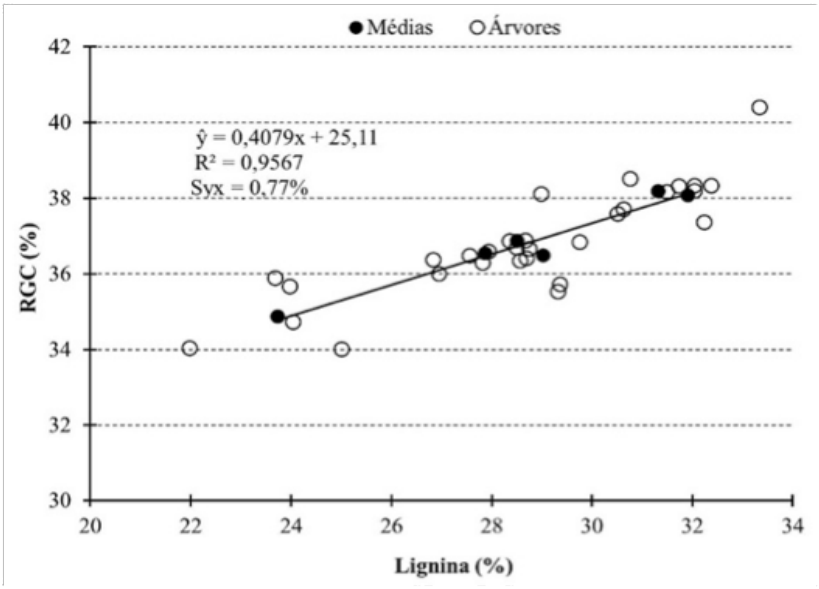
Figura 13 - Pirólise dos principais constituintes químicos da madeira de eucalipto.



Fonte: Raad et al. (2006).

A relação existente entre o teor de lignina e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal para espécies de eucaliptos é ilustrada na Figura 14. Analisando-se a equação ajustada, pode-se concluir que, a cada 1% de aumento no teor de lignina na madeira, há um acréscimo de 0,41% no rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Figura 14 - Relação entre o teor de lignina da madeira e o rendimento em carvão vegetal. (RGC)



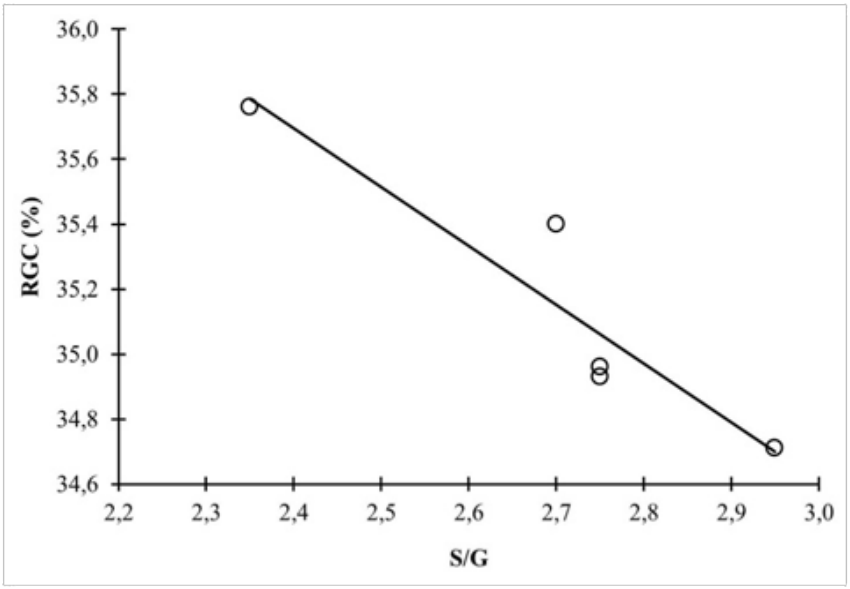
Fonte: Adaptado de Trugilho (1995).

Devem ser consideradas, ainda, as diferenças qualitativas da lignina na biomassa de angiospermas eudicotiledôneas, como a madeira de eucalipto. A lignina de folhosas apresenta maiores quantidades da unidade precursora siringil (álcool trans-sinapílico) do que guaiacil (álcool trans-coniferílico) em proporção variável (SARKANEN; LUDWIG, 1971; DEL RÍO et al., 2005; NUNES et al., 2010; CASTRO et al., 2013; PEREIRA et al., 2013b).

A diferença básica entre os tipos de lignina encontra-se na quantidade de grupos metoxila (-OCH_3) e na quantidade de ligações C-C possíveis de serem feitas no anel aromático. Sabe-se que a unidade guaiacil possui apenas um grupo metoxila, enquanto a unidade siringil possui dois grupos do tipo -OCH_3 no anel aromático (SARKANEN; LUDWIG, 1971; SJÖSTRÖM, 1993). Dessa forma, quanto mais unidades guaiacil estiverem presentes na macromolécula de lignina, maior será a possibilidade de ligações C-C entre os anéis aromáticos. Logo, espera-se que a conversão de madeira em carvão aumente com a redução da relação S/G (siringil/guaiacil), uma vez que essa diminuição promoverá uma maior resistência à degradação térmica pela presença de estruturas mais condensadas (SOARES, 2011; CASTRO et al., 2013; PEREIRA et al., 2013b; SOARES et al., 2014).

A Figura 15 apresenta a correlação entre a relação S/G com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Soares et al. (2014) destacaram que a menor relação S/G está associada à maior relação C/H ou à menor relação H/C e, segundo esses autores, a explicação para este fato deve-se à estrutura química dos grupos siringil e guaiacil, sendo que este último apresenta maior relação C/H ou menor relação H/C. Para a seleção de madeiras para a produção de carvão vegetal, deve-se procurar por materiais com menores relações S/G e, consequentemente, menores relações H/C, uma vez que o grupo guaiacil é mais preservado no processo de pirólise (SOARES et al., 2014). No entanto, a análise quantitativa do teor de lignina também deve ser realizada.

Figura 15 - Correlação entre o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC) e a relação S/G.



Fonte: Adaptado de Pereira et al. (2013b).

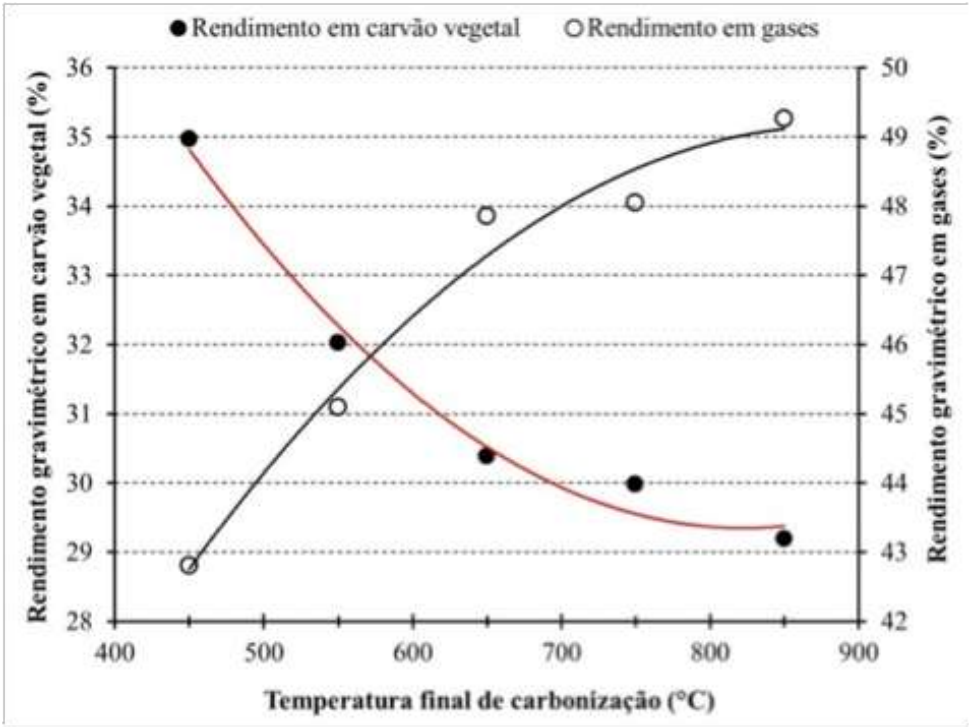
A umidade da madeira é outro fator a ser considerado, pois afeta de forma negativa o rendimento e a qualidade do carvão vegetal. Quanto maior for a umidade, maior será o gasto de energia durante a etapa de secagem da madeira. Além de contribuir com a redução do rendimento gravimétrico da carbonização, a umidade afeta de forma positiva a geração de finos no carvão, tornando-o mais friável e com menor resistência mecânica.

Pereira et al. (2013c) ressaltam que a geração de finos também irá depender de outros fatores, tais como a velocidade e a temperatura máxima da carbonização, a porcen¬tagem de vasos obstruídos no cerne, o diâmetro da peça e a relação cerne/alburno. Os autores ainda afirmam que, quanto maior for a por¬centagem de cerne, maior será a quantidade de extrativos químicos e, provavelmente, maiores serão a geração de gases e a pressão no interior da madeira du¬rante a carbonização. Logo, quanto maior for a relação C/A para clones jovens de *Eucalyptus* com predominância de madeira juvenil, maior será a dificuldade de liberação dos gases e maior será o número de células rompidas, resultando, assim, em um carvão vegetal friável (PEREIRA et al., 2013c).

A taxa de aquecimento, a temperatura final, o tempo de residência e a pressão, no caso de sistemas pressurizados, são fatores relacionados ao sistema de carbonização que afetam a produção de carvão vegetal. A pressão concentra a fase gasosa no reator, melhora a transferência de calor, reduz o tempo de aquecimento, uniformiza o carvão vegetal, reduz o teor de carbono fixo e aumenta o teor de materiais voláteis.

Já a temperatura final de carbonização afeta a qualidade do carvão produzido, pois maiores temperaturas favorecem positivamente o teor de carbono fixo (PROTÁSIO et al., 2014d) e negativamente o rendimento gravimétrico da carbonização, conforme Figura 16, e o teor de materiais voláteis. Isso ocorre independentemente da matéria-prima carbonizada.

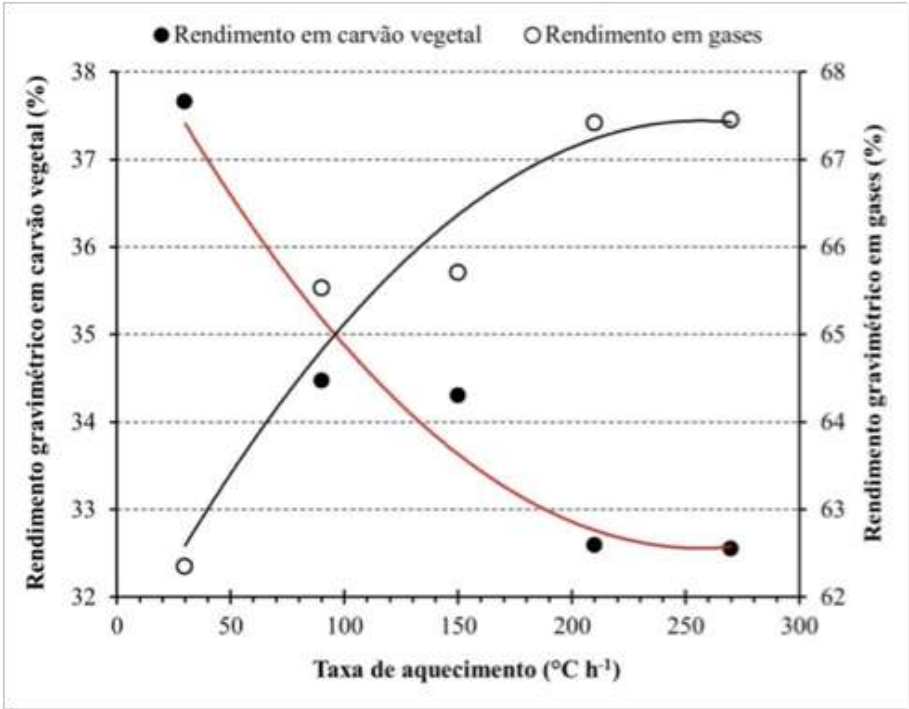
Figura 16 - Rendimento gravimétrico em carvão vegetal em função da temperatura final de carbonização da casca do coco babaçu.



Fonte: Adaptado de Protásio et al. (2014c).

A taxa de aquecimento rápida favorece a produção de gás, enquanto que menores taxas propiciam a produção de carvão vegetal devido à degradação mais lenta dos componentes químicos moleculares do material lignocelulósico, conforme pode ser visualizado na Figura 17. Maiores taxas de aquecimento resultam em uma rápida despolimerização dos constituintes químicos da biomassa em voláteis primários e não favorecem as reações secundárias entre os gases formados, resultando, assim, na diminuição do rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Figura 17 - Balanço de massa da carbonização da madeira de Acacia mangium em função da taxa de aquecimento do forno laboratorial tipo mufla.



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.5. Aspectos gerais: qualidade e processos de produção do carvão vegetal

A qualidade do carvão vegetal é definida por uma série de análises físicas, químicas, térmicas e mecânicas realizadas em laboratórios especializados para estas atividades. Geralmente, durante essas análises, são determinadas as seguintes características: a densidade relativa aparente do carvão vegetal; a análise química imediata, na qual se quantificam a umidade, os materiais voláteis, as cinzas e, por diferença, o carbono fixo; o poder calorífico; a densidade energética; e a friabilidade. Tudo isto é realizado segundo normas específicas.

A reatividade do carvão vegetal, apesar de não ser uma análise comum na rotina dos laboratórios no Brasil, é de fundamental importância para o desempenho desse combustível nos altos fornos siderúrgicos. Essa é uma propriedade que o carvão vegetal tem de reagir com o CO_2 e produzir o CO, ou seja, é a capacidade que o carvão vegetal possui de regenerar o poder redutor do gás e deve ser compatível com a velocidade de redutibilidade do minério de ferro.

Nas Tabelas 3 e 4 estão, respectivamente, os valores médios de rendimentos e algumas propriedades do carvão vegetal, em diferentes espécies de eucalipto, obtidos em escala de laboratório, utilizando-se uma taxa de aquecimento de 100°C h^{-1} e 450°C de temperatura final.

Tabela 3 - Valores médios de rendimentos de algumas espécies de *Eucalyptus*.

Espécie	Idade (anos)	RGC * (%)	RLP (%)	RGNC (%)	RCF (%)
Eucalyptus maculata	7	34,86	45,69	19,45	26,63
	9	34,22	47,00	18,78	26,50
E. pellita	5	37,89	42,86	19,25	29,32
	6	37,45	43,24	19,31	28,38
	7	38,17	42,64	19,19	28,76
E. tereticornis	7	38,07	42,77	19,16	29,20
	8	38,30	42,33	19,37	29,23
E. urophylla	4	35,58	44,41	20,00	27,20
	5	36,51	44,35	19,15	28,10
	6	36,78	43,88	19,34	28,47
	7	36,48	45,07	18,45	28,02
E. grandis	3	34,33	46,74	18,93	26,23
	4	35,09	46,09	18,81	26,94
E. cloeziana	4	37,88	44,24	17,95	28,72
	6	36,18	46,76	17,06	27,13
	7	36,53	45,25	18,22	27,70
	8	36,54	46,85	16,61	27,38
	9	37,10	45,42	17,48	28,05
E. urophylla x *E. grandis*	5	36,49	45,06	18,46	27,71
	6	36,68	45,07	18,26	27,87
	7	36,86	45,12	18,02	27,97
E. dunnii	8	36,05	49,26	14,69	24,89
	13	35,06	49,73	15,21	24,37
	15	34,54	46,06	19,40	24,63
	19	36,16	47,69	16,15	24,98
E. camaldulensis	4	35,97	45,44	18,59	27,61
E. resinifera	4	36,37	44,87	18,76	27,95

* RGC, RLP, RGNC e RCF: rendimento gravimétrico da carbonização, em líquido pirolenhoso, gás não condensável e em carbono fixo.

Fonte: Trugilho (1995).

Vários são os processos que podem ser utilizados para a produção de carvão vegetal. Existem desde os processos mais primitivos, tais como medas ou caieiras, ou os fornos de alvenaria, até os processos que utilizam fornos metálicos e as retortas do processo contínuo (verticais ou horizontais na forma). Apesar da tecnologia associada ao processo contínuo, a grande maioria do carvão vegetal produzido no Brasil e no mundo é de forma artesanal, em que a participação dos fornos de alvenaria é dominante, especialmente os mais rudimentares, como os fornos rabo quente ou biscoiteiro.

Tabela 4 - Propriedades do carvão vegetal de algumas espécies de *Eucalyptus*.

Espécie	Idade (anos)	DRA * ($g\ cm^{-3}$)	TMV (%)	TCZ (%)	PCS ($kcal\ kg^{-1}$)	PCS ($kcal\ kg^{-1}$)
Eucalyptus maculata	7	0,514	22,37	1,23	76,40	7414
	9	0,554	21,70	0,85	77,45	7612
E. pellita	5	0,458	21,91	0,70	77,40	7484
	6	0,400	23,43	0,79	75,78	7471
	7	0,458	23,73	0,91	75,36	7315
E. tereticornis	7	0,532	22,39	0,90	76,71	7539
	8	0,490	22,74	0,62	76,64	7426
E. urophylla	4	0,404	23,01	0,56	76,44	7420
	5	0,436	22,30	0,71	76,99	7396
	6	0,482	21,87	0,69	77,44	7466
	7	0,398	22,53	0,64	76,83	7437
E. grandis	3	0,302	22,70	0,90	76,40	7351
	4	0,300	22,38	0,87	76,75	7392
E. cloeziana	4	0,482	23,98	0,21	75,81	7287
	6	0,414	24,67	0,36	74,98	7342
	7	0,450	23,77	0,40	75,83	7281
	8	0,494	24,66	0,39	74,95	7370
	9	0,510	24,12	0,26	75,63	7336
E. urophylla x *E. grandis*	5	0,368	23,49	0,58	75,93	7348
	6	0,386	23,44	0,56	75,99	7388
	7	0,398	23,64	0,48	75,88	7442
E. dunnii	8	0,400	30,96	0,35	69,06	-
	13	0,369	29,95	0,49	69,50	-
	15	0,443	28,32	0,41	71,32	-
	19	0,408	30,76	0,25	69,10	-
E. camaldulensis	4	0,474	22,52	0,68	76,79	7464
E. resinifera	4	0,450	22,72	0,43	76,85	7395

* DRA: densidade relativa aparente; TMV, TCZe TCF: teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo; PCS: poder calorífico superior.

Fonte: Trugilho (1995).

A produção de carvão vegetal é importante para diversos segmentos da economia brasileira, mas, especialmente, para o estado de Minas Gerais, estado que é o maior produtor e consumidor desse insumo, principalmente para atender às necessidades do setor siderúrgico. Na siderurgia, o carvão vegetal é dito ser termorredutor ou biorredutor, pois fornece energia e gás redutor (CO) para a transformação do minério de ferro em ferro-gusa.

Além da siderurgia, o carvão vegetal também é matéria-prima para a indústria cimenteira, padarias e uso doméstico. Pode-se também aproveitar os finos de carvão vegetal que, misturados com um material aglutinante, como amido e alcatrão, podem ser prensados para formar briquetes ou *pellets*, que têm sido utilizados em vários seguimentos industriais e domésticos, especialmente nos países europeus.

4. Considerações Finais

Como foi apresentado e discutido anteriormente, a madeira e a biomassa lignocelulósica, de forma geral, apresentam-se como excelentes matérias-primas para a produção de diversos tipos de combustíveis e energia. Apesar de serem consideradas um combustível de baixa densidade energética, é o material mais indicado para esta finalidade, pois representam uma fonte renovável e que gasta pouquíssima quantidade de energia na sua formação.

Nesse sentido, o Brasil se destaca em relação aos demais países do mundo, pois apresenta grande potencial de expansão na produção de biomassa em decorrência de fatores como a disponibilidade de terras agricultáveis e um clima favorável. Além disso, o Brasil detém tecnologias de utilização da energia da biomassa, tais como aquelas utilizadas para a produção de bioeletricidade e de carvão vegetal de uso siderúrgico.

Existem inúmeros processos de utilização da energia da biomassa lignocelulósica, sendo que, no Brasil, a combustão direta para geração de calor e vapor e a carbonização da madeira visando à produção de carvão vegetal são as formas mais difundidas. Contudo, se incentivos governamentais apropriados forem realizados, o país poderá ampliar e desenvolver o uso de outras rotas termoquímicas de conversão energética da biomassa, como a pirólise rápida e a gaseificação aliada à síntese catalítica de Fischer-Tropsch.

Finalmente, deve-se considerar o conceito das biorrefinarias e a possibilidade de integração de processos químicos, físicos, mecânicos e biológicos visando à produção de biocombustíveis diversos, bioeletricidade e biomateriais. Dessa forma, será possível utilizar integralmente a energia da biomassa e, assim, contribuir para a descentralização energética dos países, especialmente do Brasil, e minimizar o uso de fontes não renováveis de energia e, consequentemente, mitigar as emissões de gases causadores do efeito estufa.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à FAPEMIG e às Universidades Federais de Lavras (UFLA), do Espírito Santo (UFES) e de Goiás (UFG), Regional Jataí, pelo apoio recebido.

ENERGIA DA BIOMASSA FLORESTAL

Paulo Fernando Trugilho, Claudinéia Olímpia de Assis, Isabel Cristina Nogueira Alves de Melo,
Selma Lopes Goulart, Thiago de Paula Protásio, Marina Donária Chaves Arantes

1. Introdução

A biomassa de madeira é uma fonte de energia primária e renovável que, além de representar uma fonte de energia disponível, atua como importante fator de fixação do carbono atmosférico, contribuindo, dessa forma, com a redução do efeito estufa. Devido à sua variabilidade e gama de espécies adaptadas a diferentes condições ambientais, a madeira é um material de extraordinário valor ambiental, social e econômico. A madeira é, sem dúvida, o mais antigo combustível utilizado pelo homem.

Os combustíveis mais comuns encontrados na natureza são os chamados combustíveis hidrocarbonetos, isto é, aqueles que possuem um esqueleto predominantemente formado por carbono e hidrogênio. A maioria dos combustíveis tradicionais possui, na sua estrutura, carbono, hidrogênio e, algumas vezes, enxofre. A liberação de energia, a partir desses combustíveis, se dá pela entalpia de formação associada a estes elementos, especialmente o carbono e o hidrogênio.

A biomassa pode ser convertida em combustível, sob a forma sólida, líquida ou gasosa, em processos que variam de simples fornos ou até sofisticadas unidades industriais. Estes processos podem ser classificados em carbonização ou pirólise, combustão, gaseificação e hidrólise ácida ou enzimática.

Na avaliação da biomassa de madeira como matéria-prima para produção de energia, devem ser levadas em consideração várias características, além da sua composição química, elementar e imediata. Inicialmente, deve-se considerar as características de crescimento da planta, pois estas influem, significativamente, na produção de massa seca individual ou por área. Densidade básica, umidade e poder calorífico superior, inferior ou líquido são outras propriedades a serem consideradas.

Do ponto de vista químico, a madeira madura é formada por uma combinação complexa e interpenetrada de polímeros, constituída, basicamente, por carboidratos (holocelulose), lignina, componentes estranhos (extrativos) e elementos minerais, em que os teores de lignina e de extrativos são muito importantes do ponto de vista energético. A lignina é um componente aromático com alta estabilidade térmica, além de ser rica em carbono e com poder calorífico médio de 6.400 cal g^{-1}. Os extrativos são considerados como compostos que não fazem parte da estrutura da parede celular vegetal, sendo solúveis em água e em solventes orgânicos e volatilizados com vapor. Possuem elevado poder calorífico, podendo chegar a 8.300 calg^{-1}, dependendo do tipo de extrativo. O teor de minerais afeta negativamente o valor calórico do combustível, sendo, portanto, indesejável.

Com relação à umidade, a madeira é um material higroscópico, ou seja, possui a capacidade de absorver água do ambiente de exposição, o que acarreta perda significativa do seu potencial energético em virtude da perda de energia ocasionada durante a etapa de secagem do combustível. A umidade possui relação inversamente proporcional ao valor calórico da madeira ou de qualquer combustível.

O poder calorífico representa a medida da quantidade de energia que o material combustível libera quando queimado totalmente, dado normalmente em $calg^{-1}$ou $kcalkg^{-1}$ para os combustíveis sólidos e líquidos e em kcal Nm-3 para os combustíveis gasosos. A medida do poder calorífico é de extrema importância para a avaliação energética de qualquer combustível. Em todo combustível pode-se obter três tipos de poder calorífico, um chamado superior, outro inferior e, por fim, o líquido ou útil. A diferença entre eles é quanto à forma de obtenção e consideração ou não do calor latente do vapor de água e da umidade do combustível. A madeira possui poder calorífico variável, dependendo da espécie. Madeiras de coníferas possuem poder calorífico superior médio de 5.200 cal g^{-1}, enquanto que as madeiras de folhosas possuem poder calorífico superior médio de 4.500 cal g^{-1}. A composição química é a responsável por essa variação, estando relacionada diretamente ao teor de lignina e extrativos.

A densidade básica da madeira, da mesma forma que as características de crescimento, possui relação direta com a produção de matéria seca pelo vegetal. É uma característica importante e considerada, por diversos autores, como sendo um excelente índice de qualidade para diferentes produtos da madeira, pois está associada com outras propriedades intrínsecas da mesma. Entretanto, não se deve utilizar a densidade básica de forma isolada na classificação ou seleção de indivíduos para determinado tipo de uso da madeira.

2. Revisão de literatura

Para se entender a madeira como importante produto energético, deve-se, inicialmente, conhecer a sua composição química e elementar, suas propriedades energéticas, além das variações que normalmente ocorrem nesta matéria-prima.

2.1. A madeira e suas variações

A madeira é considerada um material desuniforme. Do ponto de vista químico, as grandes variações podem ser atribuídas às variações entre espécies, embora existam variações significativas dentro de uma mesma espécie em virtude da idade e de fatores genéticos e ambientais. Dentro de uma mesma espécie, a composição varia com a altura do tronco e com a distância a partir da medula em direção à casca. Além disso, há diferenças significativas entre cerne e alburno, madeira de início e madeira de fim de estação de crescimento. Em escala microscópica, observam-se diferenças até mesmo entre células individuais (BROWNING, 1963).

As características das madeiras variam de árvore para árvore, bem como dentro de troncos individuais. A variação no sentido radial é de longe a mais importante fonte de variação. A extensão dessa variação é determinada, principalmente, pela presença da madeira juvenil, por sua proporção relativa no tronco e pelas suas características físicas, químicas, mecânicas e anatômicas. Entretanto, a elevação do gradiente de variação dentro da zona juvenil diminui com o passar do tempo (MALAN, 1995). As variações durante o período juvenil são encontradas, principalmente, nas dimensões celulares e na organização da parede celular.

De modo geral, sabe-se que as variações das características da madeira correspondem a uma elevação rápida dos valores de densidade, comprimento de fibra, espessura da parede celular, etc.,

durante o período juvenil, até atingirem a maturidade, quando os valores se mantêm, geralmente, constantes. O período de juvenilidade é variável, podendo ser superior a 20 anos para alguns *Eucalyptus* de plantios comerciais na Austrália (JANKOWSKY, 1979). Segundo Koga (1988), o lenho juvenil é formado nos primeiros anos na região próxima da medula e sua duração é variável, podendo ocupar 85% do tronco em uma árvore de 15 anos e cerca de 10% aos 30 anos.

A madeira é formada por vários tipos de tecidos, sendo cada um composto por tipos diferentes de células que, na planta viva, realizam as três seguintes funções: a condução de água e sais minerais; o metabolismo, incluindo a estocagem de material de reserva; e o suporte mecânico. Para cada um desses propósitos vitais existem formas celulares definidas, tais como células condutoras que tendem a ser compridas, ocas, com paredes finas e pontuadas (BROWNING, 1963).

A variabilidade que ocorre nas madeiras é a responsável pelas diferentes possibilidades de usos desse notável material. A diversidade de espécies, suas variações naturais e sua adaptabilidade a diferentes tipos ambientes são responsáveis pelas variações que ocorrem no lenho das árvores e são fatores decisivos para a possibilidade de uso múltiplo da madeira.

2.2. A composição química da madeira

A composição química da madeira afeta a sua qualidade e a de seus derivados (VITAL et al., 1986). Com respeito à composição química elementar, não existem diferenças importantes, de modo geral, entre as madeiras, pois elas possuem, aproximadamente, 49-50% de carbono, 44-45% de oxigênio, 6% de hidrogênio, 0,1-1% de nitrogênio e 0,4-0,5% de compostos minerais (TSOUMIS, 1991). Esses elementos combinam-se para formar uma estrutura química complexa e altamente organizada, representada basicamente pela celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e compostos minerais. Além de contribuir com a formação da madeira, também participam da geração de energia para esta matéria-prima.

A composição química da madeira é complexa (Quadro 1). Os tecidos das madeiras são constituídos de muitos componentes químicos, que estão distribuídos desuniformemente, como resultado da estrutura anatômica, e que não estão presentes numa mistura física simples. Consequentemente, o comportamento químico das madeiras não pode ser deduzido em detalhes a partir das propriedades de suas substâncias componentes. A maior parte da substância madeira é composta de materiais de alto peso molecular e tem sido apropriadamente descrita como sendo um sistema interpenetrado de polímeros (BROWNING, 1963).

Quadro 1 - Composição química das madeiras.

- Celulose ----------	40 - 45%
- Hemiceluloses ----------	15 - 35% (folhosas) e 20- 30% (coníferas)
- Lignina ----------	18 - 25% (folhosas) e 25- 35% (coníferas)
- Extrativos ----------	3 - 8%
- Cinzas ----------	0,4 - 0,5%

Fonte: Lewin; Goldstein (1991) e Tsoumis (1991).

A celulose, principal componente da parede celular e do esqueleto polissacarídeo, é um polímero linear, constituído de unidades *-D-anidroglicopiranose unidas por ligações glicosídicas do tipo

1-4 para formar a celobiose, que é a unidade de repetição da cadeia, possuindo uma estrutura cristalina e não ramificada (LEWIN; GOLDSTEIN, 1991). A celulose nativa é parcialmente cristalina e o seu grau de polimerização está compreendido entre 9.000 e 10.000, podendo chegar a até 15.000 unidades de glicose. A celulose da parede primária é polidispersa, isto é, possui larga distribuição de peso molecular, tendo, relativamente, baixo peso molecular, e a celulose da parede secundária é monodispersa, isto é, possui estreita distribuição e alto peso molecular (PETTERSEN, 1984). É o composto orgânico mais comum na natureza, sendo insolúvel em solventes orgânicos, em água, em ácidos e em álcalis diluídos, todos à temperatura ambiente.

As hemiceluloses são polímeros de polissacarídeos com baixo peso molecular, que estão fortemente associados à celulose nos tecidos das plantas. São polímeros geralmente amorfos, constituídos de uma cadeia central de unidades representativas e de cadeias laterais. De acordo com Lewin e Goldstein (1991) e Pettersen (1984), elas são formadas por uma combinação de polissacarídeos sintetizados na madeira, sendo formadas por outros açúcares além da glucose, tanto hexoses como pentoses, tais como a manose, a galactose, a xilose, a arabinose, o ácido 4-O-metilglucurônico e por resíduos de ácido galactourônico. Geralmente, possuem um peso molecular menor que o da celulose, com grau de polimerização que varia de menos de 100 a até 200 unidades de açúcar e são ramificadas. Estão intimamente associadas à celulose e parecem contribuir como componente estrutural da planta. Algumas estão presentes, anormalmente, em grandes quantidades quando a planta está sob estresse. A madeira de compressão tem um maior conteúdo de galactose do que a madeira normal, bem como maior conteúdo de lignina. As hemiceluloses, geralmente, são solúveis em álcalis e facilmente hidrolisadas por ácidos por causa da sua estrutura amorfa e do baixo peso molecular.

A celulose e as hemiceluloses formam a fração de carboidratos da madeira que é denominada de holocelulose. A holocelulose é desejável para a indústria de celulose e papel, pois determina as características da polpa, como resistência e rendimento. As hemiceluloses, entretanto, são indejesáveis para a indústria de derivados da celulose.

A lignina é uma macromolécula amorfa, de caráter fenólico, tridimensional, de composição química muito complexa, formada por unidades de fenilpropano, ligadas por substituição hidroxílica e metoxílica, tendo uma cadeia altamente ramificada. A lignina é formada por polimerização desidrogenativa, catalisada por enzimas. É uma substância fenólica, sendo o componente mais hidrofóbico da madeira, atuando como material cimentante ou adesivo entre as fibras (PETTERSEN, 1984), além de conferir dureza e rigidez à parede celular.

A lignina é uma macromolécula natural derivada da polimerização desidrogenativa enzimática dos três álcoois precursores, trans-p-coumárico, trans-coniferílico e trans-sinapílico (SARKANEN; LUDWIG, 1971). Apesar de a lignina ser formada pela combinação dos três tipos de álcoois, o álcool coniferílico é o principal precursor da lignina das madeiras de coníferas, 85 a 90% de unidades aromáticas guaiacil, e os álcoois coniferílicos e sinapílicos são ambos precursores da lignina das madeiras de folhosas, razão que varia de 1:4 a 2:1 de unidades guaiacil e siringil, aproximadamente. Neste caso, a lignina é mais complexa e sobre a qual há menos informações disponíveis (SJÖSTRÖM, 1993).

A lignina ocorre na maioria das plantas, estando ligada quimicamente às hemiceluloses e sendo depositada na parede celular e na lamela média. Embora a maior quantidade exista na parede secundária

da fibra, a maior concentração de lignina é encontrada na lamela média composta, especialmente nos cantos das células (SJÖSTRÖM, 1993). O papel biológico da lignina nas plantas vivas é formar, junto com a celulose e outros carboidratos da parede celular, um tecido de excelente resistência e durabilidade.

A existência de ligações covalentes entre a lignina e os polissacarídeos tem sido objeto de estudos intensivos e de debates. Esta questão é de grande interesse, especialmente quando há necessidade de separar os polissacarídeos da lignina. Ligações químicas têm sido relatadas entre a lignina e praticamente todos os constituintes das hemiceluloses. Estas ligações podem ser do tipo éter ou éster, sendo as ligações éter as mais comuns e mais estáveis. Existe indicação de que a lignina da lamela média e a da parede primária estão associadas com os polissacarídeos pécticos, tais como a galactana e a arabinana, por meio de ligações éter (SJÖSTRÖM, 1993).

Segundo Sjöström (1993), as unidades de fenilpropano são mantidas juntas, tanto por ligações éter (C-O-C) como por carbono-carbono (C-C). A ligação éter é dominante; aproximadamente 2/3 ou mais das ligações da lignina são desse tipo e o restante é do tipo carbono-carbono.

A lignina é o principal componente estrutural da madeira, quando esta se destina à produção de carvão vegetal. Além de contribuir para formação do carvão, é, também, o principal responsável pela formação do alcatrão insolúvel (OLIVEIRA; VIVACQUA FILHO; GOMES, 1982). De acordo com e Shafizadeh e Chin (1977) e Oliveira, Vivacqua Filho e Gomes (1982), a 400°C, a celulose e as hemiceluloses resultam num rendimento em carvão de, aproximadamente, 10 a 13%, respectivamente. Já a lignina, nessa mesma temperatura, proporciona rendimentos de, aproximadamente, 55% de carvão.

Os extrativos são componentes acidentais que não fazem parte da estrutura da composição química da parede celular. Incluem um elevado número de compostos, sendo que muitos podem ser solúveis em água quente, álcool, benzeno e outros solventes neutros. Pertencem a diferentes grupos químicos, como as resinas, os açúcares, os taninos, os ácidos graxos, entre outros, os quais influenciam as propriedades da madeira. Segundo Pettersen (1984), a presença de alguns desses compostos influencia a resistência ao ataque de fungos e insetos, a coloração, o odor, a permeabilidade, a densidade e a dureza da madeira. Podem constituir até 8% da massa seca de madeiras normais de espécies de clima temperado, podendo chegar a até 20% em madeiras normais de espécies de clima tropical. Também podem aumentar o valor calórico das madeiras, dependendo do tipo de extrativo.

O conteúdo dos componentes minerais na madeira é normalmente pequeno e pode incluir óxidos de cálcio, potássio, fósforo, magnésio, entre outros. Usualmente, é menor que 1% em madeiras de zona temperada e é ligeiramente maior em madeiras de climas tropicais. De acordo com Tsoumis (1991), o conteúdo de cinzas raramente é menor que 0,2% ou maior que 1% da massa seca das madeiras. Especificamente para a madeira do gênero Eucalyptus, a quantidade de cinzas raramente chega a 1% da sua massa seca. A porção mineral é prontamente repassada ao carvão vegetal, sendo que a presença de alguns desses componentes, como o cálcio, o fósforo e o enxofre, em dosagens elevadas, é prejudicial, e até mesmo limitante, para determinadas finalidades industriais.

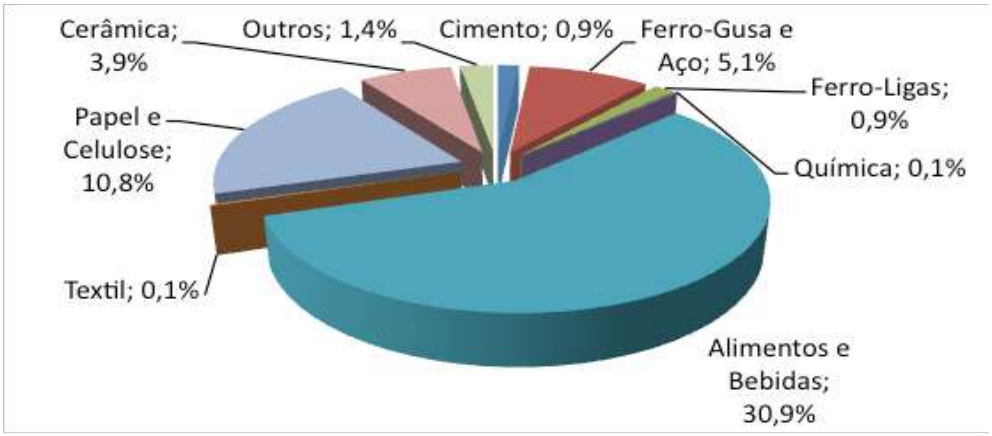
Muitas outras substâncias ocorrem na madeira, usualmente em pequenas quantidades e, em muitos casos, em somente uns poucos gêneros e espécies. Entre esses compostos estão incluídos os ciclitois (álcoois polihídricos cíclicos), aldeídos, hidrocarbonetos e alcalóides. Os ácidos dibásicos também podem ocorrer, normalmente, na forma de sais de cálcio (carbonato e oxalato de cálcio) (BROWNING, 1963).

Todos estes compostos que a madeira produz influem de forma positiva no seu valor calórico, exceto o teor de minerais, com relação inversa ao poder calorífico da madeira.

2.3. Panorama do uso energético da madeira no Brasil

No Brasil, a madeira e o carvão vegetal são utilizados amplamente como fonte de energia. Existe uma tradição no emprego dos recursos naturais renováveis, em que a energia hidráulica, a lenha, o bagaço de cana e outras fontes primárias contribuíram com 42,4% da oferta interna de energia. Neste contexto, a lenha e o carvão vegetal contribuíram com 9,1% desse total (BRASIL, 2013). A Figura 1 ilustra a distribuição, por fonte energética, da oferta interna de energia. Verifica-se uma distribuição bem equilibrada entre as fontes de energia, renovável e não renovável, que compõem a matriz energética brasileira. Nesse cenário, a biomassa, de forma geral, representa 24,5% da oferta interna de energia.

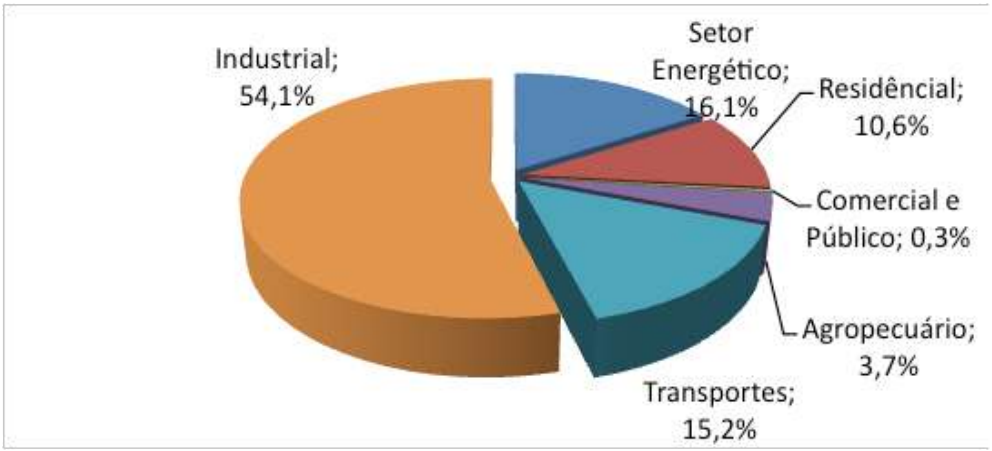
Figura 1 - Distribuição da oferta interna de energia por fonte energética.



Fonte: BRASIL (2013).

Vários setores da economia brasileira utilizam a lenha e seus derivados como fonte de energia. A Figura 2 ilustra a composição setorial do consumo final de biomassa. Observa-se que o setor industrial é o grande consumidor da biomassa como fonte de energia (54,1%), seguido pelo setor energético e de transportes. O setor comercial e público participa com somente 0,2%.

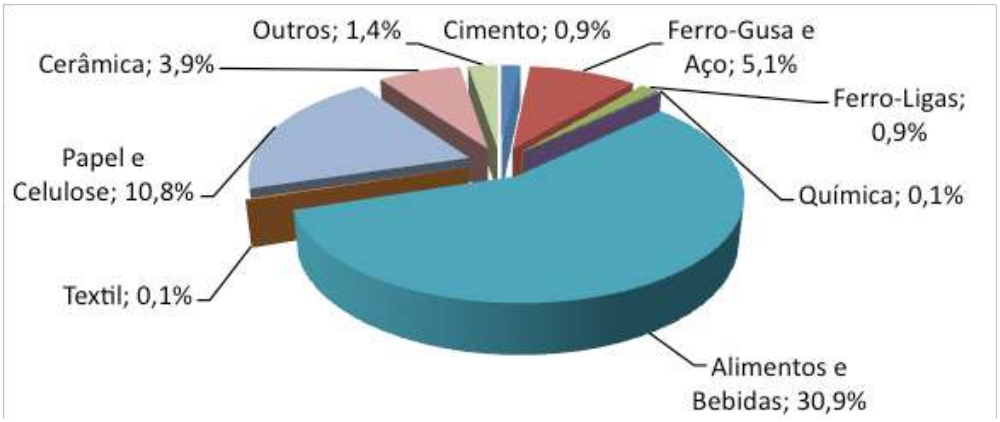
Figura 2 - Composição setorial do consumo final de biomassa.



Fonte: BRASIL (2013).

A Figura 3 ilustra os principais setores industriais consumidores de biomassa. Verifica-se que o setor de bebidas e alimentos (30,9%) utiliza a biomassa intensivamente, enquanto que setores como o de cimento (0,9%), químico (0,1%) e têxtil (0,1%) são os que menos utilizam a biomassa.

Figura 3 - Composição do setor industrial no consumo final de biomassa.



Fonte: BRASIL (2013).

2.4. Formas de uso da madeira para energia

As formas mais comuns de energia fotossintética são obtidas da madeira e do carvão vegetal. Outras formas menos comuns são os líquidos e gases gerados da madeira e do carvão vegetal nos processos de destilação seca e gaseificação (MARTINS, 1982). Atualmente, a hidrólise, ácida ou enzimática, de material lignocelulósico visando à produção de etanol de segunda geração já é uma realidade. Diversos países, como os Estados Unidos, têm investido intensivamente nessa linha de pesquisa, obtendo resultados bem satisfatórios, porém a um custo elevado.

No caso da biomassa de madeira, o Brasil aparece como destaque tanto em relação à área de florestas nativas como de plantações, especialmente as de eucaliptos, uma das maiores do mundo. As espécies de eucalipto introduzidas inicialmente no Brasil foram selecionadas, obedecendo ao zoneamento ecológico para reflorestamento proposto por Golfari e Pinheiro Neto, em 1970.

Posteriormente, passaram a ser consideradas as características de crescimento da planta e, atualmente, diversas propriedades da madeira já são utilizadas como referência nos programas de genética e melhoramento florestal. Dentro desses programas de melhoramento genético florestal, as características da madeira consideradas estão sempre relacionadas ao produto que se deseja obter.

Com relação ao plantio de florestas, Minas Gerais é o estado que possui a maior área reflorestada com clones e espécies de Eucalyptus no Brasil, contendo uma área aproximada de 1,8 milhões de hectares e um plantio anual da ordem de 137.280 hectares em 2008, representando 90% de toda área reflorestada no Brasil com florestas energéticas (ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA, 2010). Esta matéria-prima é utilizada, especialmente, para a produção de carvão vegetal, visando o abastecimento do setor siderúrgico.

Porém, devido ao melhoramento genético, diferentes genótipos também estão sendo plantados para atender à indústria moveleira. Existe ainda muito a ser feito em relação a esta temática,

mas hoje já é possível utilizar a madeira do eucalipto para a confecção de diferentes produtos, tais como peças usinadas para móveis de alta qualidade e para a construção civil. Outros estados também vêm aumentando a sua área reflorestada com espécies ou clones de Eucalyptus, sendo a destinação dessa madeira para produção de carvão vegetal e energia em estados como Maranhão, Goiás e Pará.

Especialmente em Minas Gerias, os plantios estão distribuídos em diferentes regiões do estado, com diferentes taxas de incremento volumétrico e qualidade da madeira. Segundo Zobel e Jett (1995), a diferença na performance dos materiais genéticos está associada à influência intrínseca do genótipo, do ambiente e da interação genótipo x ambiente, além da idade.

O incremento volumétrico da árvore e a densidade básica da madeira influenciam, significativamente, a produção de massa seca do indivíduo, característica importante do ponto de vista energético. Tanto o volume individual da árvore como a densidade básica e a estimativa de massa seca estão sob um forte controle genético. Botrel (2006) calculou em 86,52, 82,93 e 83,50% os coeficientes de determinação genotípica, respectivamente, para o volume individual, densidade básica e estimativa de massa seca em nove clones de eucaliptos plantados na região norte de Minas Gerais. Esta informação é relevante e demonstra que estas características influenciarão a seleção de materiais genéticos de maior potencial de crescimento, densidade básica e estimativa de massa, ou seja, com maior taxa de conversão CO^2 em matéria-prima sólida para a conversão energética, contribuindo também de forma positiva com a redução desse gás na atmosfera e do efeito estufa. Segundo Oliveira et al. (1991), a quantificação de massa de madeira é preferível para o uso energético, mais do que a utilização de parâmetros dendrométricos, tais como o diâmetro, a altura e o volume de madeira.

Apesar do notável aumento na produção de carvão vegetal em Minas Gerais, originado de reflorestamentos, existe, ainda, uma grande participação das florestas nativas. Quase a totalidade dessa produção de carvão vegetal é destinada ao abastecimento do setor siderúrgico e apenas uma pequena parcela é destinada aos outros setores da economia mineira. Deve ser ressaltado que as florestas nativas possuem grande variabilidade de espécies florestais e, sendo a madeira um material desuniforme, tanto do ponto de vista físico e químico, como estrutural e anatômico, espera-se que essa variabilidade seja repassada ao carvão vegetal, que é um produto dependente, além de outros fatores, das características da madeira que lhe deu origem. Esta variabilidade no carvão vegetal prejudica o funcionamento ideal dos altos fornos, contribuindo para a redução do seu rendimento e eficiência, afetando negativamente a relação gusa reduzido por carvão consumido.

Em virtude das pressões da própria sociedade, bem como de grupos ambientalistas organizados, as empresas consumidoras de madeira estão sendo direcionadas no sentido de se tornarem autossuficientes em espaço de tempo relativamente curto. Há necessidade de aprimoramento das técnicas florestais para que permitam aumentar a participação das florestas artificiais no fornecimento de madeira aos setores consumidores desse insumo, especialmente o setor siderúrgico.

Dessa forma, torna-se necessário o desenvolvimento de pesquisas, vinculando as características tecnológicas da madeira ao melhoramento genético, visando à obtenção de florestas de alta produtividade e que estas possuam qualidade adequada segundo a utilização final da madeira. Com isso, o aumento das áreas destinadas ao reflorestamento poderia ser reduzido consideravelmente.

Durante muito tempo, a seleção de árvores matrizes, dentro dos programas de melhoramento florestal no Brasil, utilizava valores fenotípicos das características de crescimento, mais especificamente preocupava-se com a produção volumétrica da floresta. Isso, contudo, não assegura a qualidade da árvore selecionada para a sua melhor utilização. Torna-se, assim, necessário incluir índices de qualidade, com base nas características físico-químicas e anatômicas da madeira, nos programas de melhoramento florestal, visando à obtenção de genótipos superiores para determinadas finalidades.

A seleção de espécies florestais que produzam madeira com ótimas características para abastecer os diversos setores industriais já é uma realidade. Estudos que envolvem a qualidade da madeira, com base nas suas características físico-químicas e anatômicas, desejáveis à conversão energética, são necessários para se otimizar a produção de carvão vegetal e, assim, aliviar a pressão sobre os desmatamentos predatórios das florestas nativas. Dentro desse contexto, propriedades como a composição química, elementar e imediata, o poder calorífico, as estimativas de massa seca produzida por área e as análises térmicas (TG e DSC) são importantes sob a ótica do uso energético.

Nesse sentido, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas visando determinar as espécies de *Eucalyptus* mais aptas para serem utilizadas como insumo energético. Os resultados obtidos até o momento confirmam o grande potencial de alguns materiais genéticos já selecionados e disponibilizados em plantios comerciais das empresas do setor florestal. Todavia, a busca constante por novos e mais produtivos materiais genéticos é uma realidade e as empresas florestais têm o pleno conhecimento disso, além de procurar, cada vez mais, investir recursos financeiros no atendimento dessa atividade.

2.4. Propriedades desejáveis na madeira para o uso energético

Como abordado anteriormente, a madeira é um notável material. Possui qualidade para ser aplicada em várias utilizações. Em relação ao uso energético, a madeira deve possuir algumas propriedades que a qualifique para esta nobre aplicação.

2.4.1. Densidade básica

A densidade básica da madeira é considerada como sendo um excepcional índice de qualidade. Esta afirmação é fundamentada em relação à grande associação da densidade básica com diversas outras propriedades da madeira. Trata-se do menor valor numérico de densidade que se pode obter na madeira, pois é representada pela relação entre a massa seca, ou seja, a menor massa, e o volume verde ou saturado, o maior volume. Esta característica influencia diretamente a densidade energética do combustível, no caso a madeira. Também está relacionada com a densidade relativa aparente do carvão vegetal, pois a madeira mais densa produzirá um carvão mais denso. A densidade relativa aparente é uma importante característica do carvão vegetal destinado ao setor siderúrgico.

As espécies de Eucalyptus possuem grande variação da densidade básica da madeira, o que representa uma possível consequência, por exemplo, do efeito do genótipo, da idade e do local de plantio (Tabela 1), podendo isso influenciar a densidade aparente do carvão vegetal.

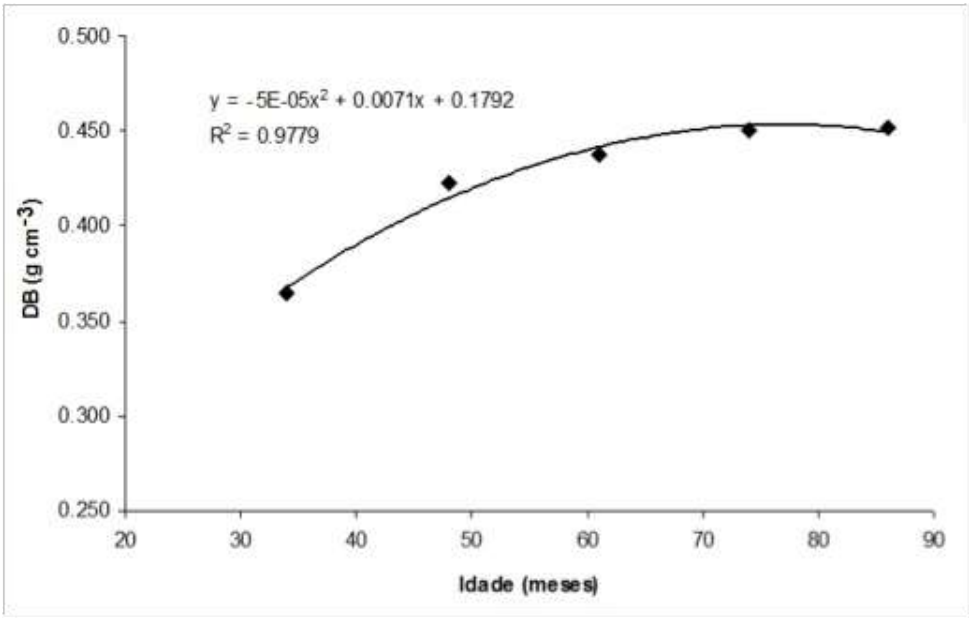
Tabela 1 - Densidade básica da madeira (DB) e densidade relativa aparente do carvão vegetal (DRA) para algumas espécies de *Eucalyptus* em diferentes idades.

ESPÉCIE	IDADE	DB ($g\ cm^{-3}$)	DRA ($g\ cm^{-3}$)
Eucalyptus dunnii	8	0,464	0,400
	13	0,511	0,369
	15	0,547	0,443
	19	0,483	0,408
E. propinqua	9	0,623	0,420
	4	0,490	0,404
E. urophylla	5	0,498	0,436
	6	0,560	0,482
	7	0,510	0,398
E. saligna	5	0,569	0,346
E. microcoris	5	0,556	0,350
	4	0,508	0,290
E. cloeziana	6	0,562	0,414
	7	0,590	0,450
	8	0,630	0,494
	9	0,642	0,510
E. camaldulensis	4	0,584	0,474
E. grandis	3	0,393	0,302
	4	0,406	0,231
	9	0,564	0,360
E. resinifera	4	0,562	0,450
	5	0,474	0,368
E. urophylla x E. grandis	6	0,513	0,386
	7	0,518	0,398
E. pellita	5	0,544	0,458
	6	0,533	0,400
	7	0,545	0,458
E. tereticornis	7	0,614	0,532
	8	0,585	0,490
E. maculata	5	0,643	0,440
	7	0,631	0,514
	9	0,685	0,554

Fonte: Trugilho (1995).

Santana (2009) avaliou o efeito da idade (34, 48, 61, 74 e 86 meses) do material genético sobre a densidade básica da madeira em um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Esta relação pode ser observada na Figura 4. Verifica-se que a densidade básica da madeira possui tendência de aumento com a idade do material genético, porém com menores incrementos nas idades mais avançadas.

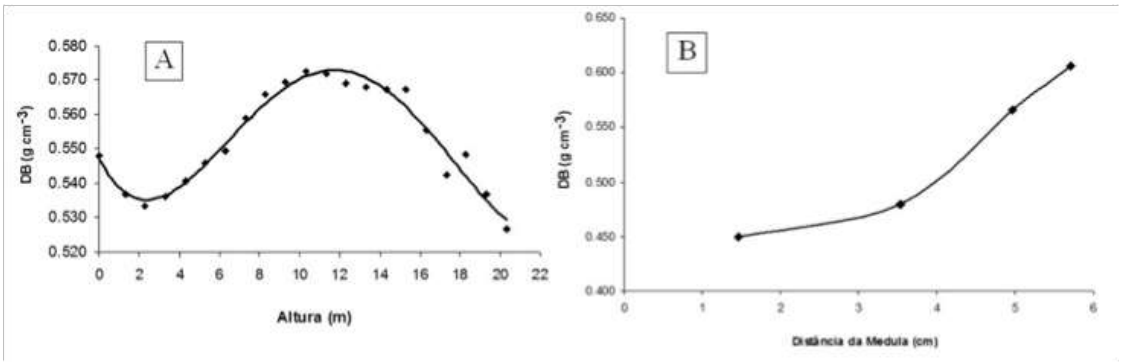
Figura 4 - Efeito da idade do material genético sobre a densidade básica (DB) da madeira de um clone de *Eucalyptus sp*.



Fonte: Santana (2009).

Como a maioria das propriedades da madeira, a densidade básica possui grande variação dentro do lenho no sentido da base para o topo da árvore, mas especialmente no sentido da medula para a casca. Pádua (2009) estudou os padrões de variação longitudinal e radial da madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos seis anos de idade. A autora ajustou modelos de regressão que descreveram o comportamento da densidade básica em três diferentes classes diamétricas. A Figura 5 ilustra o padrão de variação da densidade básica da madeira nos sentidos longitudinal e radial observado por Pádua (2009). Verifica-se que a variação radial tem maior magnitude que a longitudinal, o que está de acordo com o relatado por Malan (1991, 1995).

Figura 5 - Padrão de variação longitudinal (A) e radial (B) da densidade básica.

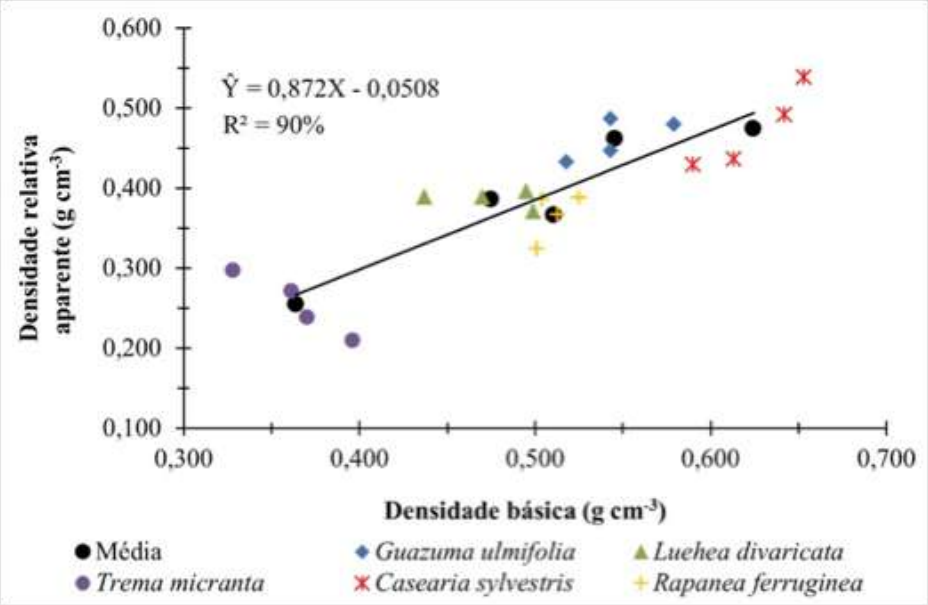


Fonte: Pádua (2009).

Com relação ao carvão vegetal, a sua densidade relativa aparente possui alta relação com a densidade básica da madeira. Observa-se na Figura 6 que existe uma relação funcional direta e significativa

entre a densidade básica da madeira e a densidade relativa aparente do carvão vegetal. Além disso, quanto maior for a densidade básica da madeira, maior será a densidade energética do combustível.

Figura 6 - Relação entre a densidade básica da madeira e a densidade relativa do carvão vegetal em espécies nativas do cerrado.



Fonte: Adaptado de Costa et al. (2014).

2.4.2. Composição química

Na madeira e nos combustíveis tradicionais pode-se obter informação a respeito da composição química, elementar e imediata. A composição química se refere aos componentes químicos que formam a estrutura da madeira. Nesse caso, a madeira é um material composto por diferentes componentes químicos, os quais desempenham funções especificas.

Na Tabela 2 estão os valores médios das características químicas da madeira de diferentes espécies de *Eucalyptus* e em várias idades. Observa-se que as madeiras das espécies de *Eucalyptus* possuem baixo teor de cinzas e elevado teor de lignina, o que é importante para o uso energético.

Tabela 2 - Valores médios das características químicas da madeira de diferentes espécies de eucalipto e em várias idades.

Espécie	Idade (anos)	Teor de (%)			
		Cinzas	Extrativos	Lignina	Holocelulose*
Eucalyptus maculata	7	0,68	4,01	23,74	72,48
	9	0,47	5,24	22,96	72,47
E. dunnii	8	0,34	2,51	25,12	72,04
	13	0,22	2,91	24,96	71,92
	15	0,31	2,26	24,47	72,96
	19	0,32	2,10	24,16	73,42

E. pellita	5	0,50	7,34	30,12	64,11
	6	0,38	5,43	30,48	65,28
	7	0,49	7,32	31,33	62,99
E. tereticornis	7	0,50	10,37	31,92	60,21
	8	0,39	6,50	31,65	63,39
E. urophylla	4	0,24	3,73	28,63	68,43
	5	0,42	7,40	28,40	65,74
	6	0,39	9,06	27,16	65,64
	7	0,34	5,47	29,03	66,67
E. grandis	3	0,71	2,49	28,05	69,44
	4	0,55	3,18	28,93	68,23
E. cloeziana	4	0,12	5,61	29,95	65,90
	6	0,27	4,28	29,53	67,13
	7	0,22	5,41	27,88	67,92
	8	0,20	5,14	30,27	65,87
	9	0,15	7,85	27,75	66,27
E. grandis x E. urophylla	5	0,35	3,03	29,17	68,31
	6	0,29	6,06	28,75	66,55
	7	0,29	4,34	28,52	68,04
E. camaldulensis	4	0,29	4,33	31,50	65,19
E. resinifera	4	0,27	1,97	31,09	67,26

* Holocelulose = 100 – (cinzas + extrativos + lignina).

Fonte: Trugilho (1995).

Os teores de lignina e extrativos são os mais interessantes, do ponto de vista energético da madeira, devido ao elevado valor calórico associado a estes componentes. O elevado valor calórico da lignina e extrativos se deve à sua estrutura química, ao tipo de ligação química das estruturas e ao mais elevado conteúdo de carbono e hidrogênio em relação aos carboidratos (BRAND, 2010). Além disso, a lignina é o componente químico mais resistente à decomposição térmica, estando diretamente relacionada com a produção do carvão vegetal.

Na Tabela 3 estão os valores médios de componentes químicos elementares observados na madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus* em diferentes idades, enquanto que na Tabela 4 estão os valores médios da composição química elementar de diferentes clones de *E. urophylla* e *E. grandis*, respectivamente, aos 54 meses de idade, plantados em teste clonal em Minas Gerais.

Observa-se na Tabela 3 que os valores dos componentes elementares não variaram muito com a idade, exceto o teor de nitrogênio, e que as relações C/N mais favoráveis, ou seja, as maiores relações, ocorreram nas idades mais avançadas. Resultados similares ocorreram na madeira dos diferentes clones de Eucalyptus avaliados (Tabela 4).

Tabela 3 - Efeito da idade do material genético sobre a composição química elementar da madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus*.

Idade (meses)	Porcentagem (%) *					C/H	C/N
	C	H	N	S	O		
34	48,72	6,68	0,13	0,06	44,41	7,29	374,77
48	48,74	6,74	0,13	0,12	44,27	7,23	374,92
61	48,72	6,55	0,12	0,05	44,57	7,44	406,00
74	48,65	6,55	0,10	0,04	44,66	7,43	486,50
86	48,93	6,61	0,09	0,05	44,33	7,40	543,67

* C = carbono, H = hidrogênio, N = nitrogênio, S = enxofre e O = oxigênio.

Fonte: Santana (2009).

A composição química elementar se refere aos teores dos elementos químicos que formam a madeira. Neste contexto, a madeira é formada por carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e enxofre em pequenas quantidades. Estes elementos não variam muito entre as espécies de forma geral, exceto o nitrogênio e o enxofre.

Segundo Brand (2010), a composição química elementar constitui a base dos cálculos de combustão, pois é a partir da porcentagem de cada elemento, especialmente o carbono e o hidrogênio, que pode ser determinado o potencial energético de um combustível. Pode-se considerar a composição química elementar a característica mais importante dos combustíveis.

Tabela 4 - Composição química elementar de diferentes clones de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* aos 54 meses de idade.

Clone	Porcentagem (%) *					C/H	C/N
	C	H	N	S	O		
U060	48,13	6,43	0,09	0,07	45,28	7,49	534,78
U083	49,45	6,29	0,09	0,07	44,09	7,86	549,44
U034	48,95	6,30	0,10	0,30	44,35	7,77	489,50
U073	47,99	6,16	0,08	0,09	45,68	7,79	599,88
U127	49,41	6,36	0,09	0,07	44,07	7,77	549,00
U028	49,82	6,30	0,06	0,07	43,74	7,91	830,33
U133	48,42	6,28	0,07	0,13	45,09	7,71	691,71
U108	47,65	6,19	0,08	0,24	45,83	7,70	595,63
U260	49,34	6,36	0,10	0,12	44,08	7,76	493,40
U030	49,88	6,44	0,09	0,03	43,55	7,75	554,22
U063	49,31	6,28	0,09	0,18	44,13	7,85	547,89
U058	50,27	6,43	0,08	0,06	43,16	7,82	628,38
U026	49,45	6,28	0,09	0,08	44,09	7,87	549,44
U271	49,22	6,19	0,11	0,08	44,40	7,95	447,45
U102	49,68	6,32	0,12	0,19	43,69	7,86	414,00
Média	49,13	6,31	0,09	0,12	44,35	7,79	565,00
Mínimo	47,65	6,16	0,06	0,03	43,16	7,49	414,00
Máximo	50,27	6,44	0,12	0,30	45,83	7,95	830,33

G127	49,81	6,34	0,10	0,05	43,71	7,86	498,10
G006	49,23	6,39	0,09	0,27	44,03	7,70	547,00
G114	49,17	6,34	0,10	0,25	44,14	7,76	491,70
G094	49,49	6,38	0,10	0,22	43,81	7,76	494,90
G118	48,85	6,28	0,10	0,24	44,52	7,78	488,50
G022	49,38	6,30	0,10	0,04	44,18	7,84	493,80
G122	50,30	6,42	0,09	0,02	43,17	7,83	558,89
G084	49,72	6,32	0,07	0,06	43,83	7,87	710,29
G023	49,69	6,37	0,10	0,06	43,78	7,80	496,90
G008	48,94	6,31	0,10	0,23	44,41	7,76	489,40
Média	49,46	6,35	0,10	0,14	43,96	7,79	526,95
Mínimo	48,85	6,28	0,07	0,02	43,17	7,70	488,50
Máximo	50,30	6,42	0,10	0,27	44,52	7,87	710,29

* C = carbono, H = hidrogênio, N = nitrogênio, S = enxofre e O = oxigênio.

Fonte: Couto (2011).

Para utilizar a madeira ou a biomassa como fonte de energia, deve-se conhecer os teores de nitrogênio e enxofre, pois elevadas quantidades desses elementos têm impacto negativo no meio ambiente e na saúde humana devido às emissões de gases de óxido nítrico (NO_x) e dióxido de enxofre (SO_2), produzidos durante a combustão. Além disso, estes gases podem provocar problemas de corrosão nos equipamentos de combustão ou queima (OBERNBERG et al., 2006; MUNALULA; MEINCKEN, 2009).

Considerando a variação longitudinal e radial do fuste das árvores, Arantes (2009) observou que o teor de carbono tende a reduzir e os teores de hidrogênio e oxigênio tendem a aumentar com o aumento da distância da medula. Esta autora verificou ainda que o teor de carbono foi maior nas partes mais basais da árvore e que os teores de hidrogênio e oxigênio não possuem grandes variações com a altura relativa nas classes diamétricas avaliadas. A autora encontrou valores médios de 49,74%, 6,36%, 0,18% e 43,74% para os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio, respectivamente, na madeira de clone hibrido de *E. grandis* x *E. urophylla* aos 6 anos de idade.

A composição química imediata quantifica os teores de umidade, material volátil, cinzas e, por diferença, de carbono fixo. Esta análise é útil para quantificar os materiais que fornecem energia no estado gasoso e sólido. Na madeira, geralmente, obtêm-se grandes quantidades de material volátil e pequeno conteúdo de carbono fixo, ocorrendo o inverso com o carvão vegetal. O teor de carbono fixo é inversamente proporcional ao de materiais voláteis.

Segundo Brand (2010), o teor de materiais voláteis, representado pelos componentes do combustível volatilizados em temperatura elevada e atmosfera inerte, influencia, consideravelmente, as fases da combustão e a ignição do material. Com exceção do carvão (mineral ou vegetal), os demais combustíveis sofrem volatilização da maior parte de seus componentes químicos antes de se queimarem totalmente. Após essa etapa, a forma gasosa se mistura com o oxigênio disponível, promovendo reações de combustão homogênea.

Dessa forma, o conhecimento dos teores de materiais voláteis e do carbono fixo é importante para se estimar o grau de combustão dos combustíveis. Combustíveis com elevados teores de carbono fixo e baixos teores de materiais voláteis deverão queimar mais lentamente e, portanto, poderão requerer

maior tempo de residência para a sua queima total. De forma geral, a madeira possui de 75 a 85% de materiais voláteis e de 15 a 25% de carbono fixo, enquanto que o carvão vegetal possui valores inversos de carbono fixo e de materiais voláteis. No carvão vegetal, os teores de carbono fixo e de materiais voláteis sofrem influência direta da temperatura final de carbonização (PROTÁSIO et al., 2014).

Na Tabela 5 estão os valores médios da análise química imediata da madeira de diferentes clones de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* aos 54 meses de idade.

Tabela 5 - Análise química imediata da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* (G) e *Eucalyptus urophylla* (U) aos 54 meses de idade.

Clone	Ubs (%) *	TMV (%)	TCz (%)	TCF (%)
G006	11,42	84,85	0,10	15,05
G008	10,56	83,84	0,01	16,14
G022	10,85	83,90	0,03	16,07
G023	11,98	82,94	0,04	17,03
G084	10,76	85,38	0,01	14,61
G094	10,81	83,80	0,10	16,11
G114	10,32	84,20	0,15	15,66
G118	10,80	83,38	0,09	16,53
G122	10,31	84,32	0,07	15,60
G127	10,56	84,71	0,03	15,27
Média	10,84	84,13	0,06	15,81
Máximo	11,98	85,38	0,15	17,03
Mínimo	10,31	82,94	0,01	14,61
U026	9,58	85,78	0,06	14,16
U028	9,62	86,09	0,06	13,86
U030	4,67	85,68	0,11	14,21
U034	15,25	86,11	0,12	13,77
U058	9,65	85,14	0,06	14,80
U060	11,73	86,55	0,07	13,39
U063	9,47	86,42	0,05	13,53
U073	9,21	85,36	0,04	14,60
U083	10,61	88,28	0,04	11,68
U102	9,61	86,43	0,07	13,51
U108	9,36	87,09	0,07	12,84
U127	9,62	87,13	0,05	12,82
U133	9,40	87,29	0,07	12,65
U260	9,23	85,42	0,04	14,53
U271	10,65	85,39	0,06	14,55
Média	9,84	86,28	0,06	13,66
Máximo	15,25	88,28	0,12	14,80
Mínimo	4,67	85,14	0,04	11,68

* Ubs = umidade em base seca, TMV = teor de materiais voláteis, TCz = teor de cinzas, e TCF = teor de carbono fixo (todos em base seca).

Fonte: Elaborado pelos autores.

Pela Tabela 5 verifica-se que os clones do *E. grandis* possuem menor teor de materiais voláteis e, consequentemente, maior teor de carbono fixo que os clones de *E. urophylla*. Na média, o teor de cinzas não foi diferente entre os clones. Isso poderá influenciar a combustibilidade da madeira dos clones de *Eucalyptus avaliados*, bem como a duração das reações exotérmicas da combustão.

2.4.3. Poder calorífico

Poder calorífico é a medida da quantidade de energia calorífica liberada pela combustão completa de uma unidade de massa ou volume do combustível, podendo ser expresso em cal g^{-1} ou kcal kg^{-1}, para os combustíveis sólidos, ou kcal Nm^{-3}, para os combustíveis líquidos e gasosos. É possível obter três formas de poder calorífico, ou seja, o poder calorífico superior, inferior e líquido.

O poder calorífico superior é determinado em equipamentos denominados calorímetros, sob condições controladas, e representa a quantidade máxima de calorias que o combustível libera quando queimado totalmente, pois não é perdido o calor latente do vapor de água. O poder calorífico inferior é estimado a partir do poder calorífico superior e do teor de hidrogênio do combustível, ou seja, aqui se desconta o calor latente do vapor de água. Cálculos teóricos das entalpias de formação da água retida no estado líquido e perdida no estado gasoso indicam que o calor latente do vapor de água seria de, aproximadamente, de 600 cal g^{-1}. Essa quantidade de energia é perdida quando o vapor de água sai do sistema. Existem diversas equações para estimar o poder calorífico inferior, tais como a Equação 1.

$$PCI=PCS-600xH/100 \quad (1)$$

em que: PCI é o poder calorífico inferior (kcal kg^{-1}), PCS é o poder calórico superior (kcal kg^{-1}) e H é o teor de hidrogênio do combustível (%).

Na prática, pode-se considerar que a madeira possui, aproximadamente, 6% de hidrogênio na sua composição química elementar e, dessa forma, a Equação 1 pode ser simplificada conforme a Equação 2.

$$PCI=PCS-324 \quad (2)$$

Pelas Equações 1 e 2 pode-se verificar que a umidade presente no combustível não é considerado, assim essa estimativa de poder calorífico somente é aplicada caso o combustível seja utilizado na forma anidra, ou seja, isento de umidade. Segundo Brand (2010), se o combustível possuir umidade, deve-se descontar, ainda, o calor necessário para evaporar essa água e obter, assim, o poder calorífico líquido ou útil. Esse valor representa a quantidade de energia térmica a ser realmente liberada em virtude da queima do combustível.

Segundo Lehtovaara (2004 apud BRAND, 2010), o poder calorífico líquido ou útil no caso da madeira, considerando a umidade em base úmida, pode ser estimado pela Equação 3.

$$PCL = PCI \times \left[\left(\frac{100 - U}{100}\right)\right] - (6 \times U) \quad (3)$$

em que: PCL é o poder calorífico líquido (kcal kg^{-1}), PCI é o poder calorífico inferior (kcal kg^{-1}), obtido pela equação 1 ou 2, e U é a umidade em base úmida (%).

Doat (1977 apud BRITO; BARRICHELO, 1982) propôs uma forma para a estimativa do PCL a partir da umidade em base seca, representada pela Equação 4.

$$PCL = \left(\frac{PCI - (6 \times U)}{100 + U}\right) x\ 100 \quad (4)$$

em que: U é a umidade em base seca (%).

Brand (2010), comparando o resultado fornecido pela Equação 3 e o poder calorífico medido em laboratório para amostras de madeira de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii*, encontrou diferença insignificante entre as duas formas de medição do poder calorífico líquido, demonstrando a eficiência da equação.

A escolha de qualquer um dos poderes caloríficos descritos anteriormente exerce influência sobre os cálculos de rendimento em sistemas térmicos. Nogueira e Lora (2003) relataram a importância de deixar bem claro qual foi o poder calorífico utilizado nos cálculos de eficiência e de perdas de calor em fornos e caldeiras, pois utilizando o PCS, PCI ou PCL os valores de eficiência serão diferentes.

Além do poder calorífico com base na massa de material, pode-se determinar o mesmo com base no volume do combustível. Para se estimar esta forma de valor calórico ou o poder calorífico volumétrico unitário, deve-se conhecer a densidade do combustível utilizado. A estimativa de poder calorífico volumétrico para o caso da madeira pode ser obtida pelas Equações 5 e 6.

$$PCV = DB\ x\ PCS \quad (5)$$

$$PCV = DAx\ PCL \quad (6)$$

em que: PCV é o poder calorífico volumétrico ou densidade energética (kcal m^{-3}); DB é a densidade básica (kcal m^{-3}); DA é a densidade aparente da madeira (kg m^{-3}), obtida em dada umidade; e PCS e PCL são os poderes caloríficos superior e líquido (kcal kg^{-1}), respectivamente.

A estimativa de poder calorífico volumétrico tende a discriminar mais os diferentes materiais genéticos, o que proporcionará uma melhor visão sob o ponto de vista energético da biomassa. Na Tabela 6 estão os valores médios de poder calorífico superior da madeira para diferentes espécies de eucalipto. Observa-se que o poder calorífico volumétrico possui maior variação, o que auxilia na melhor classificação dos materiais genéticos. Isso ocorre porque o poder calorífico volumétrico é uma combinação entre duas propriedades da madeira.

O poder calorífico sofre influência de diversos fatores, dentre eles pode-se citar os seguintes: umidade do combustível, composição química molecular, composição química elementar, composição química imediata e a relação C/H.

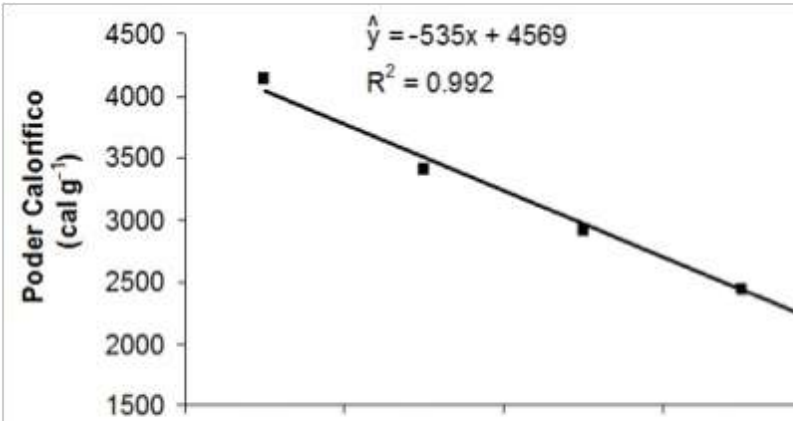
Tabela 6 - Valores médios de poder calorífico superior da madeira de espécies de *Eucalyptus*.

Espécie	Idade (anos)	Poder Calorífico Superior	
		Massa (kcal kg^{-1})	Volume (kcal m^{-3})
Eucalyptus maculata	7	4.248	2.684.811
	9	4.302	2.942.476
E. pellita	5	4.425	2.407.196
	6	4.477	2.390.661
	7	4.443	2.425.683
E. tereticornis	7	4.403	2.694.807
	8	4.358	2.562.516
E. urophylla	4	4.581	2.244.891
	5	4.413	2.197.845
	6	4.447	2.490.348
	7	4.386	2.236.917
E. grandis	3	4.533	1.777.119
	4	4.517	1.861.020
E. cloeziana	4	4.609	2.792.963
	6	4.429	2.488.911
	7	4.411	2.602.345
	8	4.494	2.831.475
	9	4.382	2.813.479
E.urophylla x *E. grandis*	5	4.430	2.099.591
	6	4.310	2.215.197
	7	4.429	2.302.878
E. camaldulensis	4	4.609	2.691.585
E. resinífera	4	4.632	2.603.296

Fonte: Trugilho (1995).

A umidade do combustível possui relação linear e inversamente proporcional com o seu poder calorífico (Figura 7). Brand (2010) também destacou a importância do efeito da umidade no valor calórico de diferentes amostras da madeira de *Pinus e Eucalyptus*.

Figura 7 - Efeito da umidade no poder calorífico da madeira

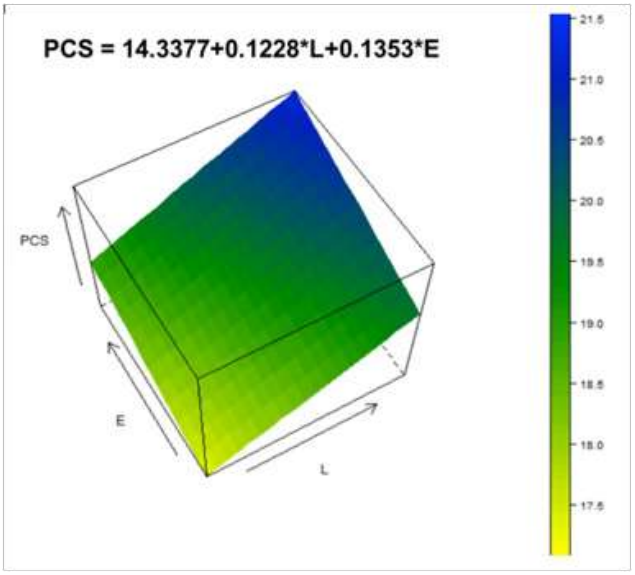


Fonte: Mitre (1982).

A composição química da madeira afeta, consideravelmente, o seu poder calorífico, sendo o teor de lignina e extrativos os principais fatores responsáveis pelo seu aumento, enquanto que o teor de cinzas ou minerais provoca a sua redução. Brand (2010) verificou a influência negativa do teor de cinzas no valor calórico da madeira. Como a fração mineral não é queimada para geração de calor, espera-se que os materiais mais ricos em minerais possuirão poder calorífico de menor magnitude.

A Figura 8 ilustra o efeito do teor de lignina e extrativos totais sobre o poder calorífico superior da madeira. Verifica-se uma tendência de aumento positivo e linear do poder calorífico superior com o teor de lignina e extrativos totais.

Figura 8 - Relação entre o teor de lignina (L - %) e extrativos totais (E - %) e o poder calorífico superior da madeira (PCS – MJ kg^{-1}).



Fonte: Adaptado de Telmo e Lousada (2011).

Telmo e Lousada (2011) verificaram que o teor de lignina Klason explicou 56,4% do poder calorífico da madeira de dezessete espécies, enquanto que o teor de extrativos explicaram 43,6%. Deve ser ressaltado que o valor calórico de certos tipos de extrativos é realmente elevado, porém este fato não ocorre de forma generalizada na madeira, em que os extrativos à base de carboidratos não possuem valor calórico alto.

A composição química elementar afeta positivamente o poder calorífico (HUANG et al., 2009; PROTÁSIO et al., 2011), pois o calor de formação associado a uma substância ou a um composto químico depende da entalpia dos produtos da reação e dos elementos químicos de sua composição. O calor de formação é simplesmente a mudança na entalpia associada com a formação da substância pelos seus componentes elementares, como pode ser ilustrado pela Equação 7.

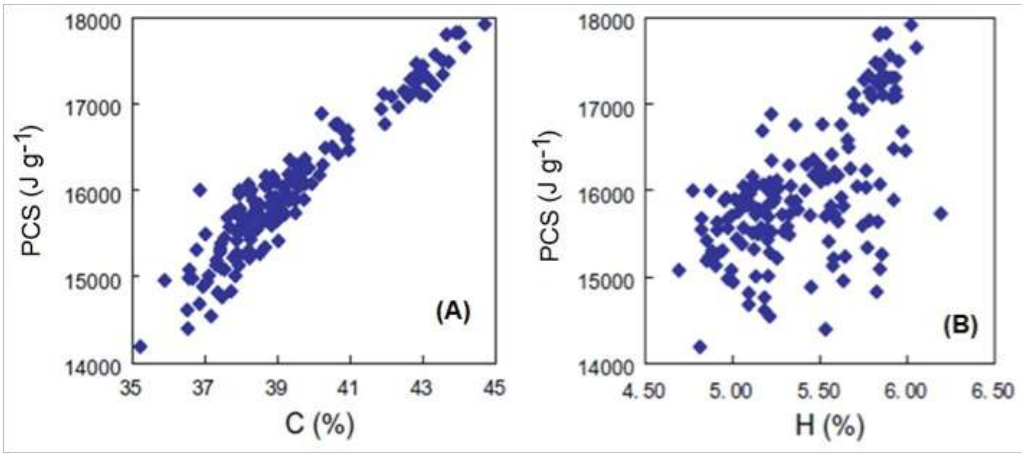
$$\Delta H = \sum Hf\,(produtos) - \sum Hf\,(reagentes) \qquad .(7)$$

em que: ΔH é a variação da entalpia da reação e Hf é a entalpia de formação.

A Figura 9 ilustra a relação funcional existente entre os teores de carbono e hidrogênio com o poder calorífico superior (PCS) do combustível.

A madeira possui poder calorífico variado dependendo da espécie. As madeiras de coníferas possuem poder calorífico superior médio em torno de 5.200 kcal kg^{-1}, enquanto que as madeiras de folhosas possuem poder calorífico superior médio de 4.500 kcal kg^{-1}. A composição química é a responsável por essa variação, estando relacionada diretamente aos teores de lignina e extrativos.

Figura 9 - Relação entre os teores de carbono (A) e hidrogênio (B) com o poder calorífico superior.



Fonte: Huang et al. (2009).

Como relatado anteriormente, a madeira é composta por celulose, hemiceluloses e lignina. Componentes denominados extrativos e minerais geralmente ocorrem em pequenas quantidades na maioria das espécies.

A celulose é composta inteiramente por unidades de açúcares (anidroglucose), cuja fórmula elementar é $C_6H_{10}O_5$, possuindo baixo conteúdo calorífico (ΔH25°C = -4.143 cal g^{-1}) devido ao alto nível de oxidação (SHAFIZADEH, 1977).

As hemiceluloses são compostas por vários outros tipos de açúcares, sendo os mais comuns a glicose, a manose, a galactose, a xilose e a arabinose. Elas também possuem baixo valor calórico devido ao elevado nível de oxidação (SHAFIZADEH, 1977).

A lignina é composta, predominantemente, por unidades coniferil, nas coníferas, e siringil, nas folhosas, com fórmula elementar $C_{10}H_{11}O_2$, possuindo um baixo grau de oxidação e um maior calor de combustão, ΔH25°C = -6.371 cal g^{-1} (SHAFIZADEH, 1977).

Segundo Shafizadeh (1977), alguns extrativos, especialmente os hidrocarbonetos terpenóides e lipídios, possuem menos oxigênio na estrutura química e um maior calor de combustão (ΔH25°C = -7.700 a -8.500 cal g^{-1}).

As diferenças nos calores de combustão ocorrem devido à natureza das ligações intermoleculares. Na madeira, os tipos de ligações químicas existentes são as covalentes, entre C-H, C-O, C-C, C=O, C=C e O-H, as ligações de hidrogênio (5,7 cal) e de Van der Waals (de 1 a 2 cal). Nos carboidratos ocorrem as ligações covalentes C-C, C-O, C-H e O-H, além das ligações de hidrogênio e de Van der Waals, enquanto que a molécula da lignina possui, ainda, as ligações do tipo C=O e C=C. A energia de ligação de algumas ligações químicas podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Energia de ligação a zero Kelvin.

Ligação Química	Energia (kcal mol^{-1})
H-H	103,2
H-O	109,4
H-C	98,2
C-C	85,0
C-O	79,0
C=C	145,0
C≡C	198,0
C=O	173,0

Fonte: Atkins e Jones (2006).

A energia necessária para romper a ligação química de uma molécula ou substância é chamada de energia de ligação. A mesma quantidade de energia será liberada quando a molécula se formar por causa da mesma ligação química. As energias são expressas em kcal mol^{-1} e representam a quantidade de calor liberado, quando essas ligações se formam, ou absorvido, quando se quebram por mol de material a uma dada temperatura (ATKINS; JONES, 2006).

2.4.3. Análises térmicas

Análise térmica é um termo que abrange um grupo de técnicas nas quais uma propriedade física ou química de uma substância, ou de seus produtos de reação, é monitorada em função do tempo ou da temperatura, enquanto a temperatura da amostra, sob uma atmosfera específica, é submetida a uma programação controlada (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

A termogravimetria, a análise térmica diferencial e a calorimetria exploratória diferencial são ferramentas que, atualmente, vem sendo empregadas para avaliar as propriedades físicas e químicas de materiais destinados à produção de energia, tanto para materiais lignocelulósicos quanto para materiais de origem fóssil.

A termogravimetria (TGA) ou análise termogravimétrica fornece informações acerca da composição e estabilidade térmica. É uma técnica de análise térmica basicamente quantitativa utilizada para medir variações de massa sofridas pela amostra, resultante de uma transformação física (sublimação, evaporação ou condensação) ou química (degradação, decomposição ou oxidação), em função da temperatura ou do tempo (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

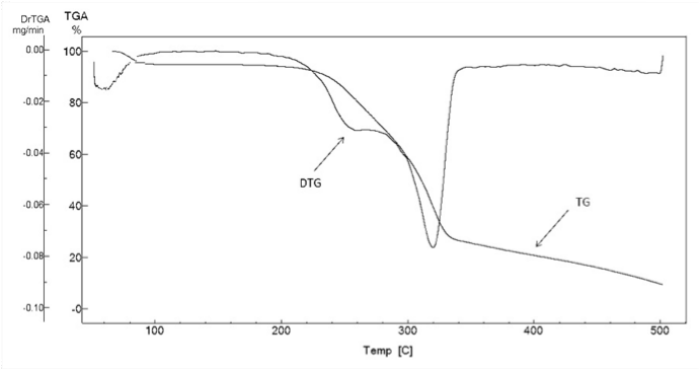
Para Camargo (2006), o estudo da cinética da degradação térmica da biomassa, incluindo a emissão de voláteis, é essencial para a compreensão da dinâmica do processo, visando explicar os fenômenos envolvidos durante as reações associadas à perda de massa.

A análise termogravimétrica de biomassa tem sido aplicada extensamente para determinar os parâmetros cinéticos envolvidos no processo de pirólise, tais como a energia de ativação aparente, as constantes de reação e o fator pré-exponencial (MIRANDA, 2011).

A termogravimetria derivada (DTG) é a representação matemática da derivada primeira da curva termogravimétrica em função do tempo ou da temperatura e permite definir com maior precisão os inícios e finais dos eventos térmicos e verificar a presença de eventos simultâneos.

A Figura 10 ilustra um exemplo de um termograma da madeira de Eucalyptus. Observa-se que na curva DTG é mais fácil identificar e avaliar os picos e as temperaturas de máxima perda de massa. Os analisadores termogravimétricos mais modernos são capazes de registrar, automaticamente, a derivada das curvas termogravimétricas (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

Figura 10 - Representação das curvas termogravimétricas (TGA) e termogravimetria derivada (DTG), considerando a atmosfera de nitrogênio.



Fonte: Elaborado pelos autores.

As perdas de massa de clones de *Eucalyptu*s por faixas de temperatura podem ser visualizadas na Tabela 8. É possível observar que as maiores perdas de massa ocorrem, respectivamente, nas faixas de temperatura entre 250 a 300°C e entre 300 a 350°C. Nestas faixas de temperatura ocorre a decomposição térmica da holocelulose, sendo o somatório de perda de massa nestas duas faixas de, aproximadamente, 60%. Entre 350 e 400°C e entre 400 e 500°C as perdas de massa são menos acentuadas, pois nestas fases ocorrem somente a degradação residual da holocelulose e pouca degradação da molécula de lignina.

A calorimetria exploratória diferencial, do inglês *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), é uma técnica na qual se mede a diferença de energia fornecida à substância e a um material de referência, termicamente inerte, enquanto a substância e o material de referência são submetidos a uma programação controlada de temperatura, de maneira que a amostra e a referência sejam mantidas em condições isotérmicas (IONASHIRO, 2004; MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

Tabela 8 - Valores médios da perda de massa (%) da madeira de clones de Eucalyptus em função das faixas de temperatura, considerando a atmosfera de nitrogênio.

Clone	Esp	Faixa de temperatura (°C)					Massa residual
		150 - 250	250 - 300	300 - 350	350 - 400	400 - 500	
1	9 m2	10,29	26,02	33,74	3,91	5,33	20,70
	12m2	8,19	25,77	32,36	3,60	5,64	24,40
2	9 m2	9,32	25,31	32,96	3,65	6,31	22,70
	12m2	9,69	26,52	32,6	4,29	7,78	19,10
3	9 m2	9,48	26,83	32,91	3,50	7,58	19,70
	12m2	9,41	25,64	31,84	4,14	8,91	20,10
Média		9,40	26,02	32,74	3,85	6,93	21,12

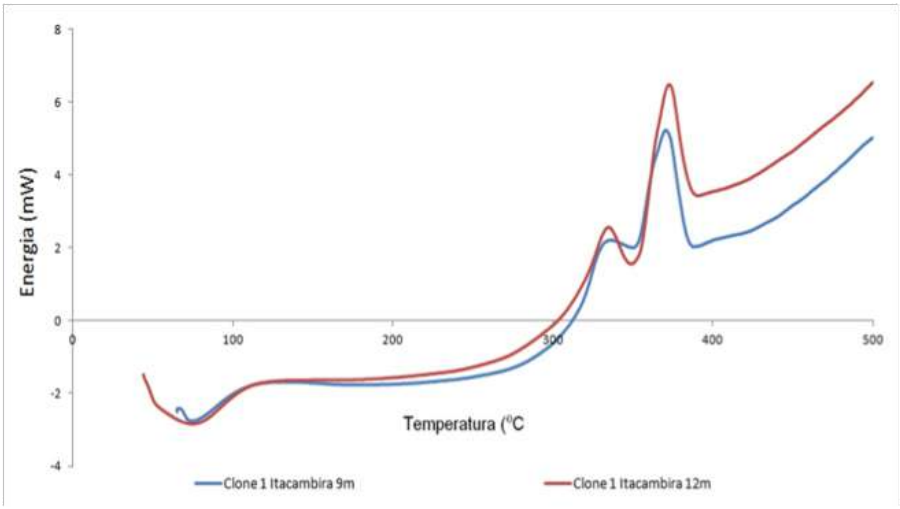
* Esp = espaçamento de plantio.

Fonte: Alves (2014).

Quando uma amostra sofre algum tipo de mudança de estado físico ou químico, ocorre a liberação ou absorção de calor. A técnica DSC mede as variações de energia térmica que ocorrem para se manter em equilíbrio as temperaturas da amostra e do material de referência, durante o evento térmico.

A Figura 11 ilustra as curvas de DSC para madeira de clones de Eucalyptus, evidenciando seus picos característicos.

Figura 11 - Curvas de DSC para a madeira de clone de Eucalyptus, conduzidas em atmosfera de nitrogênio com taxa de aquecimento de 10 °C min^{-1}.



Fonte: Alves (2014).

3. Considerações Finais

A madeira e a biomassa lignocelulósica possuem grande potencial como fonte de energia. Apesar de ser considerada como um combustível de baixa densidade energética, a madeira é o material mais indicado para esta finalidade, pois é uma fonte de energia renovável. Dentro desse contexto, muitos países no mundo vêm tentando aumentar a participação da energia da biomassa na matriz energética na tentativa de contribuir com a redução das emissões de gases causadores do efeito estufa.

A elevada variabilidade faz com que a madeira seja uma importante fonte de matéria-prima para diferentes formas de utilizações, fazendo com que a silvicultura e o melhoramento genético florestal tenham apresentado um salto considerável na seleção de materiais genéticos mais adaptados aos diferentes usos industriais, em especial como fonte bioenergética.

A madeira de eucalipto possui aptidão para ser utilizada como fonte de energia ou bionergia, cujas características como densidade básica, composição química (teores de lignina, extrativos e cinzas ou minerais) e poder calorífico atestam esta forma de utilização. Dessa forma, deve-se procurar utilizar os materiais genéticos com elevados densidade básica e teores de lignina e extrativos e que estas características estejam associadas de forma positiva com as de crescimento do vegetal. Estas características devem ser incluídas nos programas de melhoramento florestal para a seleção dos genótipos mais aptos a esta atividade.

Para o Brasil, que possui uma grande participação da energia da biomassa na sua matriz energética, é importante continuar os estudos envolvendo a qualidade da madeira para essa finalidade,

pois se trata de uma questão estratégica, em que os produtos obtidos por esta fonte renovável de energia terão, certamente, uma maior aceitação tanto nos mercados nacional como internacional.

Deve-se procurar explorar melhor as técnicas de análise térmica visando estabelecer relações entre a perda de massa dentro das faixas de temperatura e os constituintes químicos da biomassa, visando obter melhores conclusões sobre os resultados dessas análises. Outras técnicas, como o infravermelho próximo, também poderão contribuir para o desenvolvimento de protocolos não destrutivos e, assim, auxiliar na identificação de materiais potenciais a este uso com uma maior rapidez de análise.

Além das técnicas de avaliação e amostragem, outras características intrínsecas da madeira, como a relação entre o siringil e o guaiacil (S/G) da lignina, também devem ser consideradas. É esperado que uma menor relação S/G na biomassa deve proporcionar melhores propriedades energéticas.

4. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à FAPEMIG e às Universidades Federais de Lavras (UFLA) e do Espírito Santo (UFES) pelo apoio recebido.

DETERMINAÇÃO DO RAIO ECONÔMICO DE TRANSPORTE PARA UMA USINA DE TRATAMENTO DE MADEIRA

Lucas Fonseca do Amaral, Wendel Sandro de Paula Andrade, Juarez Benigno Paes,
Elizabeth Neire da Silva Oliveira de Paula, Djeison César Batista, Magda Aparecida Nogueira Andrade

1. Introdução

Os custos de logística, em particular os custos do transporte, são determinantes para o ganho de competitividade das indústrias de base florestal. Tal custo representa de 38 a 66% do custo final de aquisição da matéria-prima, provenientes de florestas plantadas, para algumas empresas de celulose e papel e de painéis no estado de São Paulo (CHAMPION, 1983; DURAFLORA, 1984; SALMERON, s.d. apud SEIXAS, 1992). Para Machado (2002), o transporte ainda é considerado como o elemento mais significativo e importante do custo logístico, podendo absorver até 60% dos gastos logísticos totais.

Um dos fatores que implicam um alto custo do transporte de toras é o fato de que, pelas suas características em termos de especificidade de carga, elas compõem um baixo valor específico, ou seja, o seu valor em relação à sua massa e/ou ao seu volume de carga transportada é baixo. Além disso, a especialização dos veículos no transporte de toras conduz a uma exclusividade do frete, limitando-o a apenas um sentido em razão dos veículos não poderem ser utilizados para fretes de retorno (SEIXAS, 2001).

Para as indústrias de tratamento de madeira, essa realidade também é verificada, percebendo-se a necessidade de analisar a localização para a produção de madeiras tratadas e o custo de transporte que está inserido no processo de produção. Portanto, a questão central deste capítulo consiste em verificar qual o impacto do custo de transporte na decisão locacional para uma planta industrial de tratamento de madeira.

De modo específico, este capítulo propõe o seguinte: conhecer o custo de aquisição de madeira de eucalipto para tratamento; levantar o custo de produção de madeira de eucalipto tratada; determinar a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) para empreendimentos florestais; levantar o preço médio de mercado de madeira de eucalipto tratada; determinar o valor que poderá ser despendido com o custo de transporte de madeira de eucalipto para tratamento; e determinar a distância máxima entre os pontos de oferta de madeira de eucalipto (floresta) e a demanda de madeira de eucalipto tratada (consumidor final), atendendo à restrição imposta pela TMA.

Disponibilizar esta informação locacional para as referidas empresas é subsidiar com informações os empresários que pretendam investir neste setor. Considerando a possibilidade de aumento de competitividade, entende-se que essas empresas estariam mais aptas a atuar no longo prazo, contribuindo com benefícios sociais como a geração de emprego e renda.

Considerando ainda que os ganhos obtidos neste setor, em termos de redução de custo, possam refletir em preços mais baixos para o produto final, isto conduziria a um maior acesso do consumidor aos produtos de madeira tratada, fazendo com que parte destes migrasse do uso de madeira nativa para aquela oriunda de reflorestamento. Por fim, é possível destacar um benefício ambiental direto em virtude de uma localização mais eficiente, sendo este, a redução da queima de combustíveis fósseis, fruto de uma menor movimentação de cargas, reduzindo, assim, a emissão de poluentes.

2. Situação econômica do segmento de tratamento de madeira no Brasil e no Espírito Santo

De acordo com a Associação Brasileira de Florestas Plantadas (ABRAF), o mercado de madeira tratada no Brasil contempla, aproximadamente, 300 usinas de tratamento de madeira, as quais estão distribuídas, predominantemente, nas Regiões Sul e Sudeste do País, onde se têm as maiores áreas reflorestadas de eucalipto. A produção conjunta atual está próxima de 1,65 milhões de m³ e tal valor é oriundo de uma recente expansão produtiva de 10,21% em relação a 2011 (ABRAF, 2012).

O consumo nacional de mourões, cruzetas e postes roliços de eucalipto, provenientes de usinas de tratamento de madeira, representa um faturamento anual de R$750 milhões. Esta produção representa 0,9% do consumo brasileiro de madeira em tora para uso industrial, como pode ser observado na Tabela 1 (ABRAF, 2012; ABRAF 2013).

Tabela 1 - Consumo brasileiro de madeira em tora para uso industrial por segmento e espécie no ano de 2011.

Segmento	Consumo de Madeira (m³)			
	Eucalyptus	*Pinus*	Outros	Total
Celulose e Papel	55.033.172	9.108.030	5.000	64.146.202
Painéis Reconstituídos	5.580.247	7.252.635	158.576	12.991.458
Indústria Madeireira	**7.034.315**	**27.424.294**	**288.000**	**34.746.609**
Carvão	23.144.200	-	-	23.144.200
Lenha Industrial	37.067.120	3.829.361	3.786.103	44.682.584
Madeira Tratada	1.650.320	-	-	1.650.320
Outros	1.061.617	31.135	-	1.092.752
Total	130.570.991	47.645.455	4.237.679	182.454.125

Fonte: ABRAF (2013).

O Centro de Desenvolvimento do Agronegócio (CEDAGRO) publicou um relatório em 2011 em que foi constatada a existência de 30 empresas de tratamento de madeira no Estado do Espírito Santo. A capacidade anual total de processamento das usinas foi estimada em 193.590 m³, porém apenas 58% são efetivamente utilizados (CEDAGRO, 2011).

Na Tabela 2 encontram-se dados sobre a origem da madeira que abastece as empresas capixabas, tendo sido pesquisadas 25 das 30 firmas existentes.

Tabela 2 - Origem da madeira que abastece as usinas de tratamento no Espírito Santo.

Item	(%)
Madeira de Terceiros	88
Do Espírito Santo	87
De Outros Estados (MG e BA)	13
Madeira de Produção Própria	12

Fonte: CEDAGRO (2011).

Quanto à distribuição da mão de obra, o setor emprega 440 pessoas, considerando-se as áreas de administração, colheita, transporte, preparo e tratamento da madeira, e também os terceirizados, no corte e transporte da madeira. A referida distribuição dos empregos encontra-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Distribuição de empregos para usinas de tratamento de madeira no Espírito Santo.

Item	(%)	Empregos
Média de Empregos nas 30 Unidades	**100**	**13,36**
•Produção	81	324,00
•Área de Gestão e Administrativa	17	68,00
•Corte e Transporte (Próprio)	2	8,00
Subtotal	100	400,00
• Corte e Transporte (Terceiros)	10	40,00
Total para Transporte da Madeira	110	440,00

Fonte: CEDAGRO (2011).

As principais reclamações identificadas pelos empresários quanto à matéria-prima foram a qualidade e a localização das florestas. Com relação à logística do transporte, a localização da matéria-prima afeta o custo, em razão das distâncias, e, eventualmente, ocasiona restrições de oferta de madeira, a qual está diretamente ligada à localização das usinas de tratamento em relação à disponibilidade da matéria-prima (CEDAGRO, 2011).

3. Localização de projetos de base florestal

A definição de projeto proposta por Rezende e Oliveira (2008), em termos econômicos, é uma estrutura de investimento em que se aplicam recursos durante um período de tempo, visando benefícios futuros.

De acordo com esses autores, para o êxito de um projeto, muitas variáveis estão direta e indiretamente envolvidas, as quais contemplam os aspectos técnicos, econômicos, financeiros, administrativos e legais das empresas ou dos empreendimentos e, à medida que estas variáveis se tornam planejadas e mensuradas, maiores serão as chances de sucesso do projeto. A localização de um projeto entra como parte de um estudo em que a comparação entre essas variáveis, as quais agirão como forças locacionais (fatores de atração ou repulsão do projeto), determinará a posição geográfica onde será situado o espaço físico do investimento, garantindo, assim, um maior número de benefícios ao mesmo.

A comparação entre essas variáveis deu origem a diversas teorias capazes de quantificar as influências exercidas pelo espaço geográfico nas atividades econômicas, as quais são denominadas de teorias da localização. Segundo Andrade (2005), as três principais teorias foram desenvolvidas por Johann Heinrich vonThünen, Alfred Weber e August Lösch.

Citadas as três teorias, optou-se como referencial teórico deste capítulo a teoria weberiana de localização industrial por sua maior aderência ao problema estudado. Haddad (1979 apud ANDRADE, 2005) descreveu que, nesta teoria, é sugerido que a determinação da localização do espaço físico

do projeto seja realizada mediante a análise dos custos de transporte, isto é, a localização do projeto será atraída para aquela região em que o custo de transporte for menor.

A teoria de Weber pondera a relação entre o custo decorrente da distância do mercado do produto e aquele decorrente da distância da fonte de matéria-prima. Estes custos são representados por uma função que sofre a influência de dois fatores, massa do produto e distância a ser percorrida. O local em que o índice de custo for mínimo irá atrair a localização do projeto. Entretanto, cabe ressaltar que o local onde este custo for mínimo nem sempre é considerado o melhor para a atividade, uma vez que há outros fatores que irão interferir no processo de decisão (FERREIRA, 2011).

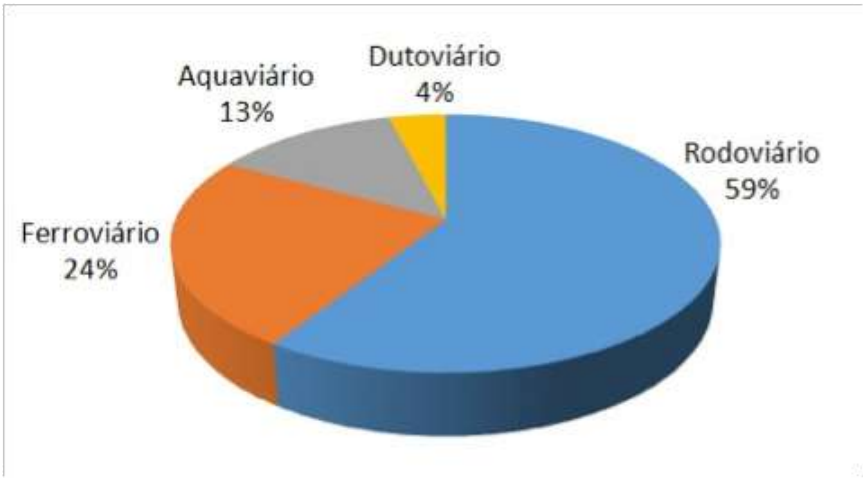
Para definir o melhor local para se implantar uma indústria, onde o custo de transporte seja mínimo, Weber desenvolveu o método do triângulo locacional. Este método consiste em um diagnóstico no qual se determina o local onde o custo de transporte será o menor possível. Para isto, parte-se dos seguintes pressupostos: a localização geográfica das fontes de matéria-prima é previamente determinada; a posição e o tamanho dos centros de consumo são igualmente fornecidos e conhecidos; a mão de obra pode ser encontrada de forma ilimitada; e analisa-se somente a distância e o valor específico de carga (FERREIRA, 2011).

3.1. Transporte rodoviário florestal brasileiro

Transporte florestal é a movimentação da madeira ou de seus derivados da floresta ou unidade fabril até o centro consumidor. No passado, predominavam três tipos de modais para este tipo de transporte, o ferroviário, o rodoviário e o hidroviário. Entretanto, com o avanço da tecnologia surgiram os dutoviários e os aeroviários, porém, para o transporte de madeira e derivados, estes são pouco utilizados no Brasil pelas suas restrições técnicas e econômicas. O custo do transporte é um fator que influi na decisão locacional do empreendimento, uma vez que ele pode ser responsável por até 60% do gasto logístico, no qual são considerados os custos de armazenagem, de estoque e de processamento de pedidos (MACHADO et al., 2009).

O transporte de madeira no Brasil é realizado, quase que em sua totalidade, pelo modal rodoviário, o qual reúne características que o torna mais competitivo em relação aos demais. O transporte rodoviário é capaz de transportar produtos de um pátio para o outro e tem um menor investimento inicial, além da flexibilidade e possibilidade de escolha de rotas e diferentes capacidades de carga (MACHADO et al., 2009). A participação dos principais modais utilizados no transporte de cargas no Brasil está ilustrada na Figura 1.

Figura 1 - Participação dos modais na matriz brasileira de transporte de cargas.



Fonte: Souza (2006 apud MACHADO et al., 2009).

Um dos fatores de maior influência no custo de transporte é a distância a ser percorrida, pois quanto maior for o percurso, mais elevado será o custo unitário da madeira transportada. Entretanto, a massa e o volume de madeira e a qualidade das rodovias também influenciam os custos de transporte.

Portanto, a verificação do raio da distância média para o transporte da madeira é de importância fundamental para minimizar o custo de transporte, tendo em vista que um bom retorno do capital investido irá influenciar de forma positiva a decisão locacional de uma usina de tratamento de madeira. Além disso, o custo de transporte elevado pode inviabilizar a venda para os consumidores localizados mais distantes da indústria, reduzindo a capacidade da mesma de ampliar sua participação no mercado.

4. Considerações sobre o método de obtenção e análise de dados

Para atingir os objetivos propostos neste capítulo, considerou-se um empresário que pretende implantar uma usina de tratamento de madeira na Região Sul do Estado do Espírito Santo e tenha a necessidade de saber qual o raio econômico de transporte, ou seja, qual a distância média possível a ser percorrida para que, ainda assim, tenha um lucro compatível com a taxa mínima de atratividade (TMA).

Para tanto, foi necessário realizar um agrupamento de dados para determinar o fluxo de caixa de uma usina de tratamento de madeira, o qual representa todos os gastos relacionados com a produção e comercialização. O fluxo de caixa deve conter como entrada a receita com as vendas dos bens gerados e comercializados e como saída os gastos relacionados à geração, administração e comercialização de tais produtos.

Foram utilizados dados reais de cada item que compôs o fluxo de caixa, sendo elaborada uma previsão para 10 anos de funcionamento da empresa. A autoclave escolhida para ser utilizada na usina tem as seguintes dimensões: 1,6 m de diâmetro e 12,0 m de comprimento. Sua cotação foi realizada junto à Empresa A. A. Verona & Cia. Ltda. e no seu preço estão englobados todos os materiais e equipamentos necessários para o seu funcionamento.

O custo do arseniato de cobre cromatado (CCA), produto químico utilizado no tratamento da madeira, foi fornecido pela Montana Química S. A., principal produtora e fornecedora deste produto no Brasil. Para a construção do galpão industrial e do espaço físico do escritório, foram utilizados os valores correspondentes, obtidos no Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado do Espírito Santo.

O valor para a compra da matéria-prima, ou seja, da madeira de eucalipto para a indústria, foi obtido junto ao Instituto de Economia Agrícola (IEA) e a cotação foi referente ao mês de julho do ano de 2013. O preço para a compra da madeira tratada foi obtido em uma cotação realizada por uma empresa localizada no município de Cachoeiro de Itapemirim – ES. Os cálculos dos custos fixo e variável do transporte para o caminhão trucado Mercedes Benz, modelo L1620, com três eixos, versão 6 x 2, foram realizados pela utilização das informações contidas no Anexo I, elaborado com os dados da Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística (2013).

No fluxo de caixa apresentado na Tabela 4, o ano 0 (zero) representa o momento do investimento inicial para se implantar uma usina de tratamento de madeira. A partir do ano 1 (um) a em-

presa começa a ter receita com vendas, para as quais se fez uma projeção de que irão evoluir de forma gradativa, estabilizando-se a partir do sexto ano, nas proporções de 33%, 50%, 70%, 80%, 90% e 100% da sua capacidade, o qual se estende até o ano 10 (dez).

Esses valores foram arbitrados levando-se em consideração que a empresa, ao iniciar suas atividades, começa trabalhando com grande capacidade ociosa em função das características de sua produção e do mercado consumidor. A capacidade ociosa irá impactar unicamente nos custos variáveis da empresa e estão relacionados com a produção e com o transporte, sendo estes os seguintes: os insumos (produto químico), a matéria-prima (madeira roliça), os impostos e os custos variáveis do transporte. Os dados estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Fluxo de caixa (em R$) de uma usina fictícia de tratamento de madeira em 10 anos de funcionamento.

FLUXO DE CAIXA	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano ...	Ano 10
(+) Entrada	(0%)	(33,00%)	(50,00%)	(70,00%)	(80,00%)	(90,00%)	(100,00%)	...	(100,00%)
Receita das Vendas	0	548.077,62	830.420,64	1.162.588,90	1.328.673,02	1.494.757,15	1.660.841,28	...	1.660.841,28
Receita das Vendas	0	548.077,62	830.420,64	1.162.588,90	1.328.673,02	1.494.757,15	1.660.841,28	...	1.660.841,28
Total de Entradas	0	548.077,62	830.420,64	1.162.588,90	1.328.673,02	1.494.757,15	1.660.841,28	...	1.660.841,28
(-) Saídas									
Furadeira	1.636,14								
Autoclave	219.620,00								
Galpão Industrial	188.202,00								
Construção (escritório)	28.234,00								
Caminhão	167.676,00								
Custo fixo com Transporte		62.299,12	62.299,12	62.299,12	62.299,12	62.299,12	62.299,12	...	62.299,12
Mão de obra		48.816,00	48.816,00	48.816,00	48.816,00	48.816,00	48.816,00	...	48.816,00
Telefone	55,44								
Computador	1.700,00								
Impressora	500,00								
Mesa de escritório	510,00								
Despesas Financeiras		7.503,84	7.503,84	7.503,84	7.503,84	7.503,84	7.503,84	...	7.503,84
Insumos (Produto químico - CCA)		42.052,35	63.715,68	89.201,95	101.945,09	114.688,22	127.431,36	...	127.431,36
Matéria-prima (Madeira roliça)		155.868,45	236.164,32	330.630,05	377.862,91	425.095,78	472.328,64	...	472.328,64
Propaganda		12.000,00	12.000,00	12.000,00	12.000,00	12.000,00	12.000,00	...	12.000,00
Outros		2.400,00	2.400,00	2.400,00	2.400,00	2.400,00	2.400,00	...	2.400,00
Impostos (Simples nacional)		52.725,07	79.886,47	111.841,05	127.818,34	143.795,64	159.772,93	...	159.772,93
Total de saídas	608.133,58	383.664,83	512.785,43	664.692,01	740.645,30	816.598,60	892.551,89	...	892.551,89
RECEITA LÍQUIDA	-608.133,58	164.412,80	317.635,21	497.896,88	588.027,72	678.158,55	768.289,39	...	768.289,39

Nota: as despesas financeiras referem-se ao fornecimento de água, energia elétrica, telefonia e internet.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Depois da elaboração do fluxo de caixa, foi realizada uma pesquisa a fim de definir qual o custo variável do transporte, ou seja, qual o valor gasto por quilômetro percorrido (R$ km^{-1}), resultando em R$1,0787 km^{-1}. Para esta análise considerou-se um caminhão com as características já citadas ante-

riormente, com base no grande uso deste veículo na região.

Esse custo é o mesmo, tanto para o transporte da matéria-prima até a usina de tratamento de madeira, quanto para o transporte do produto até o consumidor final. Tal modelo é explicado pela razão de que a massa da madeira a ser transportada para a usina de tratamento é semelhante a do produto final (mourão tratado), visto que a madeira de eucalipto, após a colheita, permanece no campo por, aproximadamente, um mês até o seu transporte. Conforme Rezende et al. (2010), esse tempo de espera é suficiente para a secagem, até atingir a umidade correspondente ao ponto de saturação das fibras (PSF), lembrando que o mourão a ser tratado ao ser comercializado pela usina de tratamento deve estar com a umidade também próxima ao PSF.

Uma vez que no tratamento da madeira devem ser adicionados, conforme a norma NBR 9480 da ABNT (2009), 6,5 kg de ingredientes ativos por metro cúbico de madeira, o que corresponde a 10,83 kg de produto para o "Osmose K33 C60" (CCA tipo C), que contem 60% de ingredientes ativos, o qual é um dos mais empregados no tratamento da madeira no Brasil, e ao considerar a densidade básica da madeira de eucalipto igual ou superior a 538 kg m^{-3}, conforme a citada norma, haveria um incremento de 10,38 kg m^{-3}, o que corresponderia a apenas 1,93% de acréscimo na densidade da madeira.

Com os dados do fluxo de caixa e do custo variável do transporte foi possível proceder a uma análise econômica e verificar a distância que o veículo consegue transportar a madeira sem que haja prejuízo. Tal análise foi elaborada seguindo os critérios usualmente utilizados na análise econômica de projetos que são compostos pelo Valor Presente Líquido (VPL); pela Taxa Interna de Retorno (TIR); e pela Taxa Mínima de Atratividade (TMA).

O VPL é a soma dos valores econômicos das receitas e dos custos em um determinado período, levados para uma data focal a uma determinada taxa de juros (SILVA; FONTES, 2005), expressa pela Equação 1.

$$VPL = \sum_{j=0}^{n} R_j(1+i)^{-j} - \left(\sum_{j=0}^{n} C_j(1+i)^{-j} + \sum_{j=0}^{n} CT_j(1+i)^{-j} \right) \quad (1)$$

em que: R_j é a receita ocorrida no período j (R$); Cj é o custo ocorrido no período j sem levar em consideração o custo de transporte (R$); CTj é o custo variável do transporte ocorrido no período j (R$); i é a taxa de remuneração (%); e j é o período de ocorrência da receita ou custo (anos).

A TIR é a taxa de juros incorporada ao fluxo de caixa, que tem a capacidade de igualar o valor presente das receitas ao das despesas. Também pode ser entendida como a taxa de retorno sobre o capital investido (HOJI, 2006). O valor das despesas foi desmembrado em despesas relativas à produção e em despesas relativas ao custo do transporte, conforme Equação 2.

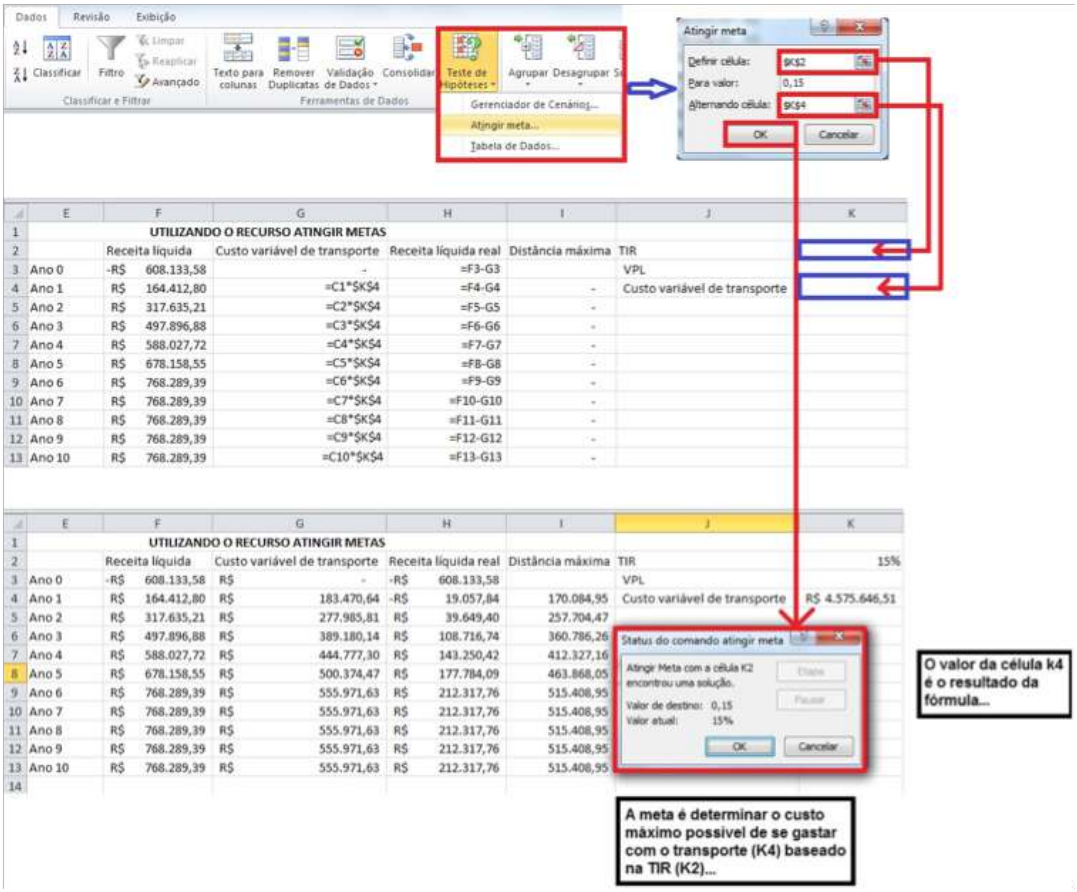
$$\sum_{j=0}^{n} R_j(1+TIR)^{-j} = \sum_{j=0}^{n} C_j(1+TIR)^{-j} + \sum_{j=0}^{n} CT_j(1+TIR)^{-j} \quad (2)$$

em que: Rj é a receita ocorrida no período j (R$); Cj é o custo ocorrido no período j sem levar em consideração o custo de transporte (R$); CTj é o custo de transporte variável ocorrido no período j (R$); j é o período de ocorrência da receita ou custo (anos); n é o número de períodos (anos); e TIR é a taxa interna de retorno (%).

Ao se aumentar o custo do transporte da Equação 1, chegar-se-á em um determinado valor que igualará o VPL a 0 (zero). Portanto, como a Equação 2 é aquela em que se iguala o VPL a 0 (zero), ela será utilizada para se determinar o custo do transporte possível para que não haja prejuízo no fluxo de caixa.

Além disso, a Equação 2, que representa a TIR, será utilizada para o cálculo citado anteriormente, tendo como meta o seu resultado compatível com a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Rezende e Oliveira (2008) sugerem que a TMA de um empreendimento florestal seja de 15%, estando, assim, compatível com a realidade do setor. Portanto, ao atribuir à TIR 15%, utilizando a função "Atingir metas" do *software* Microsoft Excel, será possível obter o valor disponível para se gastar com o transporte. O procedimento utilizado para a realização do cálculo desta função está ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Procedimento "Atingir metas" do *software* Microsoft Excel.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Ao dividir tal valor pelo custo variável do transporte, obter-se-á a quilometragem disponível a se percorrer por ano; entretanto, ao se considerar a viagem de ida e de volta, faz-se necessário dividir o resultado por dois, originando a Equação 3.

$$D = \frac{CT_j}{2 * P_f} \qquad (3)$$

em que: D é a distância máxima possível de ser percorrida (km); P_f é o custo variável do transporte (R$ km^{-1}); e CTj é o custo de transporte disponível no período j (R$).

Há, agora, a necessidade de se obter qual a distância que o caminhão pode transportar ao considerar sua lotação completa, ou seja, qual seria a viagem a ser realizada com a máxima carga admitida. Tal distância é calculada ao se dividir a quilometragem anual possível de ser percorrida pela produção anual, multiplicada pela capacidade de carga do caminhão.

A distância entre a usina de tratamento de madeira e a oferta de matéria-prima, somada à distância entre a usina de tratamento de madeira e o consumidor final não deve exceder a distância estabelecida pelo modelo.

5. Análise dos resultados

Na Tabela 5 encontram-se os resultados dos custos disponíveis para o transporte para cada ano de funcionamento da empresa e, ainda, o fluxo de caixa resumido de uma usina de tratamento de madeira. Tais resultados foram obtidos pela aplicação da ferramenta "Atingir Metas" do software Microsoft Excel.

Tabela 5 - Fluxo de caixa resumido e o custo disponível para transporte.

Ano	Receita Líquida (R$)	Custo Disponível para Transporte (R$)	Receita Líquida Real (R$)
0	-608.133,58	0,00	-608.133,58
1	164.412,80	183.470,64	-19.057,84
2	317.635,21	277.985,81	39.649,40
3	497.896,88	389.180,14	108.716,74
4	588.027,72	444.777,30	143.250,42
5	678.158,55	500.374,47	177.784,09
6	768.289,39	555.971,63	212.317,76
7	768.289,39	555.971,63	212.317,76
8	768.289,39	555.971,63	212.317,76
9	768.289,39	555.971,63	212.317,76
10	768.289,39	555.971,63	212.317,76

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para o cálculo da TIR, foram utilizados os dados da Receita Líquida Real, que é a diferença entre a Receita Líquida e o Custo Disponível para o Transporte. A TIR deste empreendimento foi de 15%, o mesmo daquele requerido pela TMA. Ao se fixar o valor da TIR, foi possível calcular o Custo Disponível para o Transporte e ele variou de R$183.470,64 a R$555.971,63, o qual segue de acordo com o volume de produção.A distância máxima possível de ser percorrida anualmente foi calculada e os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Distância máxima possível de ser percorrida por ano.

Ano	Distância Máxima (km ano^{-1})
0	0,00
1	85.042,48
2	128.852,24
3	180.393,13
4	206.163,58
5	231.934,03
6	257.704,47
7	257.704,47
8	257.704,47
9	257.704,47

Fonte: Elaborado pelos autores.

A distância máxima foi calculada ao se utilizar a Equação 3, entretanto, esta distância é aquela que o caminhão pode percorrer anualmente. Assim, ao dividi-la pela produção anual, obtém-se que a distância média possível de se percorrer foi de 36,52 km.m^{-3} de madeira ao se observar o limite estabelecido pela capacidade de carga do caminhão. Ou seja, a distância média que o veículo poderá percorrer dependerá do volume que ele transporta. Sendo assim, foi realizado um cálculo para saber se esse limite era por massa ou volume transportado e a conclusão foi de que a massa é o fator limitante da carga.

Para tanto, fez-se uma conversão deste limite ao se transformar a massa limitante para volume, tendo em consideração a capacidade de carga do veículo, que é de 15 toneladas. Dessa forma, pode-se concluir que o volume limitará o caminhão a transportar 21,43 m^3 de madeira. Portanto, a distância média possível de ser percorrida será de 782,62 km.

Nota-se, então, que o resultado deste cálculo é a distância entre a oferta de matéria-prima e o consumidor final, ou seja, a usina de tratamento de madeira deve se localizar entre essa distância calculada.

Foi empregado o termo distância média, em vez de distância máxima, uma vez que somente se poderia dizer distância máxima se todas as entregas fossem realizadas naquela distância. O fato é que, para cada entrega realizada a uma distância inferior a 36,52 km m^{-3}, haverá um excedente de quilometragem a percorrer para a próxima entrega.

Pode-se assim inferir que é importante o atendimento do mercado local, pois se obtém margem para atender mercados mais distantes. Observa-se também a importância do controle de produção da empresa para não se permitir que o gasto total com transporte supere aquele calculado, pois caso contrário haveria uma redução na TIR.

Foi realizado um teste de sensibilidade para verificar qual o impacto da variação em 1% da TIR no custo e na distância média disponível e os resultados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Teste de sensibilidade na variação da Taxa Interna de Retorno.

Ano	Custo Disponível para Transporte (R$)	Receita Líquida Real (R$)	Distância Máxima (km)
0	-	-608.133,58	-
1	186.447,17	-22.034,37	86.422,16
2	282.495,71	35.139,51	130.942,67
3	395.493,99	102.402,89	183.319,73
4	451.993,13	136.034,59	209.508,27
5	508.492,27	169.666,28	235.696,80
6	564.991,41	203.297,97	261.885,33
7	564.991,41	203.297,97	261.885,33
8	564.991,41	203.297,97	261.885,33
9	564.991,41	203.297,97	261.885,33
10	564.991,41	203.297,97	261.885,33

Fonte: Elaborado pelos autores.

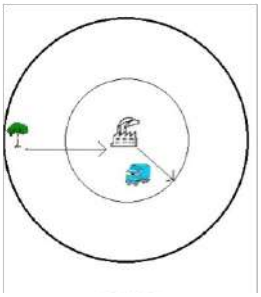
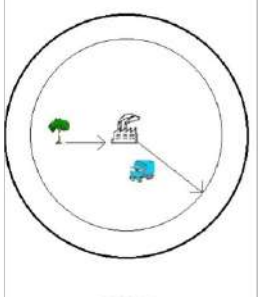
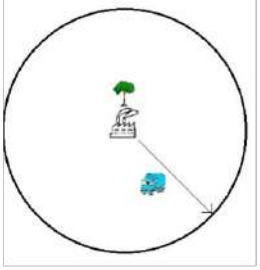
Observa-se que, ao atribuir à TIR a um valor de 14%, foi possível aumentar a distância possível de ser percorrida anualmente para aqueles anos, com a produção máxima em 4.180,86 quilômetros. Com isto ocorrendo é possível também afirmar que ao economizar 4.180,86 quilômetros anualmente, a TIR iria aumentar em 1%, confirmando, assim, o impacto do custo de transporte no investimento.

Em relação à localização do empreendimento, é possível afirmar que, em termos de custo de transporte, a matéria-prima não é um fator de atração, pois o custo para transportá-la até a usina e aquele para transportar o produto acabado até o consumidor final são equivalentes. Entretanto, em termos de competitividade, em se tratando do aumento da região econômica e ao se considerar a existência de mercado consumidor, há vantagem competitiva em estar localizado na região produtora da matéria-prima, pois a distância que iria ser percorrida para o transporte deste insumo até a usina poderá ser convertida para o transporte do produto acabado para o centro consumidor.

Pode-se considerar também outro caso, em que o mercado consumidor seja extremamente localizado, ou seja, em que todos os clientes possam ser atendidos em um centro consumidor. Neste exemplo não haverá diferença em estar localizado próximo da fonte da matéria-prima ou junto ao mercado consumidor. Porém, em quaisquer das três situações, a distância máxima a ser percorrida será a mesma.

Para ilustrar este entendimento foi elaborada a Figura 3, que representa três possíveis cenários para a localização do empreendimento, que variam de acordo com a distância entre a fonte de matéria -prima e a usina de tratamento de madeira. De acordo com essa figura, é possível observar a vantagem competitiva referenciada pelo raio de ação da empresa.

Figura 3 - Raio de ação de uma usina de tratamento de madeira considerando-se três cenários.

Cenário 1 – A fonte de matéria-prima está afastada da usina de tratamento de madeira.	Cenário 2 – A fonte de matéria-prima está mais próxima da usina de tratamento de madeira.	Cenário 3 – A fonte de matéria-prima está localizada nas proximidades da usina de tratamento de madeira.
		

Fonte: Elaborado pelos autores.

6. Considerações Finais

Os custos relacionados com o transporte são determinantes para o ganho de competitividade em empreendimentos florestais, o que pode ser explicado pelas características específicas da matéria-prima relacionada. Isto possibilita a realização de estudos que permitam responder qual o impacto que o custo de transporte exerce na decisão locacional de uma planta industrial de tratamento de madeira.

Com base nos resultados apresentados, pode-se inferir que os custos logísticos representam mais da metade de todos os gastos anuais relacionados com a empresa, verificando, assim, a importância deste setor no fluxo de caixa de uma empresa.

Em se tratando dos resultados acerca da localização da usina, conclui-se que o empreendimento deve se localizar próximo à matéria-prima para aumentar, assim, a margem de atendimento a demandas mais afastadas do local de produção. No entanto, é necessário se atentar aos limites anuais das distâncias estabelecidas, pois as ações de transporte da matéria-prima e de entrega do produto acabado não devem percorrer distâncias superiores às estabelecidas pelo modelo.

Este trabalho limita-se em realizar os cálculos propostos para uma usina de tratamento de madeira que tem única e exclusivamente o mourão tratado como seu produto final para comercialização. Caso a empresa trabalhe com outros produtos, como postes, vigas, cruzetas e tábuas, o modelo proposto não poderá ser replicado, razão esta explicada pelo fato do produto final ter dimensões e massas diferentes da matéria-prima utilizada no processo.

ANEXO I - Parâmetros utilizados e cotações para a composição do custo fixo e variável do veículo MB 1620.

	Nº	Descrição dos Dados	Unidade	Valores de Referência
Cotações Mensais	1	Preço do Veículo	R$	167.676,00
	2	Preço do Estepe do Veículo	R$	1.407,18
	3	Preço do Pneu do Veículo	R$	1.295,07
	4	Preço da Câmara do Veículo	R$	79,76
	5	Preço do Protetor do Veículo	R$	32,35
	6	Preço do Equipamento	R$	23.988,43
	7	Preço do Pneu do Equipamento	R$	1.987,21
	8	Preço da Câmara do Equipamento	R$	122,39
	9	Preço do Protetor do Equipamento	R$	49,63
	10	Preço do 3º Eixo sem Pneus	R$	22.080,62
	11	Preço do Rodoar	R$	1.227,55
	12	Preço da Recauchutagem	R$	254,94
	13	Preço do Combustível	R$	2,350
	14	Preço do Óleo de Cárter	R$	10,13
	15	Preço do Óleo de Câmbio	R$	14,12
	16	Preço da Lavagem do Veículo	R$	148,84
Outras Cotações	17	Depvat do Veículo	R$	85,76
	18	Taxa de Licenciamento do Veículo	R$	69,39
	19	IPVA	R$	2.762,00
	20	Salário do Motorista	R$	1.498,18
	21	Salário do Mecânico	R$	1.586,64
Parâmetros Técnicos 22	22	Quantidade de Pneus do Veículo	un.	6,00
	23	Quantidade de Pneus (3º eixo)	un.	4,00
	24	Vida Útil do Veículo	Meses	108,00
	25	Taxa de Reposição do Veículo	%	67,70
	26	Periodicidade de Lavagem do Veículo	km	4.536
	27	Vida Útil do Equipamento	Meses	92,00
	28	Taxa de Reposição do Equipamento	%	95,00
	29	Perda do Pneu Novo	%	20,00
	30	Vida Útil do Pneu C/ 1 Recauchutagem	km	243.640
	31	Quilometragem Percorrida Mensalmente	km	9.553
	32	Quantidade de Veículos Atend. p/ Mecânico	un.	1,00
	33	Rendimento do Combustível	km/L	3,58
	34	Capacidade de Óleo de Cárter	Litros	15,00
	35	Capacidade de Óleo Caixa Diferencial	Litros	10,25
	36	Troca do Óleo de Cárter	km	14.642
	37	Troca do Óleo Diferencial	km	45.235
	38	Reposição até a Próxima Troca	Litros	9,00
	39	Taxa de Remuneração de Peças	%	1,00
	40	Taxa de Remuneração de Capital	%	8,50
	41	Taxa sem Materiais para Manutenção	%	1,35
	42	Coeficiente da Importância Segurada	%	9,06
	43	Custo da Apólice	R$	36,50
	44	IOF	%	7,00
	45	Encargos Sociais e Trabalhistas	%	0,00

Fonte: Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística (2013).

REFERÊNCIAS

ABREU, H. S. Biossíntese de lignificação. Seropédica: Editora da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1994. 73 p.

ABREU, H. S.; NASCIMENTO, A. M.; MARIA, M. A. Lignin structure and wood properties. Wood and Fiber Science, Monoma, v. 31, n. 4, p. 426-433, jan. 1999.

ABREU, L. B.; MENDES, L. M.; SILVA, J. R. M. Aproveitamento de resíduos de painéis de madeira gerados pela indústria moveleira na produção de pequenos objetos. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 33, n. 1, p. 171-177, jan./fev. 2009.

ADLER, E. Lignin chemistry – past, present and future. Wood Science and Technology, Berlim, v. 11, n. 3, p. 169-218, sep. 1977.

AGUIAR, A. P. D. et al. Modeling the spatial and temporal heterogeneity of deforestation-driven carbon emissions: the INPE-EM framework applied to the Brazilian Amazon. Global Change Biology, v. 18, p. 3346-3366, aug. 2012. Doi: 10.1111/j.1365-2486.2012.02782.x

AGUIAR, O. J. R. Métodos de controle de rachaduras de topo em toras de Eucalyptus grandis Hill ex-Maiden, visando a produção de lâminas por desenrolamento. 1986. 96 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

AHMADI, B. H.; SAKA, M. P. Behaviour of composite timber-concrete floors. Journal of Structural Engineering, Michigan, v. 119, n. 10, p. 3111-3130, nov. 1993.

ALAMSYAH, E. M.; YAMADA, M.; TAKI, K. Bondability of tropical fast-growing tree species III: curing behavior of resorcinol formaldehyde resin adhesive at room temperature and effects of extractives of Acacia mangium wood on bonding. Journal of Wood Science, Heidelberg, v. 54, p. 208-213, jun. 2008.

ALMEIDA, A. O. Recuperação de compostos orgânicos voláteis (COVs) emitidos no processo de produção de tubos fotorreceptores orgânicos. 2005. 157 f. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2005.

ALMEIDA, D. H. D. et al. Caracterização completa da madeira da espécie amazônica Paricá (Schizolobium amazonicum Herb) em peças de dimensões estruturais. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 37, n. 6, p. 1175-1181, nov./dez. 2013.

ALMEIDA, R. R.; BORTOLETTO JUNIOR, G.; JANKOWYSY, I. P. Produção de compensados a partir da madeira de clones do híbrido Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 11, n. 1, p. 14-24, ago./dez. 2004.

ALVES, I. C. N. Propriedades da madeira e do carvão vegetal em clones de híbridos de Eucalyptus cultivados em diferentes ambientes. 2014. 107 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2014.

ALZATE, S. B. A. Caracterização da madeira de árvores de clones de Eucalyptus grandis, Eucalyptus saligna e Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla. 2004. 151 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION - AITC. Test A190.1: Structural Glued Laminated Timber. Centennial, CO, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM D 198: Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. Philadelphia, PA, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM D 5582: Standard Test Method for Determining Formaldehyde Levels from Wood Products Using a Desiccator. Pensilvânia, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM D 6007: Standard Test Method for Determining Formaldehyde Concentration in Air from Wood Products Using a Small Scale Chamber. Pensilvânia, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM E - 1333: Standard Test Method for Determining Formaldehyde Concentrations in Air and Emission Rates from Wood Products Using a Large Chamber. Pensilvânia, 2010.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM D245-06: Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber. West Conshohoken, 2011.

AMODEI, J. B. et al. Avaliação preliminar da qualidade da madeira de Tectona grandis L. f. através da tomografia de impulso. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 17, n. 2, p. 124-128, jul./dez. 2010.

AMUTIO, M. et al. Influence of temperature on biomass pyrolysis in a conical spouted bed reactor. Resources, Conservation and Recycling, v. 59, p. 23-31, feb. 2012.

ANDRADE, W. S. P. Localização das agroindústrias de aves e suínos no Brasil. 2005. 173 f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

ANSHARI, B.; GUAN, Z. W.; KITAMORI, A.; JUNG, K.; KOMATSU, K. Structural behaviour of glued laminated timber beams pre-stressed by compressed wood. Construction and Building Materials, Edinburgh, v. 29, p. 24-32, apr. 2012.

ARANTES, M. D. C. Variação nas características da madeira e do carvão vegetal de um híbrido de Eucalyptus grandis W.Hill ex Maiden x Eucalyptus urophylla S. T. Blake. 2009. 155 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

ARFELLI, F. et al. Mammography with synchrotron radiation: phase-detection techniques. Radiology, Oak Brook, v. 215, n. 1, p. 286-293, apr. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE – ABIMC, 2009. Disponível em: <http://www.abimci.com.br/ abimcidocs/2009.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA – ABIPA, 2014. Disponível em: <http://www.abipa.org.br>. Acesso em: 26 mar. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA – ABIPA, 2013. Disponível em: < http://www.abipa.org.br/numeros.php>. Acesso em: 17 nov. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 14.810-3: chapas de madeira aglomerada: métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2006. 51 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 15316-1: chapas de fibra de média densidade: terminologia. Rio de Janeiro, 2002. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7188: Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre: procedimento. Rio de Janeiro, RJ. 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 9532: chapas de madeira compensada. Rio de Janeiro, 1986. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: Resíduos Sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9480: peças roliças preservadas de eucalipto para construções rurais: requisitos. Rio de Janeiro, 2009. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. Anuário estatístico da ABRAF 2013 ano base 2012. Brasília: ABRAF, 2013. 148 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS –ABRAF. Anuário estatístico da ABRAF 2012: ano base 2011. Brasília, DF, 2012. 145 p.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA – AMS. Disponível em: <http://www.silviminas.com.br>. Acesso em: 08 dez. 2010.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE DE CARGAS E LOGÍSTICA-NTC&LOGÍSTICA. Planilha de custo de transporte. Disponível em: <http://xa.yimg.com/kq/groups/14160460/801939026/name/Planilha+de+Custo+de+Transporte.xls>. Acesso em: 04 dez. 2013.

ASSUNÇÃO, J. V. Controle Ambiental do Ar. In: PHILIPPI JR., A.; ROMÉRO, M. A.; BRUNA, G. C. (Ed.). Curso de Gestão Ambiental. Barueri: Manole, 2004. cap. 4. p. 101-154.

ASSUNÇÃO, R. S. Avaliação das emissões de compostos orgânicos voláteis (VOCs) em operações de carga e descarga de derivados líquidos de petróleo. 2003. 38 f. Monografia (Especialização em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais na Indústria) –Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2003.

ATHANASSIADOU, E.; OLHLMEYER, M. Emissions of Formaldehyde and VOC from Wood-based Panels". In: FAN, M.; OHLMEYER, M.; IRLE, M. (Ed.). Performance in use and new products of wood based composites. COST ACTION WG3 (E49), London: Brunel University Pres, 2009. p.219-240.

ATKINS, P.; JONES, L. Princípios de química: questionado a vida moderna e o meio ambiente. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 968 p.

AYALA, K. M.; VIEIRA, D. V.; DUPUY, M. A. A. G. Experiencia del aprovechamiento de los residuos en um aserrío. Revista Forestal Baracoa, Havana, v. 26, n. 1, p. 53-60, 2007.

AYRILMIS, N. et al. Utilization of pine (Pinus pinea L.) cone in manufacture of wood based composite. Forest Ecology and Management, Amsterdam, v. 259, n. 1, p. 65-70, dez. 2009.

AZAMBUJA, M. A. Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas. 2006, 128 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2006.

AZEREDO, N. R. S. Atual situação de oferta e demanda de matéria-prima de reflorestamento. In: SEMINÁRIO SOBRE PROCESSAMENTO E UTILIZAÇÃO DE MADEIRA DE REFLORESTAMENTO, 2., 1998, Curitiba, PR. Anais... Curitiba, 1998. p. 120-138.

BALLARIN, A. W.; TARGA, L. A.; PALMA, H. A. Ensaios não destrutivos de vibração transversal na avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento. ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM

ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002, Uberlândia. Anais... Uberlândia, 2002.

BALLESTEROS-CÁNOVAS, J. A.; STOFFEL, M.; GUARDIOLA-ALBERT, C. XRCT images and variograms reveal 3D changes in wood density of riparian trees affected by floods. Trees, Berlin, v. 29, n.4, p. 1115-1126, aug. 2015.

BANKS, A. D. Aproveitamento de resíduos da indústria da madeira. Revista da Madeira, ano 12, n. 69, p. 28-30, 2003.

BAO, W.; O'MALLEY, D. M.; SEDEROFF, R. R. Wood contains a cell-wall structural protein. Plant Biology, Bethesda, v. 89, p. 6604-6608, jul. 1992.

BARBOSA, A. P.; MANO, E. B.; ANDRADE, C. T. Tannin-based resins modified to reduce wood adhesive brittleness. Forest Products Journal, Madison, v. 50, n. 9, p. 89, sep. 2000.

BARCELOS, A. F.et al. Determinação dos fatores antinutricionais da casca e da polpa desidratada de café (Coffea arabica L.) armazenadas em diferentes períodos. In: II SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 24 a 27 de set. 2001, Vitória: ES, p. 842-848, 2001.

BARROSO, R. C. Tomografia computadorizada seletiva usando efeitos de interferência em difração de raios-X. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

BASTA, A. H.; El-SAIED, H.; GOBRAN, R. H.; SULTAN, M. Z. Enhancing environmental performance of formaldehyde-based adhesives in lignocellulosic composites, part III: evaluation of some starch derivatives. Designed Monomers & Polymers, Philadelphia, v. 9, n. 4, p. 325-347, 2006.

BATCHELAR, M. L.; MCINTOSH, K. A. "Structural Joints in Glulam," Proceedings: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 5., Montreux: Switzerland, v. 1, 1998. p. 289-296.

BATTISTELLE, R. et al. Caracterização física das chapas de partículas com os rejeitos oriundos da cana-de-açúcar e das folhas de bambu. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURA DE MADEIRA, 12., 2010, Lavras. Anais... Lavras: UFLA/IBRAMEM, 25-28 jul. 2010. 1 CD-ROM.

BELGACEM, M. N.; GANDINI, A. Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources. Amsterdam: Elsevier, 2008. 562 p.

BELINI, U. B. et al. Propriedades de painéis MDF de Eucalipto. Revista da Madeira, n. 125, nov. 2010.

BELINI, U. L. Caracterização e alterações na estrutura anatômica da madeira do Eucalyptus grandis em três condições de desfibramento e efeito nas propriedades tecnológicas de painéis MDF. 2007. 90 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

BELINI, U. L. Caracterização tecnológica de painéis de madeira de eucalipto, Eucalyptus grandis, e de partículas do bagaço do colmo de cana-de-açúcar, Saccharum sp. 2012. 169 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

BELINI, U. L. et al. Alterações na estrutura anatômica da madeira de cavacos de Eucalyptus grandis em três condições de desfibramento para a confecção de painéis MDF. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 32, n.3, p. 523-532, jun. 2008a.

BELINI, U. L. et al. Caracterização da estrutura tecnológica, densidade básica e morfologia de cavacos de madeira de Eucalyptus grandis para a produção de painéis MDF. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 32, n. 4, p. 707-713, jun. 2008.

BELINI, U. L.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação tecnológica de painéis MDF de madeira de Eucalyptus grandis confeccionados em laboratório e em linha de produção industrial. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 20, n. 3, p. 493-500, jun./set. 2010.

BENGTSSON, P. Physical and chemical characterization of the emissions from softwood drying. 2004. 6 f. Thesis (Licentiate) – Växjö University, School of Technology and Design. Sweden, 2004.

BIANCHE, J. J. et al. Propriedades de painéis aglomerados fabricados com partículas de eucalipto (Eucalyptus urophylla), paricá (Schizolobium amazonicum) e vassoura (Sida spp.). Cerne, Lavras v. 18, n. 4, p. 623-630, dez. 2012.

BILGEN, S.; KAYGUSUZ, K. The calculation of the chemical exergies of coal-based fuels by using the higher heating values. Applied Energy, Västerås, v. 85, n. 8, p. 776-785, aug. 2008.

BISANDA, E. T. N.; OGOLA, W. O.; TESHA, J. V. Characterisation of tannin resin blends for particle board applications. Cement and Concrete Composites, Vancouver, v. 25, n. 6, p. 593-598, aug. 2003.

BJORKMAN, H. Behaviour of timber and concrete composite load-bearing structures. Rilem TC 111 CST, Chapter 2, 2002. p. 21.

BODIG, J. The Process of NDE research for wood and wood composites. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 12th, Sopron. Proceedings, University of Western Hungary, 2000.

BOLAND, D. J.et al. Forest trees of Australia. 5. ed. Sidney: CSIRO, 2006.

BOLOGNESI, L. Quantificação de formaldeído em extrato aquoso obtido da emissão de painéis de madeira por espectrofotometria acoplada à injeção em fluxo. 2010. 64 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2010.

BORAN, S.; USTA, M.; ONDARAL, S.; GÜMÜŞKAYA, A. The efficiency of tannin as a formaldehyde scavenger chemical in medium density fiberboard Composites Part B: Engineering, New Orleans, v. 43, n. 5, jul. 2011b.

BORAN, S.; USTA, M.; GUMUSKAYA, E. Decreasing formaldehyde emission from medium density fiberboard panels produced by adding different amine compounds to urea formaldehyde resin. International Journal of AdhesionandAdhesives, Oxford, v. 31, p. 674-678, oct. 2011a.

BORGES, J. C.; ATHANASSIADOU, E.; TSIANTZI, S. Bio-based resins for wood composites. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTALLY-COMPATIBLE FOREST PRODUCTS, 2, 2006, Porto. Anais... Porto: Fernando Pessoa University, 2006. CD-Rom.

BORTOLETTO JÚNIOR, G. Comparative study of the physical and mechanical properties of the wood and of LVL of Pinus merkusii. Revista Forestal Venezolana, Mérida, v. 53, n. 2, p.191-194, jul./dec. 2009.

BORTOLETTO JUNIOR, G. Produção de compensados com 11 espécies do gênero Eucalyptus, avaliação das suas propriedades físico-mecânicas e indicações para utilização. Scientia Forestalis, Piracicaba, n. 63, p. 65-78, jun. 2003.

BOSWELL, J. T.; HUNT, M. L. A survey of air emission from reconstituted wood plants. In: INTERNATIONAL PARTICLEBOARD / COMPOSITE MATERIAL SYMPOSIUM, 25., 1991, Pullman. Anais… Pullman: Washington State University, 1991. p. 125-146.

BOTREL, M. C. G. Melhoramento genético do Eucalyptus para biomassa florestal e qualidade do carvão vegetal. 2006. 68 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2006.

BRAND, M. A. Energia da biomassa florestal. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.

BRASIL. Balanço Energético Nacional 2013 (ano base 2012). Brasília/DF: Ministério de Minas e Energia/MME, 2013. 284 p.

BRAUNS, F. E. The Chemistry of Lignin. New York: Academic Press, 808, 1952 p.

BRETHAUER, S.; WYMAN, C. E. Review: Continuous hydrolysis and fermentation for cellulosic ethanol production. Bioresource Technology, Mohali, v. 101, n. 13, p. 4862-4874, jul. 2010.

BRIDGWATER, T. Biomass for energy. Journal of the Science of Food and Agriculture, Birmingham, v. 86, n. 12, p. 1755-1768, sep. 2006.

BRITO, E. O. Estimativa da produção de resíduos na indústria brasileira de serraria e laminação de madeira. Revista da Madeira, ano 4, n. 26, p. 34-39, 1995.

BRITO, E. O. et al. Chapas de madeira aglomerada de uma camada de Pinus elliottii Engelm. com a adição das cascas de Eucalyptus pellita F. Muell. Cerne, v. 11, n. 4, p. 369-375, 2005.

BRITO, E. O. et al. Propriedades de chapas produzidas com resíduos do fruto de côco e partículas de pinus. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 11, n. 2, p. 01-06, ago./dez. 2004.

BRITO, L. D. Recomendações para o projeto de construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento. 2010. 339 f. Dissertação (Metrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2010.

BRITO. J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS, 2, 1982, São Paulo. Anais ... São Paulo, Governo do Estado, p. 101-137, 1982.

BROWNING, B. L. The chemistry of wood. New York: John Wiley & Sons, 1963. 689 p.

BRUNETON, J. Farmacognosia: Fitoquímica Plantas Medicinales. 2. ed. España: Acríbia, 2001. p. 365-400.

BRUYNE, T. et al. Biological evaluation of proanthocyanidin dimmers and related polyphenols. Journal of Natural Products, Washington, v. 62, n. 7, p. 954-958, jul. 1999.

BUCUR, V. Acoustics as a tool for the nondestructive testing of wood. The e- Journal of Nondestructive Testing, v. 4, n. 11, nov. 1999. Disponível em: <http://www.ndt.net/ index.html>. Acesso em: 21 nov. 2014.

BUCUR, V. Acoustics of wood. Boca Raton, USA: CRC Press, 1995.

BUCUR, V. An ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees. Ultrasonics, Oxford, v. 21, n. 1, p. 116-126, may. 1983.

BUCUR, V. Techniques for high resolution imaging of wood structure: a review. Measurement Science and Technology, Magdeburg, v. 14, n. 12, p. 91-98, oct. 2003.

BUCUR, V.; BÖHNKE, I. Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. Ultrasonics, Oxford, v. 32, n. 5, p. 385-389, sep. 1994.

CALEGARI, L. et al. Adição de aparas de papel reciclável na fabricação de chapas de madeira aglomerada. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 14, n. 1, p. 193-204, 2004.

CALEGARI, L. et al. Desempenho físico-mecânico de painéis fabricados com bambu (Bambusa vulgaris Schr.)

em combinação com madeira. Cerne, Lavras, v. 13, n. 1, p. 57-63, jan./mar. 2007.

CALIL JÚNIOR, C. et al. Manual de projeto e construção de pontes de madeira. São Carlos: Suprema, 2006. 252 p.

CALIL JÚNIOR, C.; OKIMOTO, F. S.; PFISTER, G. M. Manual de classificação visual. Convênio Racional Engenharia S/A e IBRAMEM. [20--?].

CALIL NETO, C. Madeira Laminada Colada (MLC): Controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo. 2011. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2011.

CALIL, C. Brazilian Handbook for the Design and Construction of Timber Bridges. In: Proceedings: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 10, (WCTE 2008), Miyazaki: Japan, 2008.

CALIL, C. Timber Bridges in South America. NCWTS, 2010. Disponível em: <http://www.woodcenter.org/docs/calil96a.pdf>. Acesso em: 20 set. 2014.

CALVÉ, L. R., SHIELDS, J. A.; BLANCHETTE, L.; FRECHET, J .M. L. A pratical lignin-based adhesive for waferboard/OSB. Forest Products Journal, Madison, v. 38, n. 5, p. 15-20, 1988.

CAMARGO, F. L. Estudo da pirólise rápida de bagaço de cana em reator de leito fluidizado borbulhante. 2006. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2006.

CANDIAN, M. Estudo da classificação não destrutiva de peças serradas cultivadas no Brasil para uso de estruturas. 2007. 154 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2007.

CANDIAN, M.; SALES, A. Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 83-98, out./dez. 2009.

CARB, A. Quick Reference Guide to the California Air Resources Board's Airborne Toxic Control Measure (ATCM) for Formaldehyde Emissions from Composite Wood Products, 2009.

CARDOSO, M. T. et al. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. Cerne, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 115-124, jul. 2010.

CARLSON, F. E.; PHILIPS, E. K.; TENHAEFF, S. C.; DETLEFSEN, W. D. A study of formaldehyde and other organic emissions from pressing of laboratory oriented strandboard. Forest Products Journal, Madison, v. 45, n. 3, p. 71-78. 2005.

CARNEIRO, A. C. O. Efeito da sulfitação dos taninos de E. grandis eE. pellitapara produção de chapas de flocos. 2002. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2002.

CARNEIRO, A. C. O. Efeito da hidrólise ácida e sulfitação de taninos de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden e Anadenanthera peregrina Speg nas propriedades dos adesivos. 2006. 182 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

CARNEIRO, A. C. O. et al. Estudo da decomposição térmica da madeira de oito espécies da região do seridó, Rio Grande do Norte. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 37, n. 6, p. 1153-1163, dez. 2013.

CARNEIRO, A. C. O. et al. Propriedades de chapas de aglomerado fabricadas com adesivo tânico de angico-vermelho (Anadenanthera peregrina) e uréia-formaldeído. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 33, n. 3, p. 521-531, jun. 2009.

CARNEIRO, A. C. O. et al. Propriedades de chapas de flocos fabricadas com adesivos de uréia formaldeído e de taninos da casca de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden ou de Eucalyptus pellita F. Muell. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 28, n. 5, p. 715-724, out. 2004.

CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; PIMENTA, A. S.; MORI, F. A. Reatividade dos taninos da casca de Eucalyptus grandis para produção de adesivos. Cerne, Lavras, v. 7, n. 1, p. 01-09, 2001.

CARPINTERIA. Disponível em: <http://estruturasdemadeira.blogspot.com.br/2014/04/ shopping-iguatemi-fortalezaa-maior.html>. Acesso em: 16 maio 2015.

CARRASCO, E. V. M.; PASSOS, L. B. ; MANTILA, J. N. R. Structural behavior evaluation of Brazilian glulam wood sleepers when submitted to static load. Construction and Building Materials, Edinburgh, v. 26, p. 334-343, jan. 2012.

CARREIRA, M. R. Critérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus sp. 2003. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003.

CARREIRA, M. R.; CANDIAN, M. Teste de um equipamento para classificação de peças estruturais de madeira pela técnica da vibração transversal. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 29, n. 1, p. 03-14, jan./jun. 2008.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. Avaliação da rigidez à flexão de toras de madeira por meio de vibração transversal. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 11, n. 53, p. 75-79, 2009.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. Critérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus sp. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 8, n. 34, p. 17-43, 2006.

CARREIRA, M. R.; SEGUNDINHO, P. G. A.; DIAS, A. A. Estimativa do módulo de elasticidade à flexão de toras de madeira por meio de vibração transversal livre. Construindo, Cruzeiro, v. 3, n. 2, p. 27-31, jul./dez. 2011.

CARVALHO L. et al. Influence of wood raw-material on formaldehyde release from wood-based panels. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROCESSING TECHNOLOGIES FOR THE FOREST AND BIO-BASED PRODUCTS INDUSTRIES, 3., Campus Kuchl, Áustria, 24-26 Sep. 2014. p. 534-541.

CARVALHO, G.; FROLLINI, E. Lignina em espumas fenólicas. Polímeros, São Carlos, v.9, n.1, p. 66-75, jan./mar. 1999.

CARVALHO, L.; MAGALHÃES, F.; FERRA, J. Formaldehyde Emissions from Wood-Based Panels – Testing Methods and Industrial Perspectives. In: CHENG, C. B.; LIN, F. H. (Ed.). Formaldehyde: chemistry, applications and role in polymerization, Hauppauge: NY: Nova Science Publishers, 2012. p. 73-107.

CASTRO, A. F. N. M. et al. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 48, n. 6, p. 627-635, jun. 2013.

CASTRO, A. Uma investigação teórico-experimental da combustão de madeira. 2005. 59 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2005.

CECCOTTI, A. Timber-concrete composite structures. In: BLASS, H. J. et al. Timber Engineering – STEP 2 (Structural Timber Education Programme). The Netherlands Centrum Hout, 1995. p. E13/1-E13/12.

CENTRO CIENTÍFICO INTELIGENTE – CCI. Gestão e Tratamento de Resíduos: Plasma Pirólise. Disponível em: < http://paginas.fe.up.pt/~jotace/ >. Acesso em: 24 de ago. 2015.

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DO AGRONEGÓCIO –CEDAGRO. Dimensionamento do mercado

capixaba de produtos florestais madeiráveis. Vitória: CEDAGRO, 2011. 111 p. (Relatório Final).

ÇETIN, N. S.; ÖZMEN, N. Use of organosolv lignin in phenol-formaldehyde resins for articleboard production II. Particleboard production and properties. International Journal of Adhesion & Adhesives, Oxford, v. 22, n. 6, p. 481-486, 2002 a.

ÇETIN, N. S.; ÖZMEN, N. Use of organosolv lignin in phenol–formaldehyde resins for particleboard production I. Organosolv lignin modified resins. International Journal of Adhesion & Adhesives, Oxford, v. 22, n. 6, p. 477-480, 2002 b.

CHANG, R. Análise dos compostos fenólicos da madeira do E. grandis e do E. urophylla do Triângulo Mineiro. 2000. 105 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2000. RESUMO. Disponível em: <http://www.cpgquimica.iqufu.ufu.br/Dissertacoes/chang.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2010.

CHAPPARD, D. et al. Fractal dimension of trabecular bone: comparison of three histomorphometric computed techniques for measuring the architectural two-dimensional complexity. Journal Pathol, v. 195, n. 4, p. 515-521, nov. 2006.

CHEN, F. et al. A polymer of caffeyl alcohol in plant seeds. PNAS, v. 109, n. 5, p. 1772-1777, jan. 2012.

CHEN, F. et al. Novel seed coat lignins in the Cactaceae: structure, distribution and implications for the evolution of lignin diversity. The Plant Journal, Medford, v. 73, n. 2, p. 201-211, jan. 2013.

CHEN, S.; WELLWOOD, R. Nondestructive evaluation of oriented strand board. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 13, 2002; Berkeley, 2002.

CHIPANSKI, E. R. Proposição para melhoria do desempenho ambiental da indústria de aglomerado no Brasil. 2003. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

CHOU, M. S.; CHENG, W. S. Screening of biofiltering material for VOC treatment. Journal of the Air & Waste Management Association, v. 47, n. 6, p. 674-681, jun. 1997.

CHOW, S. Adhesive developments in forest products. Wood Science and Tecnology, Berlim, v. 17, n. 1, p. 1-11, 1983.

CICCIOLI, P. Chemistry and analysis of volatile organic compounds in the environment. In: BLOEMEN, H. J. T.; BURN, J. (Ed.). London: Blackie Academic & Professional, 1993. p. 92-174.

CLOUTIER, A. Oriented strandboard (OSB): raw material, manufacturing process, properties, and uses. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON SOLID WOOD PRODUCTS OF HIGH TECHNOLOGY, 1., 1998, Belo Horizonte, MG. p. 173-185.

COLLI, A. et al. Propriedades de chapas fabricadas com partículas de madeira de paricá (Schyzolobium amazonicum Huber ex. Ducke) e fibras de côco (Cocos nucifera L.). Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 34, n. 2, p. 333-338, abr. 2010.

COMMERCIAL STANDARD - CS. CS 236-66: Mat formed wood particleboard, 1968.

COPPENS, H. A.; SANTANA, M. A. E.; PASTORE, F. J. Tannin formaldehyde adhesive for exterior-grade plywood and particleboard manufacture. Forest Product Journal, Madison, v. 30, n. 4, p. 38-42, 1980.

CORTEZ, L. A. B.; JUNIOR, R. B.; ALMEIDA, E. Energia da cana-de-açúcar. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (Org.). Bioenergia e biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais. Viçosa, MG: UFV, 2013. 551 p.

COSTA, N. et al. Scavengers for achieving zero formaldehyde emission of wood-based panels. Wood Science and Technology, Berlim, v. 47, n. 6, p. 1261-1272, jul. 2013a.

COSTA, N. et al. Sodium metabisulfite as a scavenger of air pollutants for wood-based building materials. International Wood Products Journal, London, v. 4, n. 4, p. 242-247, nov. 2013b.

COSTA, N. et al. The performance of scavengers on VOC emission in particleboards made from pine and poplar. European Journal of Woodand Wood Products, Berlim, v. 72, n. 1, p. 117-121, 2014.

COSTA, N. et al. The role of sucrose in amino polymers synthesized by the strongly acid process. Journal of Adhesion Scienceand Technology, v. 27, n. 7, p. 763-774, 2012.

COSTA, T. G. et al. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. Cerne, Lavras, v. 20, n. 1, p. 37-45, jan./mar. 2014.

COUTO, A. M. Modelagem da densidade básica e caracterização química em clones de Eucalyptus urophylla e Eucalyptus grandis. 2011. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2011.

COVINGTON, A. D. Modern tanning chemistry. Chemical Society Reviews, Cambridge, v. 26, n. 2, p. 111-126, 1997.

CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. Bending stiffness and resistence of structural glulam beams and "I" – joist composed of different adhesives. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 20, n. 2 , p. 345-356, apr./jun. 2010.

DACOSTA, L. P. E. Utilização de resíduos do processamento mecânico da madeira para a fabricação de chapas de partículas aglomeradas. 2004. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2004.

DAVID, K. I. et al. Study upon the quality of aminoplast structural adhesive mixed with lignin for load bearing timber structures. In: INTERNATIONAL PANEL PRODUCTS SYMPOSIUM, 2008, Espoo, 2008, p. 261-265.

DAVIDS, W. G.; RITCHIE, M.; GAMACHE, C. Fadigue of glulam beams with fiber reinforced polymer tension reinforcing. Forest Products Journal, Madison, v. 55, n. 1, p. 93-101, jan. 2005.
DAVIS, M. EBERHARD, A. A.; Combustion characteristics of fuelwood. South African Forestry Journal, v. 158, n. 1, p. 17-22, sep. 1991.

DE LUCA, V.; MARANO, V. Structural behaviour of glued laminated timber beams pre-stressed by compressed wood. Construction and Building Materials, Edinburgh, v. 29, p. 24-32, apr. 2012.

DEIDOT, D. Bridge Book: Delaware Department of Transportation, 2010, 25 p Disponível em: <http://www.deldot.gov/archaeology/historic_pres/delaware_bridge_book /pdf/reinfor_ conc_186-209.pdf>. Acesso em: 20 set. 2014.

DEL MENEZZI, C. H. S.; SILVEIRA, R. R.; SOUZA, M. R. Estimativa das propriedades de flexão estática de seis espécies de madeiras amazônicas por meio da técnica não-destrutiva de ondas de tensão. Acta Amazônica, Manaus, v. 40, n. 2, p. 325-332, 2010.

DEL RÍO, J. C. D. et al. Determining the influence of eucalypt lignin composition in paper pulp yield using Py-GC/MS. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 74, n. 1-2, p. 110–115, aug. 2005.

DIEHL, S. V.; SAILEELA, B.; WASSON, L.; BORAZJANI, A. Biofiltration of selected monoterpenes found in southern wellow pine wood emissions. Forest Product Journal, Madison, v. 50, n. 1, p. 43-49, jan. 2000.

DIX, B.; MARUTZKY, R. Tanninformaldehydharze aus den Rindenextrakten von Fichte (Picea abies) und Kie-

fer (Pinus sylvestris). Holz als Roh- und Werkstoff, Berlim, v. 45, n. 11, p. 457-463, jan. 1987.

DOHERTY, W. et al. Studies on polymers and composites from lignin and fiber derived from sugar cane. Polymers for Advanced Technologies, v.18, p. 673-678, aug. 2007.

DONALDSON, L. A. Lignification and lignin topochemistry – an ultrastructural view. Phytochemistry, Nantes, v. 57, n. 6, p. 859-873, jul. 2001.

DUNKY, M. Challenges with formaldehyde based adhesives. In: PROPERZI, M.; PICHELIN, F.; LEHMANN, M. (Ed.). CONFERENCE, INNOVATIONS IN WOOD ADHESIVES, Switzerland: Bern University of Applies Sciences, 2004. p. 91-106.

DUNKY, M. Urea-formaldehyde (UF) adhesive resins for wood. International Journal of Adhesion and Adhesives, Oxford, v. 18, n. 2, p. 95-107, mar. 1998.

DUNLOP, J. L. Testing of poles by using acoustic pulse method. Wood Science and Technology, Berlim, v. 15, n. 4, p. 301-310, dec. 1981.

DUTRA, R. I. J. P.; NASCIMENTO, S. M.; NUMAZAWA, S. Resíduos de indústria madeireira: caracterização, consequências sobre o meio ambiente e opções de uso. Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal, Garça, n. 5, jan. 2005.

EISFELD, C. L. Análise da competitividade entre as indústrias de painéis de madeira: compensado, MDF e OSB no estado do Paraná. 2009. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2009.

EL MANSOURI, N. -E.; PIZZI, A.; SALVADO, J. Lignin-based polycondensation resins for wood. Journal of Applied Polymer Science, New York, v. 103, p. 1690-1699, feb. 2007.

EL MANSOURI, N. -E.; SALVADO, J. Structural characterization of technical lignins for the production of adhesives: Application to lignosulfonate, kraft, soda-anthraquinone, organosolv and ethanol process lignins. Industrial Crops and Products, Amsterdam, v. 24, n. 1, p. 8-16, jul. 2006.

EMERSON, D. W. V. Métodos de análise de formaldeído e otimização da reação de Hantzschen. 2010. 89 f. Graduação em Engenharia Industrial Madeireira (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Cultivo do arroz irrigado no Brasil – Consumo, Mercado e Comercialização do Arroz no Brasil. Embrapa Clima Temperado – Sistemas de Produção, 3., 2005. Disponível em: <http://sistemasde producao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ ArrozIrrigadoBrasil/ cap18.htm>. Acesso em: 08 fev. 2010.

ENGLISH, B.; CHOW, P.; BAJWA, D. S. Processing into Composites. In: Paper and composites from agro-based resources. Chapter 8, p. 269-299. (s.d)

ENGLISH, B.; CHOW, P.; BAJWA, D. S. Processing into composites. In: ROWELL, R. M.; YOUNG, R. A.; ROWELL, J. K.. Paper and composites from afro-based resources. Boca Raton: CRC Press, Chapter 8, p. 269-299, 1997.

EOM, Y.-G.; KIM, H. -J.; KIM, J. -S; Kim, J. -S. Reduction of formaldehyde emission from particleboards by bio-scavengers. Journal of the Korean Wood Science and Technology, v. 34, p. 29-41, jan. 2006.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EUROCODE. ENV 1995-1-1: Design of timber structures: Part 1-1: General – common rules and rules for buildings. Brussels, 1993.

EUROPEAN STANDARD – EN. EN 120: Wood-based panel products: Determination of formaldehyde content – Extraction method called the perforator method, 1992.

EUROPEAN STANDARD – EN. EN 717-1: Wood-based panels: Determination of formaldehyde release – Part 1: Formaldehyde emission by the chamber method, 2004.

EUROPEAN STANDARD – EN. EN 717-2: Wood-based panel products: Determination of formaldehyde release by the gas analysis method, 1995.

EUROPEAN STANDARD – EN. EN 717-3: Wood-based panels: Determination of formaldehyde release Formaldehyde release by the flask method, 1996.

EVANS, R.; KIBBLEWHITE, R. P. Controlling wood stiffness in plantation softwoods. In: SYMPOSIUM NDT OF WOOD, 12., 2000, University of Western Hungary, Sopron, 2000. p. 67- 74.

FANG, M. X. et al. Kinetic study on pyrolysis and combustion of wood under different oxygen concentrations by using TG-FTIR analysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 77, n. 1, p. 22-27, aug. 2006.

FEHSENFELD, F. et al. Emission of volatile organic compounds from vegetation and the implications for atmospheric chemistry. Global Biogeochemical Cycles, v. 6, n. 4, p. 389-430, dec. 1992.

FERNANDES, E. R. K.; MARANGONI, C.; SOUZA; O.; SELLIN, N.Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. Energy Conversion and Management, Irbid, v. 75, p. 603-608, nov. 2013.

FERRA, J. et al. Optimization of the synthesis of ureaformaldehyde resins using response surface methodology. Journal of Adhesion Science and Technology, v. 24, n. 8-10, p. 1455-1472, apr. 2010.

FERREIRA, E. S. et al. Teores de taninos da casca de quatro espécies de pinus. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 16, n. 2, p. 30-39, 2009.

FERREIRA, E. S. Utilização dos polifenóis da casca de pinus para produção de adesivos. 2004. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2004.

FERREIRA, N. S. S. Sistemas estruturais em formato de abóbada reticulada. 2012. 118 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2012.

FERREIRA, V. M. D. Localização empresarial. 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado em Contabilidade) ─Instituto Superior de Contabilidade e Administração da Universidade de Aveiro, Aveiro, 2011.

FINNISH NATIONAL ROAD ADMINISTRATION – FINNRA. Nordic timber bridge project. FINNRA-FimT2, Finland, v.7, n.4, p.7-8, 1999.

FIORELLI, J. Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro. 2005. 108 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2005.

FIORELLI, J. et al. Physico-chemical and anatomical characterization of residual lignocellulosic fibers. Cellulose, v. 21, p. 3269-3277, 2014.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation. Materials and Structures, Dübendorf, v. 44, n. 8, p. 1431-1440, oct. 2011.

FLACH M.; FRENETTE C. D. Wood-Concrete-CompositeTechnology in Bridge Construction. Proceedings: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 8., (WCTE 2004), Lahti, Finland, 2004.

FLYNN, B.; SHIELD, E. Eucalyptus progress in higher value utilization: a global review. Tacoma: Robert Flynm & Associates. 1999. 212 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. Statistics Division. 2015. Disponível em: < http://faostat3.fao.org/download/F/FO/E/>. Acesso em: 06 maio 2015.

FRADINHO, D. M. et al. Chemical characterization of bark and of alkaline bark extracts from maritime pine grown in Portugal. Industrial Crops and Products, Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 23-32, july, 2002.

FREITAS, L. B. et al. Avaliação de características físicas de painéis aglomerados de uma mistura de eucalipto (Eucalyptus urophylla) e casca de mamona (Ricinus communis L.). In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BIODIESEL, 2., 2007, Brasília. Anais... Disponível em: <http://www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2007/ coproduto/3.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2010.

FREITAS, R. R.; GÓES, J. L. N. Classificação de peças estruturais de Pinus spp. pela MSR (Machine Stress Rate). Minerva, São Carlos, v. 2, n. 2, p. 119-129, jul./dez. 2005.

FREUDENBERG, K. Biosynthesis and constitution of lignin. Nature, London, v. 183, p. 1152-1155, apr. 1959.

FRIHART, C. R. Wood Adhesion and Adhesives. In: ROWELL, R. M. (Ed.). Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. Florida: Boca Ration: CRC Press, 2005. p. 215-278.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. Adhesives with wood materials: bond formation and performance. In: Wood handbook: wood as an engineering material. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Chapter 10, 2010. 24p.

FUJII, I. et al. Formaldehyde scavenger and wood, US Patent 8,389,125 B2, 2013.

GAIOTTO, M. R.; WATAI, L. T.; JANKOWSKY, I. P. Avaliação experimental do compensado de eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO E CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, Anais... Curitiba, 1993.

GAMA, R. O.; DIAS, F. M. Utilização do rejeito Unbleach Kraft Pulp (UKP), da indústria de celulose, na fabricação de concreto. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA. Disponível em: <http://www.aedb.br/seget/artigos08/ 547_547_ SEGeT_.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2010.

GAO, Z. et al. Novel Whey Protein-Based Aqueous Polymer-Isocyanate Adhesive for Glulam. Journal of Applied Polymer Science, New York, v. 120, n. 1, p. 220-225, apr. 2011.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. Ensaios dos materiais. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GARCÍA, R. et al. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. Bioresource Technology, Mohali, v. 103, n. 1, p. 249-258, jan. 2012.

GARRO-GALVEZ, J. M.; FECHTAL, M.; RIEDL, B. Gallic acid as a model of tannins in condensation with formaldehyde. Thermochimica Acta, Rostock, v. 274, n. 25, p. 149-163, mar. 1996.

GCESYSTEMS. Gulf Coast Environmental Systems: Thermal Oxidizers. Disponível em: < http://www.gcesystems.com/thermal-oxidizers.html >. Acesso em: 12 dez. 2013.

GENG, X.; LI, K. Investigation of wood adhesives from kraft lignin and polyethylenimine. Journal Adhesion Science Technology, London, v. 20, n. 8, p. 847-858, 2006.

GENTRY, T. R. Performance of glued lamined timbers with FRP shear and flexural reincorcement. Journal of Composites for Construction, Reston, v. 15, n. 5, p. 861-870, oct. 2011.

GERARDI, V.; MINELLI, F.; VIGGIANO, D. Steam treated rice industry residues as an alternative feedstock for the wood based particleboard industry in Italy. Biomass and Bioenergy, Aberdeen, v. 14, n. 3, p. 295-299, mar. 1998.

GIL, A.C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4.ed. São Paulo:Atlas, 2009.

GONÇALVES, C. A. Utilização do tanino da madeira de Mimosa caesalpiniaefolia Bentham (Sabiá) como matéria-prima alternativa para a produção de adesivos. 2000. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2000.

GONÇALVES, C. A.; LELIS, R. C. C. Teores de taninos da casca e da madeira de cinco leguminosas arbóreas. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 8, n. 1, p. 167-173, jan./dez. 2001.

GONÇALVES, F. G. Avaliação da qualidade da madeira de híbrido clonal de Eucalyptus urophylla x grandis para produtos sólidos. 2006. 167 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES, 2006.

GONÇALVES, F. G. Painéis aglomerados de madeira de Acacia mangium com adesivos de uréia-formaldeído e tanino em pó da casca de Acacia mearnsii. 2012, 105 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C. Propriedades de duas resinas sintéticas após adição de tanino modificado. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 16, n. 2, p. 1-7, 2009.

GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C.; OLIVEIRA, J. T. S. Influência da composição da resina tanino-uréia-formaldeído nas propriedades físicas e mecânicas de chapas aglomeradas. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 32, n. 4, p. 715-722, ago. 2008.

GONÇALVES, M. T. T.; RUFFINO, R. T. Aproveitamento do resíduo gerado na indústria madeireira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3. Anais.... USP/EESC. São Carlos, SP. 1989. p. 129-140. 1989.

GORNIAK, E.; MATOS, J. L. M. Métodos não destrutivos para determinação e avaliação de propriedades da madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA EM ESTRUTURA DE MADEIRA, 7., 2000, São Carlos. Anais... São Carlos, 2000.

GRECON. Dual Chamber Gas Analysis for Formaldehyde Analysis acc. to EN 717-2. Disponível em: < http://www.grecon.com/en/gas-analyser-ga-6000>. Acesso em: 27 nov. 2013.

GROENESTIJN, J. W.; LIU, J. X. Removal of alpha-pinene from gases using biofiltres containing jungi. Atmospheric Environment, v. 36, n. 35, p. 5501-5508, nov. 2002.

GUAN, Z. W.; RODD, P. D.; POPE, D. J. Study of glulam beams pre-stressed with pultruded GRP. Computers and Structures, Cambridge, v. 83, n. 28-30, p. 2476-2487, nov. 2005.

GUANGCHENG, Z.; YUNLU, L.; YAZAKI,Y. Extractive yields, Stiasny values and polyflavonoid contents in barks from six acacia species in Australia. Australian Forestry, Bruce, v. 54, n. 3, p. 154-156, 1991.

GUENDEZ, R.; et al. Determination of low molecular weight polyphenolic constituents in grape (Vitis vinifera) seed extracts: correlation with antiradical activity. Food Chemistry, Norwich, v. 89, n. 1, p. 1-9, jan. 2005.

GUPTA, N. K.; SCHMOLDT, D. L.; ISAACSON, B. Tangential scanning of hardwood logs developing an industrial computer tomography scanner. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 2., Madison, 1999.

GURGEL, M. M. Avaliação das propriedades de colagem de taninos de Pinus oocarpa e de suas misturas com taninos de acácia negra e uréia-formaldeído. 2008, 35 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2008.

HAGERMAN, A.; BUTLER, L. G. The specificity of proantocyanidin-protein interactions. Journal of Biological Chemistry, Rockville, v. 256, n. 9, p. 4494-4497, may, 1981.

HALLIDAY, D.; RESNICK, J.W. Fundamentos de física: Gravitação ondas e termodinâmica. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 290 p.

HAN, J. Properties of non wood fibers. Disponível em: <http://fpl.fs.fed.us/documents/ pdf1998/han98a.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2013.

HANSEL, F. A.; PALUDZYSZYN FILHO, E.; MAGALHÃES, W. L. E. Análise da relação siringila:guaiacila por cromatografia gasosa acoplado a espectrometria de massa. In: V EVIMAT, 22 de out. 2010, Colombo: PR. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia. embrapa.br/bitstream/doc/873288/1/17410.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2011.

HANSON – Plywood Limited. 2015. Disponível em: <http://www.hanson-plywood.co.uk/products/blockboard>. Acesso em: 06 maio 2015.

HARMON, D. M. CHANGE – Its Challenges and Opportunities. TECHNICAL FORMALDEHYDE CONFERENCE. Hannover, Germany, 2008.

HARVEY, M. I. Analysis of hydrolysable tannins. Animal Feed Science and Technology, Madrid, v. 91, n. 1-2, p. 3-20, may. 2001.

HASLAM, E. Chemistry of vegetable tannins. London-New York: Academic Press, 1966, 179 p.

HASLAN, E. Plant polyphenols. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. 230 p.

HATFIELD, R.; VERMERRIS, W. Lignin Formation in Plants. The Dilemma of Linkage Specificity. Plant Physiology, v. 126, n. 4, p. 1351-1357, aug. 2001.

HAUFFE, P.; MAHLER, G. Evaluation of internal log quality using x-ray and ultrasound. In: SYMPOSIUM NDT OF WOOD, 12.. Sopron: University of Western Hungary. p. 259-263, 2000.

HEITNER, C.; MANLEY, R. S. J.; AHVAZI, B.; WANG, J. The Effect of acetylation on the photodegradation of milled wood lignin. Journal of Pulp and Paper Science, Berlin, v. 27, n. 10, p. 325-329, oct. 2001.

HEITNER, C.; DIMMEL, D. R.; SCHMIDT, J. A. Lignin and lignan (Advanced chemistry). EUA: CRC Press, Taylor & Francis Greoup, 2008. 631 p.

HEMATABADI, H. et al. The reduction of indoor air formaldehyde from wood based composites using urea treatment for building materials. Construction and Building Materials, Edinburgh, v. 28, n. 1, p. 743-746, mar. 2012.

HEMINGWAY, R. W. Chemistry and significance of condensad tannins. New York: Plenum Press, 1989. 553 p.

HERGERT, H. L. Condensed tannins in adhesives: introduction and historical perspectives. In: HEMINGWAY, R.W. et al. (Ed.). Adhesives from renewable resources. Washington, D.C.: American Chemical Society, 1989. p. 155-171. (ACS Symposium).

HERNÁNDEZ, J. A. Lignina organosolv de Eucalyptus dunnii Maiden, alternativa para a síntese de adesivos de poliuretano para madeira. 2007, 95f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2007.

HIGUCHI, T. Lignin structure and morphological distribution in plant cell walls. In: KIRK, T. K; CHANG, H. Lignin biodegradetion: microbiology, chemistry and potential applications. Boca Raton: CRC Press, 1980. v. 1, p. 02.

HILLIS, W. E. Natural polyphenols (tannins) as a basis for adhesives. In: WEYERHAEUSER SCIENCE SYMPOSIUM: PHENOLIC RESINS. Chemistry and Application, 2., p. 171-188, June, 1981.

HILLIS, W. E. Wood extractives. London-New York: Academic Press, 1962. 513 p.

HIZIROGLU, S.; JARUSOMBUTI, S.; FUEANGVIVAT, V.; DARAPAK, T. Properties of bamboo-rice straw-eucalyptus composite panels. Forest Products Journal, Madison, v. 55, n. 12, p. 221-225, dec. 2005.

HOJI, M. Administração financeira: uma abordagem prática. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2006. 525 p.

HOUWINK, R.; SALOMON, G. Adhesion and Adhesives: Adhesives. v. 1. London-New York: Elsevier, Amsterdam, 1965. p. 543-546.

HUANG, C. et al. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. Waste Management, Padova, v. 29, n. 6, p. 1793-1797, jan. 2009.

HUNTER, P.; OYAMA, S. T. Control of volatile organic compound emissions. Conventional and Emerging Technologies, New York: Jonh Wiley & Sons, 2000. 279 p.

IARC. Monographs on the Evaluation of Cancinogenic Risck to Humans, World Health Organization – International Agency For Research On Cancer. 88, 2006.

IBA - Indústria Brasileira de Árvores. Relatório 2016. Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf. Acesso em: 13 de junho de 2017.

INGRAM JR., L. L. et al. Identification of volatile organic compounds emitted during the drying of southern pine in pilot and laboratory experiments. In: PROCEEDINGS n. 7301. Madison: The Forest Products Society, 1994. p. 35-40.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Madeira: Uso sustentável na construção civil. São Paulo – SP. 2003. <http://www.ipt.br/ download.php?filename=6-Madeiras:_uso_sustentavel_na_construcao_civil.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. Monitoramento da Floresta Amazônica brasileira por satélite. Disponível em: <http://www.obt.inpe. br/prodes/index.php>. Acesso em: 04 dez. 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. ISO 12460-3: Wood-based panels – Determination of formaldehyde release – Part 3: Gas analysis method.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. ISO 12460-4: Wood-based panels – Determination of formaldehyde release – Part 4: Desiccator method.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. ISO 12460-1: Wood-based panels – Determination of formaldehyde release – Part 1: Formaldehyde emission by the 1-cubic-metre chamber method.

IONASHIRO, M. G. Fundamentos da termogravimetria, análise térmica diferencial, calorimetria exploratória diferencial. Araraquara: Giz editorial, 2004. 96 p.

IRLE, M. Analysing formaldehyde and how it can be done. Wood-based panels International, May 2011.

ISSA, C. A.; KMEID, Z. Advanced wood engineering: glulam beams. Construction and Building Materials, Edinburgh, v.19, n. 2, p. 99-106, mar. 2005.

IWAKIRI, S. et al. Painéis de madeira aglomerada. In: IWAKIRI, S. (Ed.). Painéis de madeira reconstituída. Curitiba: FUPEF, 2005. Cap. 4. p. 123-166.

IWAKIRI, S. et al. Produção de painéis de madeira aglomerada de alta densificação com diferentes tipos de resinas. Scientia Forestalis, Pircicaba, v. 68, p. 39-43, 2005.

IWAKIRI, S., MENDES, L.; SALDANHA, L. K.; CLÁUDIO, J. Utilização da madeira de eucalipto na produção de chapas de partículas orientadas – OSB. Cerne, Lavras, v. 10, n.1, p. 46-52, jan. 2004.

IWAKIRI, S.; CRUZ, C. R.; OLANDOSKI, D. P.; BRAND, M. A.. Utilização de resíduos de serraria na produção de chapas de madeira aglomerada de Eucalyptus saligna, Eucalyptus citriodora e Eucalyptus pilularis. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 7, n. 1, p. 251-256, jan./dez. 2000.

IWAKIRI, S. Painéis de madeira reconstituída. Curitiba: FUPEF, 2005. 247p.

JANKOWSKY, I. P. Madeira juvenil: formação e aproveitamento industrial. São Paulo: IPEF, 1979. 18 p. (Circular técnica, 81).

JANKOWSKY, I. P. Manufatura de painéis compensados com madeira de Eucalyptus spp: resultados preliminares. Circular técnica IPEF, n.82, p.1-4, 1979.

JANKOWSKY, I. P.; AGUIAR, O. J. R. Manufatura de painéis compensados com Eucalyptus– caracterização de diversas espécies. Revista Floresta, Curitiba, v. 14, n. 1, p. 46-53, 1983.

JAPANESE STANDARD – JAS. A-1460: Building boards Determination of formaldehyde emission: Desiccator method, Japan, 2001.

JAPANESE STANDARD – JAS. JAS 233: Japanese Agricultural Standard for Plywood. MAFF Notification, 2003.

JORDANTEC. Marine Recovery Unit Product Sheet. Disponível em: <http://www.aereon.com/gas-vapor-recovery-systems/marine-recovery-unit>.Acesso em 24 ago. 2015.

JORGE, F. C. et al. Métodos de extracção de taninos e de preparação de adesivos para derivados de madeira: uma revisão. Silva Lusitana, Lisboa, v. 10, n. 1, p. 101-109, 2002.

JUNIOR, J. A. B. Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos. 2006. 208 f. Dissertação (Mestrado em Reabilitação de Patrimônio Edificado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2006.

KAI, X. et al. The effect of biomass components on the co-combustion characteristics of biomass with coal. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIGITAL MANUFACTURING & AUTOMATION, 5-7 Aug. 2011, Zhangjiajie, Hunan, China. Digital Manufacturing and Automation, p. 1274-1278, 2011.

KEINERT, J.; WOLF, F. Alternativas de Adesivos à Base de Taninos para Madeira. Curitiba, PR: FUPEF, 1984. 25 p.

KELLY, M. W. A critical literature review of relationship between processing parameters and physical properties of particlebard. Madison: U.S. for. Prod. Lab. General Technical Report, 1977. 66 p.

KHAN, M. A.; ASHRAF, S. M. Development and characterization of a lignin-phenol-formaldehyde wood adhesive using coffee bean shell. Journal Adhesion Science Technology, London, v. 19, n. 6, p. 493-509, 2005.

KHAN, M. A.; ASHRAF, S. M. Studies on thermal characterization of lignin: substituted phenol formaldehyde resin as wood adhesives. Journal of Thermal Anallysis and Calorimetry, v. 89, p. 993-1000, 2007.
KHAN, M. A.; ASHRAF, S. M.; MALHOTRA, V. P. Development and characteriation of a wood adhesive using

bagasse lignin. International Journal of Adhesion & Adhesives, Oxford, v. 24, n. 6, p. 485-493, dec. 2004a.

KHAN, M. A.; ASHRAF, S. M.; MALHOTRA, V. P. Eucalyptus bark lignin substituted phenol formaldehyde adhesives: a study on optimization of reaction parameters and characterization. Journal of Applied Polymer Science, New York, v. 92, n. 6, p. 3514-3523, jun. 2004b.

KIKUTI, P.; FANTINI JÚNIOR, M. Uso da madeira de eucalipto – A experiência da Klabin. Revista Silvicultura, ano 18, n. 71, p. 30-34, 1997.

KILKUSKIE, R. E.; et al. HIV and reverse transcriptase inhibition by tannins. Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters, v. 2, n. 12, p. 1529-1534, dec. 1992.

KIM, S. et al. Effect of bio-scavengers on the curing behavior and bonding properties of melamine-formaldehyde resins. Macromolecular Materials and Engineering, Weinheim, v. 291, n. 9, p. 1027-1034, sep. 2006a.

KIM, S. The reduction of indoor air pollutant from wood-based composite by adding pozzolan for building materials. Construction and Building Materials, Edinburgh, v. 23, n. 6, p. 2319-2323, jun. 2009.

KIM, S. et al. Physico-mechanical properties of particleboards bonded with pine and wattle tannin-based adhesives. Journal Adhesion Science Technology, London, v. 17, n. 14, p. 1863-1875, 2003.

KIM, S.et al. Determination of formaldehyde and TVOC emission factor from wood-based composites by small chamber method. Polymer Testing, v. 25, p. 605-606, 2006.

KLEINERT, M.; BARTH, T. Phenol from lignin. Chemical Engineering and Technology, v. 31, p. 736-745, 2008.

KLEINERT, M.; BARTH, T. Towards a Lignin cellulosic Biorefinery: Direct One-Step Conversion of Lignin to Hydrogen-Enriched Biofuel. Energy Fuels, v. 22, n. 2, p. 1371-1379, 2008b.

KLEPPE O.; AASHEIM E. Timber Bridges in the Nordic Countries. NCWTS, 2010. Disponível em: <http://www.woodcenter.org/docs/klepp96a.pdf>. Acesso em: 21 set. 2014.

KOGA, M. E. T. Matérias-primas fibrosas. In: Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica. PHILIPP, P.; D'ALMEIDA, M. L. O. (Ed.). 2. ed. São Paulo: IPT, 1988. p. 15-44.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W. STAMM, A. J. Principles of wood Science and Technology: wood based materials. Berlim: Springer-Verlog, 1975. v. 2, p. 312-550.

KONOKOGS. Current Thermal Oxidizer and Catalytic Oxidizer. Disponível em: <http://www.konokogs.com/current-oxidizer-inventory >. Acesso em: 11 dez. 2013.

KUMAR, T. P.; KUMAR, M. A.; CHANDRAJIT, B. Biofiltration of Volatile Organic Compounds (COVs) – An Overview. Research Journal of Chemical Sciences, v. 1, n. 8, p. 83-92, 2011.

LENGOWSKI, E. C. et al. Caracterização de partículas de endocarpo de Cocos nucifera para a produção de compósitos termofixos. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURA DE MADEIRA, 12. Anais.... UFLA/IBRAMEM. Lavras, MG, 25-28 jul. 2010. 1 CD-ROM.

LEWIN, M.; GOLDSTEIN, I. S. Wood structure and composition. New York, Marcel Dekker, 1991. 488 p.

LEWIS, N.G.; SARKANEN, S. Lignin and lignin biosynthesis. Washington: American Chemical Society, 1998. 436 p.

LI, K.; GENG, X. Investigation of formaldehyde-free wood adhesives from kraft lignin and a polyaminoamide -epichlorohydrin resin. Journal Adhesion Science Technology, London, v. 18, n. 4, p. 427-439, 2004.

LI, L. et al. Thermogravimetric and kinetic analysis of Spirulina wastes under nitrogen and air atmospheres. Bioresource Technology, Mohali, v. 140, p. 152-157, 2013.

LI, P.; ABBOTT, A. L.; SCHMOLDT, D. L. Automated analysis of CT images for the inspections of hardwood logs. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, 1996. Washington, DC: IEEE. 3-6 Jun. 1996, p. 1744-1749. v. 3, 1996.

LIAO, X. P.; LU, Z. B.; SHI, B. Selective adsorption of vegetable tannins onto collagen fibers. Industrial and Engineering Chemical Research, v. 42, n. 14, p. 3397-3402, 2003.

LILGE, D. S. Desempenho de duas espécies florestais em combinação com casca de arroz na fabricação de painéis cimento-madeira. 2009. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

LIMA, A. M. et al. Utilização de fibras (epicarpo) de babaçu como matéria-prima alternativa na produção de chapas de madeira aglomerada. Revista Árvore, v. 30, n. 4, p. 645-650, 2006.

LIMA, C. R. Viabilidade econômica da produção de briquetes a partir da serragem de Pinus sp. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 3. SBPE, São Paulo, 1998. CD-ROOM.

LIMA, E. G.; SILVA, D. A. Resíduos gerados em indústria de móveis situadas no pólo moveleiro de Arapongas – PR. Revista Floresta, v. 35, n. 1, p. 105-116. 2005.

LINDYBERG, R. F.; DAGHER, H. J. ReLAM: Nonlinear Probabilistic Model for the Analysis of Reinforced Glulam Beams in Bending. Journal of Structural Engineering, v. 138, n. 6, p. 777-788, 2012.

LIU, X.; CHEN, M.; YU, D. Oxygen enriched co-combustion characteristics of herbaceous biomass and bituminous coal. Thermochimica Acta, Rostock, v. 569, p. 17-24, 2013.

LOPES, Y. L. V. et al. Avaliação do potencial técnico da madeira e cascas de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden na produção de painéis cimento-madeira. Scientia Forestalis, n. 67, p. 111-122, 2005.

LÓPEZ, G.; BASTERRA, L. A.; ACUÑA, L. Estimation of wood density using infrared thermography. Construction and Building Materials, Edinburgh, v. 42, p. 29-32, 2013.

LOURENÇO, V. et al. New binders based on laccase modified lignins. Two case-studies: bonding of wood fibres for MDF and cork granules for cork panels production. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTALLY-COMPATIBLE FOREST PRODUCTS, 3, Edition: Fernando Pessoa University. p. 213-214, 2008.

LYPTUS Ltda. Opção inteligente em madeira. – Disponível em: <http://www.lyptus. com. br>. Acesso em: 18 jan. 2013.

MACEDO, A. R. P.; ROQUE, C. A. L.; LEITE, E. T. Produtos sólidos de madeira. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/ Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/madexpo.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2010.

MACHADO, C. C. et al. Transporte rodoviário florestal. Viçosa: UFV, 2009. 217 p.

MAGDZIARZ, A; WILK, M. Thermogravimetric study of biomass, sewage sludge and coal combustion. Energy Conversion and Management, v. 75, p. 425-430, nov. 2013.

MAGOSSI, D. C. A produção florestal e a industrialização de seus resíduos na região de Jaguariaíva – Paraná. 2007. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2007.

MAKKAR, H. P. S. Effects and fate of tannins in ruminant animals, adaptation to tannins, and strategies to overcome detrimental effects of feeding tannin-rich feeds. Small Ruminant Research, Little Rock, v. 49, n. 13, p. 241-256, sep. 2003.

MAKOWSKI, M.; OHLMEYER, M.; MEIER, D. Long-term development of VOC emissions from OSB after hot-pressing. Holzforschung, Berlin. New York. v. 59, n. 5, p. 519-523, sep. 2005.

MALAN, F. A. Eucalyptus improvement for lumber production. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE E EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1995, São Paulo. Anais... São Paulo: IPEF/IPT, 1995. p. 1-19.

MALAN, F. A. Variation, association and inheritance of juvenile wood properties of Eucalyptus grandis Hill ex Maiden with special reference to the effect of rate of growth. South African Forestry Journal, v. 157, p. 16-23, 1991.

MALHAUTIER, L. et al. Biofiltration of volatile organic compounds. Applied Microbiology and Biotechnology, Münster, v. 68, n. 1, p. 16-22, jul. 2005.

MALONEY, T. M. Modern particleboard and dry: process fiberboard manufacturing. San Francisco: Miller Freeman, 1993. 689 p.

MANNES, D. et al. Application areas of synchrotron radiation tomographic microscopy for wood research. Wood Science Technology, Berlin, v. 44, p. 67-84, feb. 2010.

MANNES, D.; NIEMZ, P.; LEHMANN, E. Tomographic investigations of wood from macroscopic to microscopic scale. Wood Research, Bratislava, v. 54, n. 3, p. 33-44, jan. 2009.

MARGARITONDO, G. Introduction to Synchrotron Radiation. Madison. USA: Oxford University Press, 1995.

MARIN, C. P. Avaliação da resistência de emendas dentadas para madeira laminada colada. 2006. 124 f. Dissertação (Dissertação em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2006.

MARRA, A. A. Technology of wood bonding. New York: Nostrand Reinhold, 1992. 453 p.

MARTINS, D. O. Estudo do controle de emissões de compostos orgânicos voláteis em tanques de armazenamento de produtos químicos. 2004. 181 f. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2004.

MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. In: PENEDO, W. R. (Ed.). Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte, MG, CETEC, 1982. p. 9-26.

MARUZTKY, R. Global formaldehyde regulations and requirements: Current situation and developments. In: EUROPEAN WOOD-BASED PANEL SYMPOSIUM, 6., Hanover, October 10th, 2008.

MATAMALA, G.; SMELTZER, W.; BENAVENTE, R.; MILOS, A. Mineral oil pinetannin solutions as anticorrosive for cold rolled steel. Universidad de Concepcion, 1989. 9 p.

MATOS, J. L. M. Estudo sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de Pinus taeda L. 1997, 117 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1997.

MATSUSHITA, Y. et al. Surface characteristics of phenol-formaldehyde-lignin resin determined by contact angle measurement and inverse gas chromatography. Industrial Crops and Products, Amsterdam, v. 23, n. 2, p. 115-121, mar. 2006.

MATUANA, L. M.; RIEDL, B.; BARRY, A. O. Caracterisation cinetique par analyse enthalpique differentielle

des resines phenol-formaldehyde a base de lignosulfonates. European Polymer Journal, Enschede, v. 29, n. 4, p. 483-490, apr. 1993.

MCCULLOUGH, C. B. Oregon tests on composite (timber-concrete) beams. Journal of the American Concrete Institute, ACI, Michigan, v. 14, n. 5, p. 429-438, 1943.

MEDEIROS, C. A.; RESENDE, M. E. A. Alcatrão vegetal: perspectivas de produção e utilização. Revista Fundação João Pinheiro, Belo Horizonte, v. 13, n. 9-12, p. 42-48, 1983.

MEIERHOFER, U. A. Timber Bridges in Central Europe, yesterday, today, tomorrow. NCWTS, 2010. Disponível em: <http://www.woodcenter.org/docs/ meier96a.pdf>. Acesso em: 29 set. 2014.

MEINLSCHMIDT, P. Thermographic detection of defects in wood and wood-based materials. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 14, Anais… Hannover, Germany, May 2-4, 2005.

MELO, R. R. Propriedades físico-mecânicas e resistência a biodeterioradores de chapas aglomeradas constituídas por diferentes proporções de madeira e casca de arroz. 2009. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

MENDES, L. M.; ALBUQUERQUE, C. E. C; IWAKIRI, S. Compensados sarrafeados: qualidade da madeira, aspectos de produção e aproveitamento de resíduos. Boletim on line n. 38. Disponível em: <http://www.editora.ufla.br/site/_adm/upload/boletim/bol_ 39.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2010b.

MENDES, L. M.; ALBURQUEQUE, C. E. C.; IVWAKIRI, S. Qualidade dos sarrafos para produção de compensados sarrafeados. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE ECOSSITEMAS FLORESTAIS (FOREST'99), 5., 1999, Curitiba. Anais... Curitiba, PR, 1999. 1 CD-ROOM.

MENDES, R. F. et al. Efeito da incorporcação de casca de café nas propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados de Eucalyptus urophylla S.T. Blake. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 34, n. 3, p. 610-617, mai./jun. 2010b.

MENDES, R. F. et al. Painéis aglomerados produzidos com bagaço de cana em associação com madeira de eucalipto. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 285-295, jun. 2010a.

MENEZES, R. A. A.; BESSA, I.; MENEZES, M. A. O plasma térmico: solução final para os resíduos perigosos. In: SEMINÁRIO DE MEIO AMBIENTE, 04-06 out. 1999. Anais... São Paulo: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS – ABM . 1999.

MEREZETTE, C.; GIRARD, P. Environmental aspects of gaseous emissions from carbonization and pyrolysis process. In: BIOMASS PYROLYSIS LIQUIDS UPGRADING AND UTILIZATION. Frence: Centre Techinique Forestier Tropical. Cedex, Chapter 11, 1991. p. 263-287.

METCHE, M. Tanins, nature et proprieties. Groupe Polyphénols, v. 10, p. 11-32, 1980.

MEYERS, J. E. Effects of post-manufacture board treatments on formaldehyde emission: a literature review (1960-1984). Forest Products Journal, Madison, v. 36, n. 6, p. 41-51, 1986.

MIGNEAULT, S. et al. Potential of pulp and paper sludge as a formaldehyde scavenger agent in MDF resins. Holzforschung, Berlin, v. 65, n. 3, p. 403-409, may. 2011.

MINÁ, A. J. S. et al. Avaliação não-destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som. Scientia Florestalis, Piracicaba, n. 65, p. 188-196, jun. 2004.

MIOTTO, J. L. Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada refor-

çadas com fibras de vidro. 2009, 325 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2009.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto. Revista Tecnológica, Edição Especial ENTECA 2009, p.35-45, 2009.

MIRANDA, M. R. S. Bagaço do sorgo: estimativa de parâmetros cinéticos e pirólise analítica. 2011. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG. 2011.

MONTEIRO, J. M. et al. Taninos: uma abordagem da química a ecologia. Revista Química Nova, São Paulo, v. 28 n. 5, p. 892-896, set./out. 2005.

MOON, C. et al. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. Experimental Thermaland Fluid Science, California, v. 47, p. 232-240, may. 2013.

MORALES, E. A. M. Técnicas de Propagação de Ondas na Estimativa de Propriedades Mecânicas de Painéis OSB. 2006. 94 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2006.

MORI, C. L. S. O. et al. Influência da temperatura, tipos e concentrações de sais inorgânicos no rendimento em taninos das cascas de Eucalyptus. In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAL SOBRE FLORESTAS, 4., Forest 2000, 2000. p. 408.

MORI, F. A. Caracterização parcial dos taninos da casca e dos adesivos de três espécies de eucaliptos. 2000. 73 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.

MORI, F. A. et al. Análise cinética da cura de adesivos de taninos das cascas de três espécies de Eucalyptus por calorimetria diferencial exploratória (DSC). Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 26, n. 4, p. 493-497, 2002.

MORI, F. A. Uso de taninos da casca de Eucalyptus grandis para produção de adesivos. 1997. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1997.

MOSIEWICKI, M. A.; et al.Effect of natural rubber on wood-reinforced tannin composites. Journal of Applied Polymer Science, New York, v. 105, n. 4, p. 1825-1832, aug. 2007.

MOSLEMI, A. A. Particleboard: materials. London: Southern University Press, 1974. 244 p.

MOTHÉ, C. G.; AZEVEDO, A. D. Análise Térmica de Materiais. São Paulo: Editora. 2002. 300 p.

MOUBARIK, A. et al. Cornstarch and tannin in phenol-formaldehyde resins for plywood production. Industrial Crops and Products, Amsterdam, v. 30, n. 2, p. 188-193, sep. 2009.

MOUBARIK, A. et al. Cornstarch-mimosa tannin-urea formaldehyde resins as adhesives in the particleboard production. Starch, Weinheim, v. 62, n. 3-4, p. 131-138, apr. 2010.

MULINARI, D. R. Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulose do bagaço de cana-de-açúcar. 2009. 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 2009.

MUNALULA, F.; MEINCKEN, M. An evaluation of South African fuelwood with regards to calorific value and environmental impact. Biomass and Bioenergy, Aberdeen, v. 33, n. 3, p. 415-420, mar. 2009.

NAHUZ, M. A. R.; WATAI, L. T. Uma visão ampla dos materiais à base de madeira no Brasil. Revista Silvicultura, ano 19, n. 75, p. 34-38, 1998.

NAKAMURA, Y.; TSUJI, S.; TONOGAI, Y.; Method for analysis of tannic acid and its metabolites in biological samples: Application to tannic acid metabolism in the rat. Journal of Agricultural and Food Chemistry, Freising, v. 51, n. 1, p. 331-339, jan. 2003.

NASCIMENTO, M. F. Chapas de partículas homogêneas – madeiras do nordeste do Brasil. In: Produtos derivados da madeira. SET/EESC/USP. São Carlos, SP, p. 93-113. 2008.

NAVARRETE, P. et al. Wood panel adhesives from low molecular mass lignin and tannin without synthetic resins. Journal of Adhesion Science and Technology, v. 24, p. 1597-1610, 2010.

NCASI. A survey of formaldehyde and total gaseous non-methane organic compound emissions from particleboard press vents. New York, 1986a. (Technical Bulletin, 493).

NCASI. Formadehyde, phenol and total gases non-methane organic compound emissions from flakeboard and oriented strandboard press vents. New York, 1986b. (Technical Bulletin, 503).

NEVES, T. A. et al. Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, out./dez. 2011.

NICOLOTTI, G. et al. Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. Journal of Arboriculture, Berlin, v. 29, n. 2, p. 66-78, mar. 2003.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. Dendroenergia: fundamentos e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199 p.

NORDIC TIMBER COUNCIL. Nordic Timber Bridges – A presentation of timber bridges from Finland, Sweden, Norway and Estonia, Nordic Timber Bridge Project. Stockholm: Nordic Timber Council, 2002.

NOZELLA, E. Determinação de taninos em plantas com potencial forrageiro para ruminantes. 2001. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2001.

NUNES, C. A. et al. Determination of Eucalyptus spp lignin S/G ratio: A comparison between methods. Bioresource Technology, Mohali, v. 101, n. 11, p. 4056-4061, jun. 2010.

OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T. BARNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels-significance and impact. Biomass & Bioenergy, Aberdeen, v. 30, n. 11, p. 973-982, nov. 2006.

OKIMOTO, F. S.; PFISTER, G. M.; CALIL, C. Classificação visual e mecânica de madeiras estruturais. ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 5., Anais ... Belo Horizonte: UFMG, 1995.

OKINO, E. Y. A. et al. Resistência físico-mecânica de chapas aglomeradas de bagaço de cana-de-açúcar modificado quimicamente. Scientia Forestalis, Piracicaba, n. 52, p. 35-42, dez. 1997.

OLIVEIRA, A. C. et al. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 37, n. 3, p. 557-566, jun. 2013.

OLIVEIRA, A. D.; LIMA, J. T.; ROSADO, S. C. S. Estimativa de massa lenhosa em povoamentos de Eucalyptus spp. Ciência e Prática, v. 15, n. 4, p. 45-348, 1991.

OLIVEIRA, F. G. R. Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaios não destrutivos utilizando equipamento de ultra-som. 2001. 55 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2001.

OLIVEIRA, J. B.; VIVACQUA FILHO, A.; GOMES, P. A. Produção de carvão vegetal – aspectos técnicos. In: PENEDO, W. R. (Ed.). Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 60-73.

OLIVEIRA, J. T. S. Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil. 1997. 2 v. 429 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1997.

OLIVEIRA, J. T. S., HELLMEISTER, J. C. Caracterização da Madeira de Eucalipto para a Construção Civil. Boletim Técnico da Escola Politecnica da Universidade de São Paulo, 52p. São Paulo, 1998.

OLIVEIRA, J. T. S.; FREITAS, A. R. Painéis à Base de madeira. Boletim Técnico: EPUSP: Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1996.41 p.

ONIFADE, K. R. Production of tannin from the bark of Eucalyptus camaldulensis. Assumption University Journal of Technology, v. 5, n. 2, 9 p. 2001. Disponível em: <http://www.journal.au.edu/au_techno/2001/oct2001/article2.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2010.

ONOE, M. et al. Computed tomography for measuring the annual rings of a live tree. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Cambridge, v. 221, n. 1, p. 213-220, mar. 1984.

OZALP, M. The effect of borax pentahydrate addition to urea formaldehyde on the mechanical characteristics and free formaldehyde content of medium density fiberboard (MDF). European Journal of Wood and Wood Products, Heidelberg, v. 68, n. 1, p.117-119, feb. 2010.

PÁDUA, F. A. Amostragem para avaliação da densidade básica da madeira de um híbrido de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden x Eucalyptus urophylla S. T. Blake. 2009, 99 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

PAES, J. B. Viabilidade do tratamento preservativo de moirões de bracatinga (Mimosa scabrella Benth.), por meio de métodos simples, e comparações de sua tratabilidade com a do Eucalyptus viminalis Lab.1991. 140 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1991.

PAES, J. B. et al. Viabilidade técnica dos taninos de quatro espécies florestais de ocorrência no semi-árido brasileiro no curtimento de peles. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 16, n. 4, p. 453-462, 2006.

PAES, J. B. et al. Substâncias tânicas presentes em várias partes da árvore angico-vermelho (Anadenanthera colubrina (Vell.)) Brenan. var. cebil (Gris.) Alts.). Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 441-447, set. 2010.

PAIVA, N. et al. Production of melamine fortified urea-formaldehyde resins with low formaldehyde emission. Journal of Applied Polymer Science, New York, v. 124, n. 3, p. 2311-2317, may. 2012.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. Textbook of wood tecnology. 2. ed. New York: McGraw Hill, 1964. v. 1. 643 p.

PARK, B.-D.; CHANG KANG, E.; YOUNG PARK, J. Effects of formaldehyde to urea mole ratio on thermal curing behavior of urea–formaldehyde resin and properties of particleboard. Journal of Applied Polymer Science, New York, v. 101, n. 3, p. 1787-1792, aug. 2006.

PARKA, Y.; DOHERTY, W. O. S.; HALLEYA, P. Developing lignin-based resin coatings and composites. Industrial Crops and Products, Amsterdam, v. 27, n. 2, p. 163-167, mar. 2008.

PASSOS, P. R. A. Destinação sustentável de cascas de côco (Cocos nucifera) verde: obtenção de telhas e chapas de partículas. 2005. 166 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

PAULA, L. E. R. et al. Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 31, n. 66, p. 103-112, abr./jun. 2011.

PAULESKI, D. T. Características de compósitos manufaturados com polietileno de alta densidade (PEAD) e diferentes proporções de casca de arroz e partículas de madeira. 2005. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2005.

PELLERIN, R. F.; ROSS, R. J. Nondestructive evaluation of wood. Madison: Forest Products Laboratory, 2002. 210 p.

PEÑA, C. et al. Synthesis and characterization of phenolic novolacs modified by chestnut and mimosa tannin extracts. Journal of Applied Polymer Science, New York, v. 100, n. 6, p. 4412-4419, jun. 2006.

PEREIRA, A. F.; CARVALHO, L. S. C. Resíduo de madeira: matéria-prima alternativa usada sob critérios de ecodesign e design estratégico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM DESIGN, 9., 2010. Anais... Disponível em: <blogs.anhembi.br/congressodesign/anais/artigos/69660.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2010.

PEREIRA, B. L. C. et al. Correlações entre a relação cerne/alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 41, n. 98, p. 217-225, jun. 2013c.

PEREIRA, B. L. C. et al. Estudo da degradação térmica da madeira de Eucalyptus através de termogravimetria e calorimetria. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 37, n. 3, p. 567-576, jun. 2013a.

PEREIRA, B. L. C. et al. Influence of chemical composition of Eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties. BioResources, New York, v. 8, p. 4574-4592, 2013b.

PEREIRA, P. W. W.; MONTEIRO, M. B. O.; ABREU, H. S. Bioinformação do processo de lignificação. Seropédica: EDUR/UFRRJ, 124 p.

PÉREZ, J. M. Cure kinetics of lignin–novolac resins studied by isoconversional methods. Thermochimica Acta, Rostock, v. 487, n. 1-2, p. 39-42, apr. 2009.

PETTERSEN, R. C. The chemical composition of wood. In: ROWELL, R. (Ed.). The chemistry of solid wood. Washington: American Chemical Society, 1984. p. 54-126.

PIERRE, F. C.; BALLARIN, A. W.; LARA PALMA, H.Caracterização física de painéis aglomerados de Eucalyptus grandis com adição de resíduos industriais madeireiros.Cerne, Lavras, v. 20, n. 2, p. 321-328, jun. 2014.

PIGOZZO, J. C. Estudos e aplicações de barras de aço coladas como conectores em lajes mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes. 2004. 358 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2004.

PINCUS, G. Bonded wood-concrete T-beams. Journal of Structural Division, ASCE, v. 95, n. 10, p. 2265-2279, 1969.

PINTO, G. A. S. Produção de tanase por Aspergillus niger. 2003. 213 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

PIO, N. S. Produção de painéis estruturais de laminas paralelas (PLP) de Eucalyptus grandis Hill ex-Maiden. 2002. 168 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2002.

PIZZI, A. Advanced wood adhesives technology. New York: Marcel Dekker, 1994. 289 p.

PIZZI, A. Natural Phenolic Adhesives I: Tannin. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Eds.) Handbook of Adhesive

Technology. New York: Marcel Dekker, 2003. p. 347-358.

PIZZI, A. Natural phenolic adhesives II: Lignin. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Eds.) Handbook of Adhesive Technology. New York: Marcel Dekker, 1994, p. 359-368.

PIZZI, A. Tannin-based adhesives. Journal of Macromolecular Science, Part C:: Polymer Reviews, v. 18, n. 2, p. 247-315, 1980.

PIZZI, A. Wood adhesives: chemistry and technology. New York: Marcel Dekker, 1983.364p.

PIZZI, A.; VALENZUELA, J.; WESTERMEYER, C. Low formaldehyde emission, fast pressing, pine and pecan tannin adhesives for exterior particleboard. European Journal of Wood and Wood Products, Heidelberg, v. 52, n. 5, p. 311-315, oct. 1994.

PLASTER, O. B. et al. Comportamento de juntas coladas da madeira serrada de Eucalyptus sp. Cerne, Lavras, v. 14, n. 3, p. 251-258, jul./set. 2008.

POLARIS. Featured Products: Cryogenic Condensation. Disponível em: <http://www.polarisengineering.com/polaris/>. Acesso em: 12 dez. 2013.

POLETO, S. F. S. et al. Produção de painéis de partículas homogêneas (pph) utilizando resíduos de espécies de reflorestamento. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURA DE MADEIRA, 11., Anais.... UEL/IBRAMEM. Londrina, PR, 14-16 jul. 2008. 1 CD-ROM.

PORTASBUGS. Plena Portas. 2015. Disponível em: <http://www.portasbugs.com.br/site/index.php/produtos/linha-belissima>. Acesso em: 06 maio 2015.

PRASETYA, B.; ROFFAEL, E. Neutartige Charakterisierung von natürlichen Polyphenolen hinsichtlich iher Vernetzbarkeit. Holz als Roh- und Werkstoff, Berlin, v. 49, n. 2, p. 481-484, dec. 1991.

PROTÁSIO, T. P. Biomassa residual do coco babaçu: potencial de uso bioenergético nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. 2014. 172 p. (Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 2014.

PROTÁSIO, T. P. et al. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de Qualea parviflora. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 31, n. 68, p. 295-307, out./dez. 2011.

PROTÁSIO, T. P. et al. Babassu nut residues: potential for bioenergy use in the North and Northeast of Brazil. Springer Plus, London, v. 3, n. 124, p. 1-14, mar. 2014a.

PROTÁSIO, T. P. et al. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. BioResources, New York, v. 8, n. 1, p. 1166-1185, 2013a.

PROTÁSIO, T. P. et al. Clones comerciais de Eucalyptus de diferentes idades para o uso bioenergético da madeira. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 113-127, mar. 2014b.

PROTÁSIO, T. P. et al. Correlações entre as propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados de diferentes espécies de Eucalyptus. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 19, n. 2, p. 123-132, abr./jun. 2012.

PROTÁSIO, T. P. et al. Mass and energy balance of the carbonization of babassu nutshell as affected by temperature. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 49, n. 3, p. 189-196, mar. 2014c.

PROTÁSIO, T. P. et al. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de Eucalyptus spp. aos 42 meses de idade. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 33, n. 74, p. 137-149, 2013b.

PROTÁSIO, T. P. et al. Quality and energetic evaluation of the charcoal made of babassu nut residues used in the steel industry. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 38, n. 5, p. 435-444, set./out. 2014d.

PROTÁSIO, T. P. et al. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 31, n. 66, p. 122 -133, 2011.

PURBOND. Ficha Técnica dos Adesivos. Disponível em: <http://www.purbond.com>. Acesso em: 15 jan. 2013.

QIAN, W. et al. Combustion characteristics of semicokes derived from pyrolysis of low rank bituminous coal. International Journal of Mining Science and Technology, Jiangsu, v. 22, n. 5, p. 645-650, sep. 2012.

QUE, Z.; FURUNO, T. Formaldehyde emission from wood products: relationship between the values by the chamber method and those by the desiccator test. Wood Science and Technology, Berlin, v. 41, n. 3, p. 267-279, mar. 2007.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal. Brasília, DF: LPF/IBAMA, 1991. 19 p. (Série Técnica, 13).

QUOIRIN, N. S. R. Diagnóstico de Amostras de Madeira por Tomografia de Raios X. 2004. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2004.

RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do Eucalyptus spp. Cerne, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, abr./jun. 2006.

RALPH, J.; HATFIELD, R. D. A new frontier for plant modification. Plant Chemistry, Washington, p. 28-30, 1997.

RALPH. J. et al. Abnormal lignin in a loblolly pine mutant. Science, Washington, v. 277, n. 5323, p. 235-239, 1997.

RAMIRES, E. C. Biocompósitos a partir de matrizes poliméricas baseadas em lignina, tanino e glioxal reforçadas com fibras naturais. 2010. 262 f. Tese (Doutorado em Ciências Físico-Químicas) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2010.

RAUBER, R. Caracterização de painéis aglomerados com madeira de eucalipto e sólidos granulares de poliuretano. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.

RAUTENSTRAUCH, K.; MUELLER, J.; SIMON, A. The First Timber-Concrete Composite Road Bridge in Germany. Proceedings: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 11., (WCTE 2010), Trentino, 2010.

REINOLD, R. M. Produtos utilizados para melhorar a estabilidade físico-química da cerveja. Engarrafador Mod., v. 52, p. 56-58, jul./ago. 1997.

REIS, A. A. et al. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de Eucalyptus urophylla S. T. Blake. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 19, n. 4, p. 497-505, out./dez. 2012.

REIS, G. Café mineiro gera energia na Holanda. Estado de Minas, Belo Horizonte, 21 jan. 2008. Economia. Disponível em: <http://www.revistacafeicultura.com.br/index. php?tipo= ler&mat=14223>. Acesso em: 09 fev. 2010.

REVISTA DA MADEIRA - REMADE. 71. ed. maio 2003. Aplicação da madeira laminada colada - MLC em elementos construtivos. Disponível em: <http://www. remade.com.br/br/ index.php>. Acesso em: 15 jan. 2013a.

REVISTA DA MADEIRA – REMADE. 71. ed. maio 2003. OSB - opção no mercado. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num= 333&subject=OSB&title=OSB20-20opE7E3o-20no20mercado>. Acesso em: 26 nov. 2013b.

REWOOD Ltda. Madeira Laminada Colada.Disponível em <http://www.brarewoods. com. br>. Acesso em: 18 jan. 2013.

REYES, J.; PERALTA-ZAMORA, P.; DURÁN, N. Hidrólise enzimática de casca de arroz utilizando-se celulases: Efeito de tratamentos químicos e fotoquímicos. Química Nova, São Paulo, v. 21, n. 2, p. 140-143, apr. 1998.

REZENDE, J. L. P.; OLIVEIRA, A. D. Análise econômica e social de projetos florestais. 2.ed. Viçosa: UFV, 2008. 386 p.

REZENDE, R. N. et al. Secagem ao ar livre de toras de Eucalyptusgrandis em Lavras, MG.Cerne, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 41-47, 2010.

RINNHOFER, A.; PETUTSCHNIGG, A.; ANDREU, J. P. Internal log scanning for optimizing breakdown. Computers and Electronics in Agriculture, v. 41, n. 1-3, p. 7-21, dec. 2003.

RINNTECH. User Manual: Arbotom 3-D tree impulse tomography, version 1.59 for Microsoft Windows 98, 2000, XP. Heidelberg: Microsoft Windows, 2005. 42 p.

RISHOLM-SUNDMAN, M. et al. Formaldehyde emission – Comparison of Different standard methods. Atmospheric Environment, v. 41, n. 15, p. 3193-3202, may. 2006.

ROCCO LAHR, F. A. Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira. 1983. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 1983.

ROCCO LAHR, F. A.; CALIL Jr, C.; BRAZOLIN, S. Madeiras na Construção Civil: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: ISAIA, G. C., 2007, v. 2, p. 1149-1179.

ROCHA, M. P. Desdobro. Revista da Madeira, n. 68, dez. 2002. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=265&subject=Desdobro&title=Desdobro>. Acesso em: 15 fev. 2010.

RODRIGUES, J. N.; DIAS, A. M. P. G., PROVIDÊNCIA, P. Timber-concrete composite bridges: State-of-the-art Review. BioResources, New York, v. 8, n. 4, p. 6630-6649, 2013.

RODRIGUES, J. N.; PROVIDÊNCIA, P.; DIAS, A. M. P. G. Use of composite timber-concrete bridges solutions in Portugal. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TIMBER BRIDGES. Lillehammer: Norway, 2010. p. 67-78.

ROFFAEL, E.; JOHNSSON, B. The perforator value in balance. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL PANEL PRODUCTS SYMPOSIUM, Landudno, Wales, U. K., 2011.

ROQUE, C. A. L.; VALENÇA, A. C. Painéis de madeira aglomerada. 1998. 22 p. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/ Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set805.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2010.

ROSA, R. A. et al. Caracterização da madeira de maçaranduba (Manilkara sp.) por métodos destrutivos e não destrutivos. Ciência da Madeira, Pelotas, v. 5, n. 1, p. 68-78, mai. 2014a.

ROSA, R. A. et al. Efeitos do tratamento preservativo e adesivo nas características mecânicas do laminado colado de duas espécies de bambu. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 42, n. 103, p. 451-462, set. 2014b.

ROSA, T. S.; HILLIG, E. Utilização de lignosulfonato de amônio na produção de painéis aglomerados. Ciência da Madeira, Pelotas, v. 5, n. 2, p. 93-102, 2014.

ROSS, R. J.; HUNT, M. O. Stress wave timing nondestructive evaluation tools for inspecting historic structures: A guide for use and interpretation. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-119. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2000. 15 p.

ROSS. R. J.; BRASHAW. B. K.; WANG, X. Structural condition assessment of in-service wood. Forest Products Journal, Madison, v. 56, n. 6, p. 4-8, jun. 2006.

ROWELL, R. M. et al. Cell wall chemistry. In: Rowell, R. M. (Ed.). Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton: CRC Press, Chapter 3, 2005, 40p.

ROWELL, R. M.; HAN, S. J.; ROWELL, J. S. Characterization and factors effeting fiber properties. In: FROLLINI, E.; LEÃO, A. L.; MATTOSO, L. H. C. (Eds.). Natural polymers and agrofibers based composites. São Paulo: USP/UNESP/EMBRAPA, 2000. p. 25-48.

SAITO, K. et al. Direct mapping of morphological distribution of syringyl and guaiacyl lignin in the xylem of maple by time-of-flight secondary ion mass spectrometry. The Plant Journal, Medford, v. 69, n. 3, p. 542-552, feb. 2012.

SALTHAMMER, T.; MENTESE, S.; MARUTZKY, R. Formaldehyde in the Indoor Environment, Chemical Reviews, Illinois, v. 110, n. 4, p. 2536-2572, apr. 2010.

SANDOZ, J. L. Grading of Construction Timber by Ultrasound. Wood Science and Technology, Berlin, v. 23, n. 2, p. 95-108, feb. 1989.

SANDOZ, J. L. Ultrasonic solid wood evaluation in industrial applications. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 10. Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology Chair of Timber Construction, p. 147, 1996.

SANTANA, M. A. E.; BAUMANN, M. G. D. Phenol-formaldehyde plywood adhesive resins prepared with liquefied bark of black wattle (Acacia mearnsii). Journal of Wood Chemistry and Technology, v. 16, n. 1, p. 1-19, 1996.

SANTANA, W. M. S. Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla com enfoque energético. 2009. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

SANTOS, F. et al. Produção de etanol celulósico a partir da cana-de-açúcar. In: BIOENERGIA E BIORREFINARIA: CANA-DE-AÇÚCAR E ESPÉCIES FLORESTAIS. Viçosa, MG: UFV, 2013. 551 p.

SANTOS, R. C. et al. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. Cerne, Lavras, v. 18, n. 1, p. 143-151, jan./mar. 2012.

SANTOS, R. C. et al. Chapas de partículas aglomeradas produzidas a partir de resíduos gerados após a extração do óleo da madeira de candeia (Eremanthus erythropappus). Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 37, n. 84, p. 437-446, dez. 2009.

SANTOS, W. L. F. et al. Viabilidade de obter painel de compósito particulado com resíduos da madeira tauari (Couratari oblongifolia) da região sudoeste do estado do Maranhão utilizando resina à base do óleo de mamona. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURA DE MADEIRA, 11., 2008, Londrina. Anais.... Londrina: UEL/IBRAMEM. Londrina, PR, 14-16 jul. 2008. 1 CD-ROM.

SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. Definition and Nomenclature. In: SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H.

(Ed.). Lignins: occurrence, formation, structure and reaction, New York: John Wiley & Sons, 1971. 916 p.

SARKAR, S.; ADHIKARI, B. Jute felt composite from lignin modified phenolic resin. Polymer Composites, Medford, v. 22, n. 4, p. 518-527, aug. 2001.

SARKAR, S.; ADHIKARI, B. Lignin-modied phenolic resin: synthesis optimization, adhesive strength, and thermal stability. Journal Adhesion Science Technology, London, v. 14, n. 9, p. 1179-1193, 2000.

SARTORI, C. J. Avaliação dos teores de compostos fenólicos nas cascas de Anadenanthera peregrina (angico-vermelho). 2012. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2012.

SCALBERT, A. et al. A tannin/copper preservation treatment for wood. Holzforschung, Berlin, v. 52, n. 2, p. 133-138, jan. 1998.

SCANAVACA JUNIOR, L.; GARCIA, J. N. Rendimento em madeira serrada de Eucalyptus urophylla. Scientia Forestalis, Piracicaba, n. 63, p. 32-43, jun. 2003.

SCHAFER, M.; ROFFAEL, E. On the formaldehyde release of wood. Holz Als Roh- und Werkstoff, Berlin, v. 58, n. 4, p. 259-264, nov. 2000.

SCHOFIELD, P.; MBUGUA, D. M.; PELL, A. N. Analysis of condensed tannins: a review. Animal Feed Science and Tecnology, Madrid, v. 91, n. 1-2, p. 21-40, may. 2001.

SEARS, F. W.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D. Física: Mecânica dos fluidos, calor, movimento ondulatório. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1984.

SEDEROFF, R. R. et al. Unexpected variation in lignin. Plant Biology, Bethesda, v. 2, n. 2, p. 145-152, apr. 1999.

SEGUNDINHO, P. G. A. et al. Aplicação do método de ensaios das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.36, n.6, p.1155-1161, nov./dez. 2012.

SEIXAS, F. Novas tecnologias no transporte rodoviário de madeira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 5. 2001, Porto Seguro, Anais...Viçosa: UFV, SIF, 2001. p. 1-27.

SEIXAS, F. Uma metodologia de seleção e dimensionamento da frota de veículos rodoviários para o transporte principal de madeira. 1992. 121 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1992.

SELLERS JUNIOR, T. et al. Lignin-modified phenol-formaldehyde resin development for fiberboard. Forest Products Journal, Madison, v. 45, n. 9, p. 45-51, sep. 2004.

SENA-CRUZ, J. et al. Bond between glulam and NSM CFRP laminates. Construction and Building Materials, Edinburgh, v. 40, p. 260-269, mar. 2013.

SENE, M. L. Research of alternative solutions able to limit the formaldehyde release in panels (manufacturing & use). Pessac, France:Rescoll Centre Technologique, 2009.

SHAFIZADEH, F. Fuels from wood waste. In: ANDERSON, L. L.; TILLMAN, D. A. (Org.). Fuel from waste. New York: Academic Press, p. 141-159, 1977.

SHAFIZADEH, F.; CHIN, P. P. S. Thermal deterioration of wood. In: GOLSTEIN, I. S. (Ed.). Wood technology chemical aspects. Washington: American Chemical Society, 1977. p. 57-81.

SHI, S.; WALKER, J. C. F. Primary wood processing principles and practive. In: Wood-based composites: Plywood and veneer-based products. 2. ed. Netherlands: Springer, 2006.

SHIMADA, A. N. Avaliação dos taninos da casca de Eucalyptus grandis como preservativo de madeira. 1998. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.

SHIMOYAMA. V. R. S. Estimativas de propriedades da madeira de Pinus taeda através do método não destrutivo emissão de ondas de tensão, visando a geração de produtos de alto valor agregado. 2005. 163 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2005.

SIENFELD, J. H.; PANDIS, S. N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. New York: John Wiley & Sons, 1998. p. 234-336.

SILANIKOVE, N.; PEREVOLOTSKY, A.; PROVENZA, F. D. Use of tannin-binding chemicals to assay for tannins and their negative postingestive effects in ruminants. Animal Feed Science and Technology, Madrid, v. 91, n. 1-2, p. 69-81, may. 2001.

SILVA, F. C. et al. Propriedades técnicas de colagem de taninos da casca de Pinus oocarpa e de suas modificações com adesivos fenólicos. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRRJ, 18. 2008, Seropédica, RJ. Anais.... Seropédica, RJ: EDUR, v.18, 2008.

SILVA, M. L.; FONTES, A. A. Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: Valor Presente Líquido (VPL), Valor Anual Equivalente (VAE) e Valor Esperado da Terra (VET). Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 29, n. 6. p. 931-936, dez. 2005.

SILVA, R. V. Uso de taninos da casca de três espécies de eucalipto na produção de adesivos para madeira. 2001. 57 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

SILVA, S. A. M. Chapa de média densidade (MDF) fabricada com poliuretana monocomponente de óleo de mamona – caracterização por método destrutivo e por ultra-som. 2003. 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2003.

SILVA, T. S. S. Estudo de tratabilidade físico-química com uso de taninos vegetais em água de abastecimento e esgoto. 1999. 88 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Fundação Oswaldo Cruz, São Paulo, SP, 1999.

SILVEIRA, E. T. Redução das emissões de Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) em um processo de laminação de cobre. 2006. 113 f. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2006.

SJÖSTRÖM, E. Wood chemistry: fundamentals and applications. 2. ed., New York: Academic Press, 1993. 293 p.

SLABBERT, N. Leather manufacture with wattle tannins. In: HEMINGWAY, R. W.; LAKS, P. E. (Ed.). Plant Polyphenols, Basic Life Sciences, New York: Plenum Press, 1992. v. 59. p. 1021-1031.

SMITHERS, B. et al. VOC emissions from loading gasoline onto sea-going tankers in EU-15: control technology and cost-effectiveness. Report n. 6/02. Brussels: CONCAWE, 2002. Disponível em: <http://www.concawe.eu/DocShareNoFrame/Common/ GetFile.asp?PortalSource=1856&DocID=343&mfd=off&pdoc=1>. Acesso em: 12 dez. 2013.

SOARES, L. L. et al. Produção e caracterização física de painéis homogêneos aglomerados de resíduo de casca de arroz. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURA DE MADEIRA, 11., Anais.... UEL/IBRAMEM. Londrina, PR, 14-16 jul. 2008. 1 CD-ROM.

SOARES, V. C. Comportamento térmico, químico e físico da madeira e do carvão de Eucalyptus urophylla x

Eucalyptus grandis em diferentes idades. 2011. 108 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2011.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 38, n. 3, p. 543-549, jun. 2014.

SOBUE, N. Nondestructive characterization of wood. Mokuzai Gakkaishi, v. 39, p. 973-979, 1993.

SORATTO, D. N. et al. Efeitos da adição de cavaco com casca na qualidade de painéis MDP produzidos com Eucalyptus sp. Ciência da Madeira, Pelotas, v. 4, n. 1, p. 46-59, mai. 2013.

SORIANO, J. Estruturas mistas em concreto e em madeira: análise de vigas e painéis e aplicações na construção civil. 2001. 264 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2001.

SORIANO, J.; MASCIA, N. T. Estruturas mistas em madeira-concreto: uma técnica racional para pontes de estradas vicinais. Ciência Rural, Santa Maria, v. 39, n. 4, p. 1260-1269, jul. 2009.

SOUZA, A. M. Estudo de emissões de vapores orgânicos no carregamento de gasolina em caminhões-tanque. 2004. 169 f. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2004.

SOUZA, F. X. Casca de arroz carbonizada: um substrato para a propagação de plantas. CNPAI/EMBRAPA. Revista Lavoura Arrozeira, Porto Alegre, v. 46, n. 406, p.11, 1993.

SOWUNMI, S. et al. Differential scanning calorimetry of hydrolysed mangrove tannin. Polymer International, South Korea, v. 49, n. 6, p. 574-578, jun. 2000.

STANGERLIN, D. M. et al. Uso do ultrassom para estimativa das propriedades mecânicas da madeira de Peltophorum dubium. Ciência da Madeira, Pelotas, v. 01, n. 02, p. 44-53, nov. 2010.

STEPHANOU, A.; PIZZI, A. Rapid curing lignin-based exterior wood adhesives. Part I: diisocyanates reaction mechanisms and application to panel products. Holzforschung, Berlin, v. 47, n. 5, p. 439-445, jan. 1993.

STERNADT, G. H. Pequenos objetos de madeira (POM): compostagem de serragem de madeira. Brasília, DF: IBAMA – Laboratório de Produtos Florestais, 2002.

STEWART, D. Lignin as a base material for materials applications: chemistry, application and economics. Industrial Crops and Products, Amsterdam, v. 27, n. 2, p. 202-207, marc. 2008.

STOJIC, D.; CVETKOVIC, R. Analysis of a composite timber-concrete structures according to the limite states: Design and innovate methods in coupling of a timber and concrete. Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering, v. 2, n. 3, p. 169-184, jan. 2001.

SUCHSLAND, O.; WOODSON, G. E. Fiberboard Manufacturing Practices in the United States. Madison, WI: Forest Products Society, 1986. 270 p.

SURDI P. G. et al. Relação entre perfil de densidade e ligação interna de painéis OSB de Pinus spp. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 21, n. 3, p. 349-357, jul./set. 2014.

SZÜCS, C. A. et al. Estruturas de Madeira. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

TANAC. PHENOTAN AG: Adesivo para aglomerados. Disponível em: <http://www.tanac.com.br/PT/detCategoria.php?codcategoria_de_produtos=1>. Acesso em: 18 jul. 2010.

TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, M. A. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não destrutivo de vibração transversal. Engenharia Agrícola, Jabopticabal, v. 25, n. 2, p. 291-299, mai./ago. 2005.

TEIXEIRA, D. E.; COSTA, A. F.; SANTANA, M. A. E. Aglomerados de bagaço de cana-de-açúcar: resistência natural ao ataque de fungos apodrecedores. Scientia Forestalis, Piracicaba, n. 52, p. 29-34, dez. 1997.

TEIXEIRA, D. E.; GARLET, A.; SANCHES, K. L. Resistance of particleboard panels made of agricultural residues and bonded with synthetic resins or PVC plastic to wood-rotting fungi. Cerne, Lavras, v. 15, n. 4, p. 413-420, out./dez.2009.

TEIXEIRA, M. G. Aplicação de conceitos da ecologia industrial para a produção de materiais ecológicos: o exemplo do resíduo de madeira. 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2005.

TELMO, C.; LOUSADA, J. Heating values of wood pellets from different species. Biomass and Bioenergy, Aberdeen, v. 35, n. 7, p. 2634-2639, jul. 2011.

TEODORO, A. S. Utilização de adesivos à base de taninos na produção de painéis de madeira aglomerada e OSB. 2008. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do de Janeiro, Seropédica, RJ, 2008.

TEODORO, Â. S.; LELIS, R. C. C. Colagem de madeira sólida com adesivo natural à base de tanino. Revista Universidade Rural: Série Ciências da Vida, Seropédica, v. 25, n. 1, p. 55-59, jan./jul. 2005.

TEREZO, R. F.; SZÜCS, C. A. Análise de desempenho de vigas em madeira laminada colada de paricá (Schizolobium amazonicum Huber ex. Ducke). Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 471-480, set. 2010.

THEVENON, M. F.; PIZZI, A.; HALUK, J. P. One-step tannin fixation of non -toxic protein borates wood preservatives. Holz als Roh- und Werkstoff, Berlin, v. 56, n. 1, 90, jan. 1998.

TIMBER BUILDING IN AUSTRALIA– TBA, Maria River Bridge. 2009.Disponível em: <http://oak.arch.utas.edu.au/projects/aus/307/maria.html>.Acesso em: 2009.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do Eucalyptus saligna e Eucalyptus grandis. IPEF, Piracicaba, n. 29, p. 37-45, 1985.

TOMITA, B. Overview and topics on reduction of formaldehyde from wood-based materials in Japan. In: IRLE, M. (Ed.). PROCEEDINGS OF THE FINAL CONFERENCE OF COST ACTION E49, Nantes, 14-15 Sep 2009. p. 13-26.

TORRES, P. M. A. et al. Tratamento preservativo da madeira juvenil de Eucalyptus camaldulensis Dehuh. pelo método de substituição de seiva. Cerne, Lavras, v. 17, n. 2, p. 275-282, abr./jun. 2011.

TOSTES, A. S. et al. Colagem de chapas de madeira aglomerada com adesivo ureia-formaldeído (UF) modificado com tanino da casca de Eucalyptus pellita F. Muell. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 11, n. 2, p. 14-19, ago./dez. 2004.

TOSTES, A. S. et al. Efeito da adição do tanino da casca de Eucalyptus pellita F. Muell ao adesivo fenol-formaldeído (FF) na produção de chapas de partículas. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 12, n. 2, p. 50-56, 2006.

TRUGILHO, P. F. Aplicação de algumas técnicas multivariadas na avaliação da qualidade da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus. 1995. 160 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

TRUGILHO, P. F. et al. Avaliação do conteúdo em taninos condensados de algumas espécies típicas do cerrado mineiro. Cerne, Lavras, v. 3, n. 1, p. 01-13, jan. 1997.

TRUGILHO, P. F. et al. Determinação do teor de taninos na casca de Eucalyptus spp. Cerne, Lavras, v. 9, n. 2. p. 246-254, jul./dez. 2003.

TSOUMIS. G. Science and technology of wood: structure, properties, utilization. New York: Nostrand Reinhold, 1991. 494 p.

URASHIMA, K.; CHANG, J. S. Removal of volatile organic compounds from air streams and industrial flue gases by non-thermal plasma technology. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 7, n. 5, p. 602-614, 2000.

URDEA, S. N. et al. Aminoplast structural adhesive with technical lignin for glued laminated timber. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTALLY-COMPATIBLE FOREST PRODUCTS, 3, Edition: Fernando Pesoa University, Porto, Portugal, 10-12 september 2008. p. 205-208.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. In:.: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Ed.). Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro, 3. Jerônimo Monteiro, ES: Suprema, 2008. p. 125-158.

VAN DER KLASHORST, G. H.; CAMERON, F. A.; PIZZI, A. Lignin-based cold setting wood adhesives structural finger joints and glulam. Holz als Roh- und Werkstoff, Berlin, v. 43, p. 477-481, 1985.

VANHOLME, R. et al. Lignin Biosynthesis and Structure. Plant Physiology, v. 153, n. 3, p. 895-905, jul. 2010.

VATAVUK, W. M.; VAN DER VAART, D. R.; SPIVEY, J. J. Incinerators: VOC destruction controls. U. S. Environmental Protection Agency: EPA/452/B-02-001. 2000. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/cs3-2ch2.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2013.

VAZ JR., S. O potencial e a importância das biorrefinarias para o Brasil. In: Biorrefinarias: cenários e perspectivas. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2011. 176 p.

VIANA, J. História das florestas plantadas, análise, demandas e potencial do setor florestal. Brasília, 2005. Disponível em: <http://www.ciflorestas.com.br/download.php? tabela=documentos&id=93&leitura=s.>. Acesso em: 06 abr. 2015.

VICK, C. B. Adhesive bonding of wood materials. In: Wood handbook: wood as an engineering material. Madison: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Chapter 9, 1999, 24p. (General Technical Report FPL-GTR-113).

VIEIRA, M. C. Colagem de painéis OSB com adesivos à base de taninos da casca de Pinus oocarpa Schiede ex Schltdl. 2010. 70 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2010.

VIEIRA, M. C.; BRITO, E. O.; GONÇALVES, F. G. Evolução Econômica do Painel Compensado no Brasil e no Mundo. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 19, n. 3, p. 277-285, jul./set. 2012.

VIEIRA, R. Pequenos Objetos de Madeira de Eucalyptus: Possibilidade de aproveitamento de resíduo. 2006. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2006.

VITAL, B. R. et al. Adesivos à base de taninos das cascas de duas espécies de eucalipto para produção de chapas de flocos. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 28, n. 4, p. 571-582, Ago. 2004.

VITAL, B. R.; JESUS, R. M.; VALENTE, O. F. Efeito da constituição química e da densidade da madeira de clones de Eucalyptus grandis na produção de carvão vegetal. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 10, n. 2, p. 151-160, 1986.

WANG X.; SALENIKOVICH A.; MOHAMMAD M. Localized density effects on fastener holding capacities in wood based panels. Forest Products Journal, Madison, v. 57, n. 1- 2, p. 103-109, jan./feb. 2007.

WANG, C. et al. A study on coal properties and combustion characteristics of blended coals in northwestern China. Energy & Fuels, v. 25, n. 8, p. 3634-3645, jul. 2011.

WANG, C. et al. Pyrolysis and combustion characteristics of coals in oxyfuel combustion. Applied Energy, Västerås, v. 97, p. 264-273, sep. 2012.

WANG, V. Z., GINGER, J. D., NARAYAN, K. Intralaminar and interlaminar fracture characterization in glued-laminated timber members using image analysis. Engineering Fracture Mechanics, New York, v.82, p.73-85, mar. 2012.

WANG, W.; GARDNER, D. Investigation of volatile organic compound press emissions during particleboard production, part 1: UF-bonded southern pine. Forest Product Journal, Madison, v. 49, n. 3, p. 65-72, 1999.

WANG, W.; GARDNER, D.; BAUMANN, M. Factors affecting volatile organic compound emissions during hot-pressing of southern pine particleboard. Forest Product Journal, Madison, v. 53, n. 3, p. 6572, mar. 2003.

WANG, X. et al. Diameter effect on stress-wave evaluation of modulus of elasticity of logs. Wood and Fiber Science, Monona, v. 36, n. 3, p. 368-377, mar. 2004

WANG, X.; ROSS, R. J.; CARTER, P. Acoustic evaluation of wood quality in standing trees. Part I: acoustic wave behavior. Wood and Fiber Science, Monona, v. 39, n. 1, p. 28-38, jan. 2007.

WEGNER, T. H. et al. Wood. 1989. In: Encyclopedia of Polymer Science and Engineering. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, v. 1, p. 843–887, 1989.

WEISS. Emission Testing. Disponível em: < http://www.weiss.info/en/products/ emission_ testing/ schunk01.c.59272.en>. Acesso em 27 nov. 2013.

WEISSMANN, G. Analysis of acid and neutral sugars in bark extracts from Pinus radiate and Larix deciduas by capillary gas liquid chromatrography. Holzforchung, Berlin, v. 39, n. 4, p. 245-247, 1985.

WERTHER, J. et al. Combustion of agricultural residues. Progress in Energy and Combustion Science, California, v. 26, n. 1, p. 1-27, feb. 2000.

WHETTEN, R.; SEDEROFF, R. Lignin Biosynthesis. The Plant Cell, v. 7, n. 7, p. 1001-1013, jul. 1995.

WISSING, A. The utilization of Bark II. Investigation of the Stiasny-reaction for the precipitation of polyphenols in Pine bark extratives. Svensk Papperstidning, v. 58, n. 20, p. 45-750. 1955.

WYCKHUYSE, A.; MALDAGUE, X. Wood inspection by infrared thermography. Proc. of IVth. IWASPNDE, TONES (ASNT pub.), v. 06, p. 201-206, 2002.

XIANG-GUO, L. et al. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blends with high ash coal and waste tyres. Thermochimica Acta, Rostock, v. 441, n. 1, p. 79-83, feb. 2006.

XIONG, S. et al. Investigation on cotton stalk and bamboo sawdust carbonization for barbecue charcoal preparation. Bioresource Technology, Mohali, v. 152, p. 86-92, jan. 2014.

YANG, H. et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel, v. 86, n. 12-13, p. 1781-1788, aug. 2007.

YOUNGQUIST, J. A. Composites from recycled materials. In: INTERNATIONAL UNION OF FORESTRY RESEARCH ORGANIZATIONS. "Forest Products". August 23-28, 1992. Anais… Nancy, France: IUFRO. v. 1, p. 137-140, 1992.

YOUNGQUIST, J. A. et al. Agricultural fibers in composition panels. In: INTERNATIONAL PARTICLEBOARD COMPOSITE MATERIALS SYMPOSIUM, 27., 1993. Anais … Pullman: Washington State University. p. 133-152, 1993.

YOUNGQUIST, J. A. et al.Agricultural fibers for use in building components. In: SYMPOSIUM OF THE USE OF RECYCLED WOOD AND PAPER IN BUILDING APPLICATIONS, 1996. Anais... Madison: USDA/FPL, p. 123-134, 1996.

YTTRUP, P. J. Concrete enhanced timber. In: INTERNATIONAL WOOD ENGINEERING CONFERENCE, New Orleans, USA. In: Proceedings.… New Orleans: Lousiana State University, v. 3, 1996, p. 304-308.

YTTRUP, P. J.; NOLAN, G. Performance of Timber Beam Bridges in Tasmania, Australia. In: INTERNATIONAL WOOD ENGINEERING CONFERENCE, New Orleans, USA. In: Proceedings.… New Orleans: Lousiana State University. v.1, 1996. p. 75-80.

YUSOFF, M. N. M.; HORIE, H. The manufacture of oriented strand boards from rubeewood. Journal of Tropical Forest Products, Malasya, v. 3. n. 1. p. 43-50, 1997.

ZANGIÁCOMO, A. L. Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada. 2003. 103p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2003.

ZENID, G. J. Madeiras e suas características. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Ed.). Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro, 1. Visconde do Rio Branco: Suprema. Jerônimo Monteiro, ES p. 125-158. 2007.

ZHANG, H.; WANG, X.; SU, J. Experimental investigation of stress wave propagation in standing trees. Holzforschung, Berlim, v. 65, n. 5, p. 743-748, aug. 2011.

ZHAO, Z; UMEMURA, K. Investigation of a new natural particleboard adhesive composed of tannin and sucrose. Journal of Wood Science, Heidelberg, v. 60, n. 4, p. 269-277, jun. 2014..

ZHU, X. et al. Decreasing the Formaldehyde Emission in Urea-Formaldehyde Using Modified Starch by Strongly Acid Process. Journal of Applied Polymer Science, New York, v. 131, n. 9, may. 2014.

ZOBEL, B. J.; JETT, J. B. Genetics of wood production. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 337 p.

ZUCKER, W. V. Tannins: does structure determine function? An ecological perspective. The Americam Naturalist, Chicago, v. 121, n. 3, p. 335-365, mar. 1983.

ÍNDICE REMISSIVO

A
ácido bórico · 16
ácido tânico · 12
adesivos · 22, 73
adesivos modificados · 82
adesivos sintéticos · 152
análise de gás · 96
atingir metas · 257, 259
B
bagaço de cana-de-açúcar · 46
biomassa · 28, 48, 215, 223
biomassa lignocelulósica · 184
borracha · 110
C
calorímetros · 235
capacidade ociosa · 254
captador · 105
carbonização da madeira · 198
casca de arroz · 43
casca de café · 46
cinética da degradação térmica · 243
côco verde · 45
combustão · 116, 185, 186, 187, 189, 191
combustão da biomassa lignocelulósica · 191
combustíveis · 205, 215, 229
compensado · 69
compostos orgânicos voláteis · 89, 90, 91, 106, 110
compostos polifenólicos · 4, 5
condensação dos taninos · 20
condensado · 6, 7, 16, 17, 26
conteúdo de tanino · 3, 4
conversão · 185
copolímeros · 28
custo do transporte · 248
custo variável · 256, 258
custos fixo e variável · 254
D
dejetos · 185
densidade básica · 64, 215, 216, 224, 226, 228, 246
derivados de madeira · 62
dessecador · 94
destinação inadequada · 41
E
ensaios · 119
ensaios não destrutivos · 119
ensaios radiográficos · 131
estrutura mista de madeira e concreto · 165
estruturas mistas de madeira e concreto · 166, 170
extração · 93
F
fenólicos · 9
flexão · 24, 55, 68, 121, 126, 128, 131, 157
formação da lignina · 31

formaldeído · 6
fração gasosa · 199
G
gaseificação da biomassa lignocelulósica · 185
gelatinização · 25, 82
H
hidrocarbonetos · 88, 108, 242
I
implantar · 252
impregnado · 91
isenta de defeitos · 120
isolantes · 91
L
ligações metilênicas · 24
lignificação · 37
lignina · 29, 73, 74, 194, 218
lignina de Björkman · 36
localização industrial · 251
logística do transporte · 251
M
madeira · 3, 5, 7, 49
madeira laminada · 146, 149, 159, 182
mamona · 49, 153, 155
materiais voláteis · 190, 191, 193, 194, 210, 233
material lignocelulósico · 40, 210, 223
método do frasco · 95
microtomografia computadorizada · 143
microtomografia · 142
O
oferta de madeira · 249
ondas de tensão · 129, 130, 131
origem biossintética · 29
oxidação biológica · 109
ozônio · 90
P
painéis aglomerados · 52
painéis reconstituídos · 63
pequenos objetos · 57
perforator · 93
pirolenhoso · 199, 211
plasma · 111
poder calorífico volumétrico · 237
polifenóis naturais · 18
polimerização · 29
polímeros · 28
poluente · 108
ponte mista de madeira e concreto · 178
pontes de madeira · 170
pontes mistas · 172
precursores da lignina · 32
processo de carbonização · 200
produção de carvão vegetal · 220
produção do carvão vegetal · 206
propriedades tecnológicas · 44, 65, 77, 79, 82
Q

qualidade · 206, 251
quebracho · 22
R
radiação síncrotron · 140
raios-X · 47, 132, 134, 137, 142, 143
reações da combustão · 188
reatividade do carvão vegetal · 194
regulamentação · 104
resíduos · 40, 41, 42, 44, 49
resinas · 1, 22, 54, 75, 77, 80, 104, 221
restrições técnicas · 252
rigidez à flexão · 127
S
sarrafos · 56
T
tânico · 9, 17, 19, 24, 26
taninos · 2, 23
taninos condensados · 6
taninos hidrolisáveis · 4, 5, 8, 12
taxa de aquecimento · 204
taxa interna de retorno · 256, 261
taxa mínima de atratividade · 248, 256, 257
temperatura final de carbonização · 209
tempo de gelatinização · 84
tensões internas · 178
teor de carbono fixo · 233
teor de lignina · 206, 207, 208, 216, 239
teorias da localização · 251
termografia infravermelha · 138
teste de combustibilidade · 196
tomografia · 134, 135, 136, 137
tomografia elétrica · 137
transporte de madeira · 252
tratamento de madeira · 249
triângulo locacional · 252
U
ultrassom · 121, 122, 123, 130
V
valor presente líquido · 256
velocidade de reação · 19, 88
vibração transversal · 121, 124, 125, 126, 127

Este livro é uma publicação da **EDUR - Editora da UFRRJ**.
Publicado em Setembro de 2018, na cidade de Seropédica/RJ.
Miolo: Formato digital Texto: Minion Pro - 12pt