

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA
DE CLONES DE *Eucalyptus* E DO CARVÃO
PRODUZIDO ENTRE 350°C E 900°C**

RENATO DA SILVA VIEIRA

2009

RENATO DA SILVA VIEIRA

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA DE CLONES DE
Eucalyptus E DO CARVÃO PRODUZIDO ENTRE 350°C E 900°C**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Madeira como Matéria-prima, para a obtenção do título de “Doutor”.

Orientador
Prof. José Tarcísio Lima

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Vieira, Renato da Silva.

Propriedades mecânicas da madeira de clones de *Eucalyptus* e do carvão produzido entre 350°C e 900°C / Renato da Silva Vieira. – Lavras : UFLA, 2009.

80 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.

Orientador: José Tarcísio Lima.

Bibliografia.

1. Resistência mecânica. 2. Carvão vegetal. 3. Temperatura. 4. Carbonização. 5. Elasticidade. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 662.74
674.1

RENATO DA SILVA VIEIRA

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA DE CLONES DE
Eucalyptus E DO CARVÃO PRODUZIDO ENTRE 350°C E 900°C**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira,
área de concentração em Madeira como Matéria-
prima, para a obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 8 de outubro de 2009

| | |
|-------------------------------|--------------------|
| Alfredo Napoli | CIRAD |
| Prof. Paulo Fernando Trugilho | UFLA |
| Túlio Jardim Raad | V&M Florestal Ltda |
| Hélder Bolognani Andrade | V&M Florestal Ltda |

Prof. José Tarcísio Lima
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

DEDICATÓRIA

Dedico,

A minha mãe, meu pai e meu irmão, dos quais recebi todo apoio e compreensão. A meu segundo pai e orientador, José Tarcísio, o qual me transmitiu incondicionalmente seus conhecimentos técnicos e morais para a conclusão dessa longa jornada. Aos meus grandes amigos, Alfredo Napoli e Henri Baillères, pela fundamental ajuda em um país desconhecido, onde aprendi muitas coisas que levo para resto da vida.

Dedico também a minha querida noiva, pela paciência e pelo incentivo nas horas de desânimo.

AGRADECIMENTOS

À sociedade brasileira, à Universidade Federal de Lavras, ao Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), à União Européia, ao L'institute National de la Recherche Agronomique (INRA) e ao governo da França. À União Europeia, por meio do INRA-CIRAD e à UFLA, pela concessão de bolsa no período do trabalho na França. À VMFL Ltda., pela concessão da bolsa durante o trabalho no Brasil. Agradeço também a todos os colegas que participaram, direta e indiretamente, deste trabalho. Aos técnicos Carlos Henrique, José Francisco, Sr. Viko, Hernani, Gilson, Heber e Claret, que tanto contribuem para o andamento dos trabalhos. Sem eles, nada seria possível. Aos professores: José Tarcísio, pela amizade, orientação, oportunidade de crescimento pessoal e profissional; Paulo Fernando Trugilho, pelo incentivo e serenidade nas decisões do dia-a-dia; José Reinaldo, pelas palavras duras que me serviram de estímulo para melhorar a cada dia e Lourival, pela amizade e palavras de incentivo. Ao amigo Alfredo, pela convivência e amizade incondicional durante os anos de trabalho. Ao meu colega Gilles Chaix, pela orientação disponibilizada no dia-a-dia do CIRAD. Ao amigo Edy, pelo incentivo e ajuda a mim fornecida. Quero agradecer também a todos dos demais colegas do CIRAD. Um agradecimento especial à D. Albertina pelo carinho e pelas serenas palavras nas horas de desânimo. A TODOS, MEU MUITO OBRIGADO.

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| LISTA DE FIGURAS..... | I |
| LISTA DE TABELAS..... | V |
| RESUMO..... | VII |
| ABSTRACT..... | VIII |
| APRESENTAÇÃO GERAL..... | IX |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 OBJETIVOS..... | 4 |
| 2.1 Objetivos específicos..... | 4 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 5 |
| 3.1 Benefícios e propriedades da madeira..... | 5 |
| 3.1.1 Densidade e anatomia..... | 7 |
| 3.1.2 Propriedades mecânicas da madeira..... | 8 |
| 3.1.2.1 Propriedades elásticas..... | 9 |
| 3.1.2.2 Propriedades de resistência..... | 11 |
| 3.2 Características que afetam as propriedades mecânicas da madeira..... | 13 |
| 3.2.1 Densidade..... | 13 |
| 3.2.2 Nó..... | 13 |
| 3.2.3 Inclinação da grã..... | 14 |
| 3.2.4 Lenho Juvenil..... | 14 |
| 3.2.5 Ângulo de microfibrilas..... | 14 |
| 3.4 O Carvão vegetal..... | 15 |
| 3.4 Processos de carbonização..... | 16 |
| 3.5 Propriedades do carvão vegetal..... | 18 |
| 3.5.1 Composição química..... | 18 |
| 3.5.2 Características físicas do carvão vegetal..... | 19 |
| 3.5.3 Propriedades mecânicas do carvão vegetal..... | 19 |
| 3.6 Análises de vibrações por meio do “Beam Identification Nondestructive Grading” (BING)..... | 24 |
| 4 MATERIAL E MÉTODO..... | 28 |
| 4.1 Material de estudo..... | 28 |
| 4.2 Amostragem..... | 28 |
| 4.2.1 Confecção das amostras de madeira..... | 29 |
| 4.2.2 Confecção de corpos-de-prova de carvão vegetal..... | 30 |
| 4.3 Parâmetros de carbonização..... | 31 |
| 4.4 Ensaio mecânicos da madeira e do carvão..... | 33 |
| 4.5 Classificações das amostras de carvão vegetal..... | 34 |
| 4.6 Delineamento estatístico e análise de dados..... | 35 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 36 |

| | |
|---|----|
| 5.1 Propriedades mecânicas das madeiras dos clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> | 37 |
| 5.1.1 Variação radial das propriedades mecânicas da madeira dos clones VM01 e MN463..... | 40 |
| 5.2 Propriedades mecânicas do carvão dos clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> | 42 |
| 5.2.1 Variação radial das propriedades mecânicas do carvão dos clones VM01 e MN463..... | 45 |
| 5.2.2 Variação das propriedades mecânicas do carvão dos clones VM01 e MN463 com o aumento da temperatura..... | 49 |
| 5.3 Relação entre as propriedades da madeira e do carvão..... | 55 |
| 5.4 Avaliação não destrutiva das propriedades mecânicas do carvão dos clones VM01 e MN463..... | 56 |
| 6 CONCLUSÕES | 71 |
| 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 73 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 75 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|---|----|
| FIGURA 1 | Módulo de elasticidade à flexão dinâmica, em função do tratamento térmico da madeira de bétula (Adaptado de Moore et al., 1974)..... | 22 |
| FIGURA 2 | Esquema do princípio do ensaio de vibração. adaptado de Brancheriau (2002)..... | 25 |
| FIGURA 3 | Esquema da amostragem para teste mecânicos da madeira de clones de eucalyptus..... | 29 |
| FIGURA 4 | Forno elétrico adaptado para a realização de carbonização..... | 30 |
| FIGURA 5 | Aparato de segurança de serra de fita para corte de peças de pequenas dimensões..... | 31 |
| TABELA 6 | Dimensões de corpos-de-prova para diferentes testes mecânicos..... | 31 |
| FIGURA 6 | Aparato para carbonização informatizado e reator de carbonização..... | 32 |
| FIGURA 7 | Sistema de vibração transversal bing®..... | 33 |
| FIGURA 8 | Detalhe do ensaio em carvão vegetal em máquina universal de ensaios..... | 34 |
| FIGURA 9 | Perfil da temperatura interna do forno elétrico (MUFLA), em função do tempo de carbonização em temperatura de 550°C, para os clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> | 37 |
| FIGURA 10 | Módulo de elasticidade à flexão estática (MOE_F) e do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (MOE_C) das madeiras dos clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> | 37 |
| FIGURA 11 | Módulo de ruptura (MOR) e resistência à compressão paralela às fibras (RC) das madeiras dos clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> | 38 |
| FIGURA 12 | Módulo de elasticidade à flexão estática e módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras das madeiras dos clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> , em diferentes posições de amostragem..... | 40 |
| FIGURA 13 | Módulo de ruptura e resistência à compressão paralela às fibras das madeiras dos clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> , em diferentes posições de amostragem..... | 40 |
| FIGURA 14 | Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras e resistência à compressão paralela às fibras do carvão dos clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> | 44 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 15 Resistência à compressão paralela às fibras do carvão do clone VM01 de <i>Eucalyptus</i> em diferentes posições de amostragem, em função da temperatura de carbonização. | 45 |
| FIGURA 16 Resistência à compressão paralela às fibras do carvão do clone MN463 de <i>Eucalyptus</i> em diferentes posições de amostragem, em função da temperatura de carbonização. | 45 |
| FIGURA 17 Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão do clone VM01 de eucalyptus em diferentes posições de amostragem, em função da temperatura de carbonização. | 46 |
| FIGURA 18 Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão do clone MN463 de eucalyptus em diferentes posições de amostragem, em função da temperatura de carbonização. | 47 |
| FIGURA 19 Resistência à compressão paralela às fibras do carvão dos clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> , em função da temperatura de carbonização. | 49 |
| FIGURA 20 Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão dos clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> , em função da temperatura de carbonização. | 49 |
| FIGURA 21 Modelo ajustado do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão de clones de <i>Eucalyptus</i> obtido por ensaios destrutivos, em função da temperatura. | 52 |
| FIGURA 22 Modelo ajustado da resistência à compressão paralela às fibras do carvão de clones de <i>Eucalyptus</i> obtida por ensaios destrutivos, em função da temperatura. | 53 |
| FIGURA 23 Módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão dos clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> | 57 |
| FIGURA 24 Módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão do clone VM01 de <i>Eucalyptus</i> em diferentes posições de amostragem, em função da temperatura de carbonização. | 58 |
| FIGURA 25 Módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão do clone mn463 de <i>Eucalyptus</i> em diferentes posições de amostragem, em função da temperatura de carbonização. | 58 |
| FIGURA 26 Módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão dos clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> , em função da temperatura de carbonização. | 60 |
| FIGURA 27 Modelo ajustado do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão obtido por ensaio não destrutivo, em função da temperatura. | 62 |

| | | |
|-----------|---|----|
| FIGURA 28 | Ajuste do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão do clone de <i>Eucalyptus</i> MN463, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão vegetal obtido no ensaio não-destrutivo..... | 63 |
| FIGURA 29 | Distribuição dos resíduos do ajuste da regressão entre o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras, obtido pelo método destrutivo, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão obtido pelo método não-destrutivo do clone MN463 de <i>Eucalyptus</i> | 64 |
| FIGURA 30 | Ajuste do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão do clone VM01, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão obtido no ensaio não-destrutivo. | 64 |
| FIGURA 31 | Distribuição dos resíduos do ajuste da regressão entre o módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão obtido pelo método destrutivo, em função do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão obtido pelo método não-destrutivo do clone VM01..... | 65 |
| FIGURA 32 | Ajuste da resistência à compressão paralela às fibras do carvão do clone de <i>Eucalyptus</i> MN463, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão vegetal obtido no ensaio não destrutivo. | 66 |
| FIGURA 33 | Distribuição dos resíduos do ajuste da regressão entre o módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão do clone MN463 de <i>Eucalyptus</i> obtido pelo método destrutivo, em função da resistência à compressão paralela às fibras do carvão obtido pelo método não destrutivo..... | 66 |
| FIGURA 34 | Ajuste da resistência à compressão paralela às fibras do carvão do clone de eucalyptus VM01, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão vegetal obtido no ensaio não-destrutivo..... | 67 |
| FIGURA 35 | Distribuição dos resíduos do ajuste da regressão entre o módulo de elasticidade à flexão dinâmica obtido pelo método destrutivo, em função da resistência à compressão paralela às fibras obtida pelo método não destrutivo do carvão do clone VM01 de <i>Eucalyptus</i> | 67 |
| FIGURA 36 | Ajuste do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão de clones de <i>Eucalyptus</i> , em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão vegetal obtido no ensaio não-destrutivo. | 69 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 37 Distribuição dos resíduos do ajuste da regressão entre o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão obtido pelo método destrutivo, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão obtido pelo método não-destrutivo de clones de <i>Eucalyptus</i> | 69 |
| FIGURA 38 Ajuste da resistência à compressão paralela às fibras do carvão de clones de eucalyptus, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão obtido no ensaio não-destrutivo..... | 70 |
| FIGURA 39 Distribuição dos resíduos do ajuste da regressão entre a resistência à compressão paralela às fibras do carvão obtido pelo método destrutivo, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão obtido pelo método não-destrutivo de clones de <i>Eucalyptus</i> | 70 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 1 Médias e coeficiente de variação da densidade básica de dentro dos clones de <i>Eucalyptus</i> de dois sítios de plantio. | 6 |
| TABELA 2 Valores de densidade básica a 1,30 m do solo e teor de lignina de diferentes espécies de <i>Eucalyptus</i> | 6 |
| TABELA 3 Propriedades dos materiais mais utilizados em engenharia. | 10 |
| TABELA 4 Propriedades mecânicas médias da madeira de clones de <i>Eucalyptus</i> em diferentes posições radiais. | 13 |
| TABELA 5 Características químicas e densidade básica das madeiras dos clones VM01 e MN463 (Andrade, 2009; Rezende, 2009). | 28 |
| TABELA 6 Dimensões de corpos-de-prova para diferentes testes mecânicos. | 31 |
| TABELA 7 Química imediata do carvão vegetal, juntamente com o rendimento gravimétrico e rendimento em carbono fixo. | 36 |
| TABELA 8 Propriedades mecânicas, desvio padrão e coeficientes de variação das madeiras dos clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> | 39 |
| TABELA 9 Propriedades mecânicas das madeiras dos clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> , em função da posição radial de amostragem no interior do caule. | 42 |
| TABELA 10 Resumo da análise variância para as características mecânicas do carvão de clones de <i>Eucalyptus</i> | 43 |
| TABELA 11 Propriedades mecânicas do carvão dos clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> , em função das temperaturas de carbonização e da posição radial de amostragem no caule. | 48 |
| TABELA 12 Propriedades mecânicas do carvão dos clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> , em função das temperaturas de carbonização. | 51 |
| TABELA 13 Resumo da análise de regressão das propriedades mecânicas do carvão de clones de <i>Eucalyptus</i> , em função da temperatura de carbonização. | 51 |
| TABELA 14 Variação das características mecânicas do carvão de clones de <i>eucalyptus</i> por grau centígrado produzido na faixa de 450°C a 900°C. | 53 |
| TABELA 15 Matriz das tendências das propriedades mecânicas do carvão vegetal em diferentes posições de amostragem, em função das temperaturas de carbonização. | 54 |

| | | |
|-----------|---|----|
| TABELA 16 | Matriz de correlação de pearson entre as características mecânicas do carvão de clones de <i>Eucalyptus</i> e as características mecânicas da madeira de origem..... | 55 |
| TABELA 17 | Módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão dos clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> , em função das temperaturas de carbonização e posição radial de amostragem no caule..... | 59 |
| TABELA 18 | Módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão dos clones VM01 e MN463 de <i>Eucalyptus</i> , em função das temperaturas de carbonização..... | 61 |
| TABELA 19 | Resumo da análise de regressão do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão de clones de <i>Eucalyptus</i> , em função da temperatura de carbonização..... | 61 |
| TABELA 20 | Variação das características mecânicas do carvão de clones de <i>Eucalyptus</i> por grau centígrado produzido na faixa de 450°C a 900°C..... | 62 |
| TABELA 21 | Resumo da análise de regressão linear do módulo de elasticidade do carvão de clones de <i>Eucalyptus</i> obtido pelo método destrutivo, em função do módulo de elasticidade obtido por meio de ensaio não-destrutivo..... | 63 |
| TABELA 22 | Resumo da análise de regressão linear entre a resistência à compressão paralela às fibras obtida por ensaio destrutivo e o módulo de elasticidade obtido por meio de ensaio não destrutivo..... | 65 |
| TABELA 23 | Resumo da análise de regressão linear do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras e a resistência à compressão às fibras obtidas por ensaios destrutivos, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica obtida por meio de ensaio não destrutivo..... | 68 |

RESUMO

VIEIRA, Renato da Silva. **Propriedades mecânicas da madeira de clones de *Eucalyptus* e do carvão produzido entre 350°C e 900°C**. 2009. 80p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG*.

O setor siderúrgico brasileiro tem grande importância, tanto econômica quanto ambiental. Ele gera emprego e renda, além de utilizar fonte de energia renovável na produção do aço. O Brasil é o maior pólo siderúrgico a carvão vegetal do mundo e contribui para a diminuição da pressão sobre as florestas naturais, produzindo carvão de florestas plantadas. Para a utilização do carvão vegetal na produção do aço é necessário avaliar a qualidade dessa matéria-prima. A metodologia adotada pelas empresas do setor para avaliar essa qualidade nem sempre é eficiente. Um parâmetro importante e não contemplado pelas indústrias é a resistência mecânica do carvão, não havendo métodos eficazes para sua determinação. Assim, o presente estudo foi realizado com o objetivo de caracterizar mecanicamente, através de ensaios destrutivos e não destrutivos, o carvão de clones de *Eucalyptus* produzidos entre 350°C e 900°C. Além disso, as relações entre as características mecânicas da madeira e do carvão foram identificadas e a eficiência da estimativa da resistência do carvão através do método não destrutivo de vibrações transversais foram verificadas. Para isso dois clones de *Eucalyptus* foram coletados no Estado de Minas Gerais. Os caules foram processados e os testes mecânicos na madeira e no carvão foram realizados. Os clones apresentaram uma ligeira diferença no comportamento mecânico da madeira e do carvão sendo o clone VM01 o mais resistente. A variação das características mecânicas no sentido radial para a madeira e para o carvão foi semelhante: a posição periférica do caule apresentou maiores valores de resistência mecânica e a central menor resistência. Foi observado também que a resistência mecânica do carvão aumenta com o aumento da temperatura de carbonização. Os modelos desenvolvidos com o teste não-destrutivos apresentaram os coeficientes de determinação baixos, no entanto os modelos das propriedades mecânicas do carvão em função da temperatura apresentaram melhores ajustes.

* Comitê Orientador: José Tarcísio Lima – UFLA (Orientador), Paulo Fernando Trugilho – UFLA, Alfredo Napoli – CIRAD e José Reinaldo Moreira da Silva – UFLA.

ABSTRACT

VIEIRA, Renato da Silva. **Mechanical properties of wood of *Eucalyptus* clones and charcoal produced between 350°C and 900°C**. 2009. 80p. Thesis (Doctors in Wood Science and Tecnology)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG*.

The Brazilian steel industry is of great importance both economic and environmental. It creates jobs and income, and also uses a renewable source of energy in the production of steel. Brazil is the world biggest producer of steel industry based on charcoal and contributes to diminish the pressure on the natural forests, producing charcoal from planted forests. In order to use charcoal in the production of steel it is necessary to asses the quality of the raw material. The adopted methodology by the companies to assess the quality of the raw material is not always efficient. An important parameter, but not used by industries, is the mechanic resistance of the charcoal. Thus, the present study was conducted to characterize mechanically, by both destructive and non-destructive tests, the charcoal of *Eucalyptus* clones produced between 350°C and 900°C. In addition, the relationship among the wood mechanical characteristics and charcoal were verified, and the efficiency of the estimative of the strength of charcoal by non-destructive method of transverse vibrations was determined. For this, two *Eucalyptus* clones were collected in the State of Minas Gerais. The stems were processed and mechanical tests on wood and charcoal were carried out. The clones showed a slight difference in the mechanical behavior of both wood and charcoal; the Clone VM01 showed to be more resistant. The variation of the mechanical characteristics in the radial direction, both in wood and charcoal, was similar: the peripheral position of the stem had higher values of mechanical strength and smaller strength in the central position. It was also observed that the mechanical strength of charcoal increases with increasing temperature of carbonization. The developed models with the non-destructive test showed low coefficients of determination, however the models of the charcoal mechanical properties as function of temperature showed better adjustments.

* Guidance Committee: José Tarcísio Lima – UFLA (Major Professor), Paulo Fernando Trugilho – UFLA, Alfredo Napoli – CIRAD and José Reinaldo Moreira da Silva – UFLA.

APRESENTAÇÃO GERAL

Este trabalho faz parte de um acordo de cooperação técnico e científico firmado entre a Universidade Federal de Lavras, o Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agronômica para o Desenvolvimento – CIRAD/França e a empresa V&M Florestal Ltda., pertencente ao grupo Vallourec & Mannesmann Tubes.

O objetivo principal desse acordo foi estudar a otimização da produção de carvão vegetal em todas as suas variáveis, processo, qualidade da madeira e controle de qualidade da matéria-prima e desenvolver técnicas de avaliação do carvão vegetal confiáveis para aplicações na indústria siderúrgica.

Em um primeiro momento, esse acordo de cooperação contou com a participação de dois estudantes de doutorado, três de mestrado e cinco de iniciação científica, coordenados por professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira da UFLA e por um pesquisador do CIRAD/França.

Esse acordo de cooperação internacional entre universidade brasileira, centro de pesquisa internacional e empresa franco-brasileira resultou no desenvolvimento de cinco subprojetos que são relacionados a seguir:

. Subprojeto 1: Estudo da relação entre as propriedades mecânicas da madeira e do carvão vegetal;

. Subprojeto 2: Estudo das propriedades químicas da madeira e seu impacto na qualidade do carvão vegetal;

. Subprojeto 3: Estudos para otimização de corte de madeira de eucalipto para produção de carvão vegetal;

. Subprojeto 4: Estudo da avaliação da secagem de madeira no campo para a carbonização;

. Subprojeto 5: Aplicação do NIRS para avaliação das propriedades da madeira e do carvão vegetal.

Esta tese trata especificamente do subprojeto 1, cujo objetivo inicial foi a avaliação da relação entre as propriedades mecânicas do carvão e da madeira e está diretamente interligada aos subprojetos 2 e 5.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores de ferro-gusa a carvão vegetal do mundo. Segundo Milanez (2005), o país ocupa a décima primeira posição no mercado mundial na exportação de aço bruto. Atualmente, existe uma política governamental no sentido de aumentar também a produção aço no país, tanto para atender a demandas domésticas como o mercado externo, em contrapartida aos grandes volumes de exportação de minério de ferro registrados pelo país (Alencar & Sofia, 2009).

Os alto-fornos das siderúrgicas a carvão vegetal do Brasil apresentam capacidade limitada em relação aos alto-fornos a coque, em parte devido à baixa resistência mecânica do carvão vegetal. De acordo com Santos (2008), um alto-forno a coque pode ser de 11 a 30 vezes maior do que um alto-forno a carvão vegetal.

Para a produção adequada de ferro-gusa, é necessário, além de outros fatores, minério de ferro e carvão de alta qualidade. Um dos problemas enfrentados pela indústria siderúrgica é a heterogeneidade do carvão vegetal utilizado na fabricação do aço em termos de suas características físicas, químicas e mecânicas, como, por exemplo, densidade, teor de carbono e resistência à compressão.

As características mecânicas do carvão vegetal representam uma variável importante no processo da fabricação do aço. A resistência ao esmagamento, por exemplo, é importante, pois o carvão deve suportar as cargas de minério no alto-forno durante a sua redução, evitando-se perdas no processo. É possível que, aumentando essa característica mecânica, consiga-se operar alto-fornos de maior capacidade.

Tradicionalmente, a avaliação das características mecânicas de lotes de carvão é feita pelo teste de tamboramento, que mede a friabilidade e a resistência

à queda, simultaneamente. Esses ensaios, originalmente adaptados de avaliação das características do coque, não fornecem resultados totalmente confiáveis, uma vez que os mesmos não são perfeitamente controlados. Além disso, esses métodos não permitem a caracterização específica de uma peça carbonizada.

A composição química, as características anatômicas e as propriedades físicas têm influência direta na resistência mecânica da madeira. Dessa forma, fatores como o teor de lignina, a espessura das paredes das fibras e a densidade da madeira podem contribuir para a definição de suas características mecânicas (Brown et al., 1963). Variáveis como idade, posição da madeira dentro do fuste e procedência também influenciam essas características. No caso do carvão vegetal, isso não é claro, pois existem poucos estudos sobre o assunto. Entretanto, a pirólise dos constituintes principais da madeira coloca em evidência a estabilidade térmica da lignina e a sua importância, contribuindo diretamente para a produção do carvão vegetal. Essa análise conduz, naturalmente, a uma indicação sobre as relações existentes entre as propriedades mecânicas da madeira e do carvão.

É conhecido que a madeira exerce influência sobre a qualidade do carvão vegetal em aspectos como porosidade, composição química, densidade e poder calorífico, entre outros (Oliveira et al., 1982; Vital et al., 1989; Santos, 2008). Entretanto, não se tem conhecimento aprofundado sobre a influência da madeira e do processo de carbonização (temperatura, taxa de aquecimento e pressão) na resistência mecânica do carvão.

Além das características mecânicas, o carvão vegetal para uso siderúrgico deve apresentar outras características para que sua utilização seja viável no processo de redução do minério de ferro. É importante que o teor de carbono fixo esteja em torno de 75%. Esse teor, considerado ideal, é o responsável pela ocorrência de reações dentro do alto-forno no processo de redução do minério de ferro. É importante lembrar que, além desse teor ideal de

carbono fixo, a dimensão do carvão que reage com o CO₂ também é um parâmetro que contribui diretamente para a difusão dos gases, pois, quanto maior a granulometria mais lenta é a reação de redução.

Diante da ausência de métodos e da dificuldade de se avaliar as características mecânicas do carvão vegetal, principalmente por ser muito quebradiço e heterogêneo, é importante desenvolver ensaios que visem à avaliação confiável em amostras individuais desse material, em diferentes condições de carbonização.

Deve-se ressaltar que o carvão vegetal representa cerca de 40% dos custos de produção na indústria siderúrgica (Santos, 2008). É importante salientar também que são raras as publicações que relatam estudos sobre as características mecânicas do carvão vegetal.

2 OBJETIVOS

Caracterizar mecanicamente, por meio de ensaios destrutivos e não-destrutivos, o carvão dos clones MN463 e VM01 de *Eucalyptus* produzidos em temperaturas entre 350°C e 900°C.

2.1 Objetivos específicos

- Desenvolver ensaios destrutivos de avaliação mecânica do carvão.
- Identificar as relações entre as características mecânicas da madeira e do carvão.
- Verificar a eficiência da estimativa da resistência mecânica do carvão por meio do método não-destrutivo de vibrações transversais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Benefícios e propriedades da madeira

A madeira, fonte renovável de matéria-prima, é empregada pela humanidade desde os primórdios da civilização, como fonte de energia para aquecimento, cocção de alimentos, como material para fabricação de armas, de embarcações, habitações e para a fundição de metais. Atualmente, a versatilidade de itens que usam a madeira como material é inumerável, indo desde uma peça roliça que passa por processamento mecânico mínimo até uma sofisticada folha de papel ou uma grande viga laminada que passa por processos industriais complexos.

Mais recentemente, trabalhos têm sido desenvolvidos com a finalidade de produzir biomateriais a partir da madeira (Silva, 2009).

Com a crise do petróleo, as reorientações da política energética levaram à busca de novas fontes de energia. A utilização de fontes naturais e renováveis de energia mostrou ser uma boa alternativa. Neste caso, o carvão vegetal se destaca como sendo uma fonte renovável de energia (Brito, 1990).

A madeira é um material anisotrópico heterogêneo e deve ser estudada detalhadamente. As variações nas propriedades da madeira podem ser devido às variações entre espécies, entre árvores da mesma espécie e dentro da árvore (Zobel & Buijtenen, 1989). Dentro da árvore, a propriedade varia no sentido longitudinal e radial do tronco. Existem também variações significativas entre o cerne e o alburno, bem como nos lenhos inicial e tardio (Browning, 1963). Lima (1999), estudando 26 clones de *Eucalyptus*, verificou que a variação da densidade básica é baixa dentro de cada clone. Esse estudo pode contribuir de modo a sugerir uma intensidade amostral por clone reduzida. Nos estudos de Lima (1999) são apresentados os valores de densidade básica das madeiras e os coeficientes de variação por clones, como pode ser observado na Tabela 1.

TABELA 1 Médias e coeficiente de variação da densidade básica de dentro dos clones de *Eucalyptus* de dois sítios de plantio.

| Clone | Sítio 1 | | Sítio 2 | |
|-------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|
| | Média (g/cm ³) | CV (%) | Média (g/cm ³) | CV (%) |
| 3 | 0,420 | 1,94 | 0,460 | 1,52 |
| 5 | 0,503 | 1,06 | 0,545 | 0,28 |
| 7 | 0,466 | 1,52 | 0,482 | 1,69 |
| 8 | 0,536 | 1,03 | 0,560 | 1,24 |
| 20 | 0,457 | 1,10 | 0,488 | 0,41 |

Fonte: Adaptado de Lima (1999).

O gênero *Eucalyptus* apresenta variações entre as propriedades da madeira de diferentes espécies, o que pode ser observado para densidade básica e teor de lignina na Tabela 2.

TABELA 2 Valores de densidade básica a 1,30 m do solo e teor de lignina de diferentes espécies de *Eucalyptus*.

| Espécie | Densidade básica a 1,30 m (g/cm ³) | Teor de lignina (%) |
|---------------------------------|--|---------------------|
| <i>Eucalyptus microcorys</i> | 0,656 | 24,4 |
| <i>Eucalyptus pilularis</i> | 0,615 | 25,2 |
| <i>Eucalyptus urophylla</i> | 0,545 | 27,3 |
| <i>Eucalyptus camaldulensis</i> | 0,703 | 30,6 |
| <i>Corimbia maculata</i> | 0,665 | 23,3 |

Fonte: Pereira et al. (2000).

A variação das propriedades da madeira no sentido medula-casca do tronco é mais importante e maior que as variações no sentido longitudinal e entre diferentes árvores da mesma espécie (Cruz et al., 2003). A magnitude dessa variação pode ser determinada principalmente pela presença de madeira juvenil, sua proporção relativa no tronco e pelas suas características físicas, químicas e anatômicas peculiares (Browning, 1963).

A grande heterogeneidade da madeira afeta a sua utilização final, seja ela artesanal ou industrial. Sua composição e os parâmetros ligados à morfologia

dos elementos anatômicos são importantes para a avaliação de uma madeira de boa qualidade (Tsoumis, 1991).

3.1.1 Densidade e anatomia

A disposição das estruturas celulares e a qualidade dos componentes trazem reflexos na determinação da densidade de uma dada espécie. No caso da anatomia, podem ocorrer diferenças entre os lenhos em um mesmo indivíduo, que trazem um significativo impacto sobre a densidade da madeira, como é o caso do lenho de reação (Tsoumis, 1991). Panshin & Zeeuw (1964) resumiram a natureza física da madeira sob três categorias:

- a quantidade de substância da parede celular presente em certa peça de madeira.

- o arranjo e a orientação dos materiais da parede celular nas células e em diferentes tecidos.

- a composição química da substância da parede celular.

Em termos gerais, a densidade da madeira depende de (1) o tamanho das células, (2) a espessura da parede celular e (3) a interrelação entre o número de células de vários tipos em termos de (1) e (2) (Panshin & Zeeuw, 1964).

Lima et al. (2000) verificaram que a densidade da madeira de 26 clones de *Eucalyptus* com oito anos de idade aumentou 24% da madeira central do tronco para a madeira externa. Em outro estudo, Lima et al. (2001), estudando a densidade básica em clones de *Eucalyptus*, constataram que a variação da densidade básica dentro do mesmo clone foi maior que a variação observada entre os diferentes clones estudados. Além disso, os autores detectaram que a idade também influenciou esta característica física da madeira, tendo árvores de seis meses apresentado densidade básica de $0,347 \text{ g/cm}^3$ e árvores de sete anos e meio apresentaram $0,570 \text{ g/cm}^3$, o que representa um aumento de 39%. Estudo realizado por Cruz et al. (2003) indicou variação no sentido radial, para a

densidade básica e outras propriedades físicas da madeira em clones de *Eucalyptus*: em média, 6% do centro para a posição intermediária e 10% do centro para a posição externa.

Lima (1995) relatou que a variação da densidade básica dentro do clone de *Eucalyptus saligna* decrescia com o aumento da idade, chegando a menos de 2% com a idade de 42 meses. De acordo com trabalho de Lima et al. (2000), a densidade básica média de cinco clones de *Eucalyptus* apresentou coeficientes de variação muito baixos, quando as análises se referiram a apenas um local de plantio. Segundo esses autores, devido a essa baixa variação, o tamanho ideal da amostragem, de acordo com a fórmula apresentada por Freese (1984), é igual a uma árvore por clone para o local mais variável. Eles ressaltam que o pequeno número de amostras necessárias para a estimativa da densidade básica de material representa grande vantagem em termos do tempo e custos de experimentação. Entretanto, ainda segundo Lima et al. (2000), é provável que esse pequeno número de amostras seja somente aceitável quando os clones cresceram em locais bem uniformes.

3.1.2 Propriedades mecânicas da madeira

De acordo com Wangaard (1950), as propriedades mecânicas são a expressão do comportamento de um material, quando submetido a uma força. Sempre que a madeira se quebra ou se deforma, ela esteve sujeita à ação de alguma força, portanto, expressa alguma propriedade mecânica. As propriedades mecânicas da madeira não são analisadas separadamente, mas relacionadas com propriedades físicas, químicas e anatômicas. Essas características são importantes em diversas indústrias que utilizam a madeira como matéria-prima ou em uma parte do seu processo produtivo. Em diversas situações, a madeira pode ser solicitada por esforços de flexão, cisalhamento, resistência ao choque, resistência à compressão, tração etc (Wangaard, 1950).

É importante prever, planejar ou explicar o comportamento estrutural dos corpos construídos de madeiras, como pontes, postes, móveis e classificar as diferentes madeiras.

Lima (1999) verificou que a densidade básica é bom preditor das características mecânicas da madeira de *Eucalyptus*, a qual tem maior influência nas características de resistência do que nas características elásticas.

Lima et al. (2000) determinaram as características mecânicas de 26 clones de *Eucalyptus* destinados à produção de polpa e papel. Nesse estudo, os autores encontraram uma variação no módulo de elasticidade à flexão estática de 8% no sentido base e topo da tora basal. Já para o módulo de ruptura, essa variação não foi evidente.

O fato de o comportamento da madeira apresentar maior resistência na periferia está ligada ao lenho juvenil que apresenta células menores, paredes celulares mais finas, ângulo de microfibrilas da parede secundária maiores que da madeira normal e pontuações com diâmetros maiores, influenciando na densidade desse tipo de lenho, traduzindo, assim, em menor resistência mecânica (Brown et al., 1949; Kollmann & Cotê Junior, 1968; Tsumis, 1991).

3.1.2.1 Propriedades elásticas

A elasticidade significa que as deformações produzidas por baixas tensões são completamente recuperáveis depois que as cargas são removidas (Kollmann & Cotê Junior, 1968). Tensões mais elevadas produzem deformações plásticas ou rupturas (Green et al., 1999).

As constantes elásticas ou módulos de elasticidade podem ser obtidos mais facilmente por meio de testes de compressão. Os valores das relações elásticas e aqueles das próprias constantes elásticas variam entre espécies, com o teor de umidade e com a densidade (Green et al., 1999). Alguns módulos de

elasticidade, além de outras propriedades, de diferentes materiais estão apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 Propriedades dos materiais mais utilizados em engenharia.

| Material | Peso específico (kg/m ³) | Tensão de ruptura | | Módulos de elasticidade | |
|--------------------|---|-------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|
| | | Tração (MPa) | Compressão (MPa) | Longitudinal (GPa) | Transversal (GPa) |
| Aços para concreto | 7860 | 600 | - | 210 | 79 |
| Perfis laminados | 7860 | 471-492 | - | - | - |
| Aço inox 302 | 7920 | 860 | - | 190 | 73 |
| Ferro fundido | 7200 | 170 | 650 | 70 | 28 |
| Alumínio | 2710 | 290 | - | 69 | 26 |
| Concreto | 2320 | - | 10-40 | 25-60 | - |
| <i>Eucalyptus</i> | 690-900 | 500-900 | 230-500 | 15-25 | - |
| <i>Pinus</i> | 520-600 | 1100-1600 | 450-750 | 12-15 | - |
| Poliestireno | 1050 | 48 | 90 | 3 | - |
| Vidro plano | 2500 | 4-6 | 60-152 | 65-80 | - |

Fonte: Beer et al. (2008).

Embora haja variação entre as espécies de madeiras, o módulo de elasticidade no sentido radial é consideravelmente maior que no sentido tangencial (Wangaard, 1950). Valores calculados a partir de tabela publicada por esse autor revelam que, em média, o módulo de elasticidade radial é o dobro do tangencial, mas variando de 1,36 vez, para Douglas Fir a 3,31 vezes, para Quipo.

O módulo de elasticidade pode ser calculado baseado na lei de Hook, equação 1.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (\text{Equação 1})$$

em que

E: módulo de elasticidade, em kgf/cm²;

σ : tensão, força por unidade de área, em kgf/cm²;
 ε : deformação, unidade adimensional de deslocamento.

O módulo de rigidez, também chamado de módulo de cisalhamento, indica a resistência à deformação de um membro, causada pela tensão de cisalhamento (Bodig & Jayne, 1982). Como o módulo de elasticidade, o módulo de rigidez varia entre espécies, com a variação do teor de umidade e a densidade. A umidade afeta tal propriedade, pois, quando ocorre a perda de água, a parede celular se enrijece, resultando em uma maior resistência da madeira a aplicações de cargas (Bodig & Jayne, 1982).

O módulo de rigidez é representado pelo símbolo G. O módulo de rigidez associado à deformação em cisalhamento, em diferentes eixos é representado por subtipos. Assim, G_{LT} é o módulo de rigidez associada com deformações no cisalhamento no eixo tangencial resultante de cisalhamento nos eixos radial e transversal (LR e TR); G_{LR} é o módulo associado à deformação no eixo radial resultante do cisalhamento dos outros dois eixos e o G_{RT} que é o módulo associado a deformações no cisalhamento do eixo transversal (Wangaard, 1950).

Geralmente, G_{LR} é maior que o G_{LT} e os dois são, muitas das vezes, maiores que o G_{RT} . Na Tabela 3 podem ser observados alguns valores de módulo de rigidez para diferentes materiais.

3.1.2.2 Propriedades de resistência

O módulo de ruptura reflete a capacidade de carga máxima de uma peça em flexão e é proporcional ao momento máximo exibido pela amostra (Green et al., 1999).

O módulo de ruptura (MOR) é calculado pela equação 2.

$$MOR = \frac{1,6 \times P \times L}{b \times d^2} \quad (\text{Equação 2})$$

em que

P: qualquer carga no limite de proporcionalidade ou abaixo dele, em kgf;

L: vão livre, em cm;

b: largura da viga, em cm;

d: altura da viga, em cm.

A resistência à compressão paralela às fibras é a tensão máxima, no sentido do comprimento, sustentada por uma amostra que tem uma relação entre o comprimento e a dimensão mínima deve ser 4 (Kollmann & Cotê Junior, 1968).

A flexão dinâmica determina a capacidade da madeira de resistir ao choque. Essa propriedade tem importância especialmente quando se utiliza a madeira como cabos de ferramentas, mastros, na construção de escadas, carrocerias, aeronaves e artigos esportivos, entre outros (Bodig & Jayne, 1982). O comportamento da madeira contra a força de impacto que age por apenas uma pequena fração de tempo, por exemplo, por alguns microssegundos, é denominada “resistência ao choque” (Moreschi, 2005).

As propriedades mecânicas apresentam variação entre os indivíduos da mesma espécie. A variação das propriedades mecânicas em clone de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus urophylla* foi determinada por Cruz et al. (2003). Os autores verificaram que há uma variação de 23% no módulo de elasticidade em flexão (MOE_f), de 14% no módulo de ruptura (MOR), de 20% no módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (MOE_c) e de 19% na resistência à compressão paralela às fibras (RC). Na Tabela 4 são apresentados valores

médios de algumas propriedades mecânicas da madeira de clones de *Eucalyptus* em diferentes posições radiais.

TABELA 4 Propriedades mecânicas médias da madeira de clones de *Eucalyptus* em diferentes posições radiais.

| Clones de <i>Eucalyptus camaldulensis</i> e <i>Eucalyptus urophylla</i> | | | | |
|---|------------------------|-----------|------------------------|----------|
| Posição | MOE _f (MPa) | MOR (MPa) | MOE _c (MPa) | RC (MPa) |
| Externo | 15489 | 97 | 8113 | 49 |
| Intermediário | 13253 | 88 | 7250 | 44 |
| Central | 11901 | 85 | 6265 | 40 |

MOE_f = módulo de elasticidade à flexão estática; MOR= módulo de ruptura; MOE_c = módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras; RC= resistência à compressão paralela às fibras. Fonte: Cruz et al. (2003)

3.2 Características que afetam as propriedades mecânicas da madeira

3.2.1 Densidade

A densidade é um excelente índice da quantidade da substância madeira contida em um corpo qualquer. É um bom índice das propriedades mecânicas desde que a madeira seja isenta de defeitos. Entretanto, os valores de densidade também refletem a presença de gomas, resinas e extrativos que contribuem pouco para as propriedades mecânicas (Serpa et al., 2003).

3.2.2 Nó

O nó é a porção de um ramo que foi incorporada no tronco de uma árvore. A influência do nó sobre as propriedades mecânicas de uma peça de madeira deve-se à interrupção da continuidade e à alteração na direção das fibras da madeira associada com o nó. A influência do nó depende do seu tamanho, localização, forma e sanidade, o desvio local da grã e do tipo de tensão que a madeira está sujeita (Burger & Richter, 1991).

3.2.3 Inclinação da grã

Em algumas aplicações dos produtos de madeira, a direção de importantes tensões podem não coincidir com os eixos naturais da orientação das suas fibras. Isso pode ocorrer por escolha no projeto, da forma como a madeira foi retirada da tora ou devido a irregularidades da grã que ocorreram enquanto a árvore estava crescendo (Moreschi, 2005).

3.2.4 Lenho juvenil

O lenho juvenil é a madeira produzida perto da medula da árvore. Essa madeira tem propriedades físicas e anatômicas consideravelmente diferentes da madeira madura (Evans et al., 2000). Normalmente, as propriedades que influenciam o comportamento mecânico da madeira incluem o ângulo microfibrilar, comprimento das fibras e densidade, sendo este um composto da percentagem de lenho tardio, espessura da parede celular e diâmetro do lume (Moreschi, 2005). Ballarin et al. (2003), estudando as propriedades de resistência e rigidez da madeira de *Pinus taeda*, verificou que o comprimento dos traqueídeos aumentou 66% no sentido medula casca até o 18º anel e que a diferença observada da madeira adulta em relação à madeira juvenil para módulo de elasticidade e módulo de ruptura de 54% e 47%, respectivamente, tendo a madeira adulta apresentado os maiores valores.

3.2.5 Ângulo de microfibrilas

O ângulo microfibrilar (MFA) da camada S_2 é conhecido por ser um dos principais fatores das propriedades mecânicas da madeira, incluindo o módulo de elasticidade e a contração anisotrópica (contração longitudinal e tangencial) (Donaldson, 1993). À medida que o ângulo microfibrilar aumentou, a resistência decresce rapidamente (Pearson & Gilmore, 1980). Watson & Dadswell (1964) afirmaram que o ângulo microfibrilar também tem um impacto significativo

sobre as propriedades do papel. Pequenos ângulos microfibrilares foram associados com a alta resistência a tensão da madeira, na qual ângulos microfibrilares maiores foram associados a índices de rasgo e alongamento maiores.

3.4 O carvão vegetal

O carvão vegetal é um produto da transformação térmica da madeira. Ele pode ser utilizado não só na siderurgia, mas também na calefação, na cocção de alimentos e na produção de gás.

Na fabricação do aço, o carvão vegetal é bastante utilizado, no Brasil, como agente redutor na fabricação do ferro-gusa. A siderurgia é um setor industrial de grande importância no Brasil, sobretudo no estado de Minas Gerais que possui grandes jazidas de minério de ferro de fácil exploração. Segundo o Centro de Tecnologia de Minas Gerais-CETEC (1988), o grande impulso da indústria de ferro-gusa a carvão vegetal em Minas Gerais ocorreu com o surgimento, na década de 1950, da indústria automobilística nacional.

O carvão vegetal foi o primeiro combustível utilizado em alto-forno e seu uso tem persistido em países onde existe suprimento de matéria-prima, conhecimento técnico e mercado. Sua grande importância como combustível metalúrgico tem sido reconhecida por ser derivado de uma fonte de carbono renovável (Oliveira et al., 1982).

Toda matéria-prima envolvida em processos de fabricação de um dado produto necessita apresentar parâmetros de qualidade suficientes para garantir um produto final adequado. De acordo com Mendes et al. (1982), entre as propriedades desejáveis do carvão vegetal para a siderurgia, podem-se citar composição química, densidade, tamanho médio de partículas e friabilidade, que estão ligadas à resistência mecânica do carvão, que é um fator importante no processo de fabricação do aço.

Na atualidade, para o controle da qualidade do carvão vegetal recebido dos produtores pelas empresas, geralmente se retiram amostras diretamente dos caminhões e vagões para análise química imediata, ensaios granulométricos e determinação do teor de umidade. A análise imediata determina os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas. Os testes granulométricos verificam o tamanho médio do carvão, bem como a proporção de finos.

A grande variação entre os resultados de teor de carbono fixo, umidade, teor de cinza e materiais voláteis obtidos, mostra que o controle da qualidade da matéria-prima recebida pela indústria não é eficiente. Diversos fatores podem exercer influência sobre essa variação, entre os quais estão a procedência do carvão de florestas heterogêneas, os processos de carbonização sem controle operacional, além da própria amostragem (Santos, 2008).

No caso da produção de gás, o carvão participa em um processo chamado gaseificação. Esse processo é baseado na transformação da madeira em gás combustível à alta temperatura pela queima controlada do carvão vegetal dentro de um recipiente e por meio de reações químicas, sendo o gás energético constituído, principalmente, de CO, CH₄ e H₂. O processo de gaseificação encontra inúmeras vantagens, dentre as quais a ambiental que apresenta maior significância tendo em vista a nulidade do balanço de emissões de gases com a utilização de lenha e carvão no processo de produção. Pode também vir a ser utilizado diretamente como combustível nas caldeiras para a produção de calor e/ou eletricidade (cogeração) e, dentro das turbinas, depois da purificação do gás ou para a produção de combustível por meio das reações de “Fischer Tropsch” para motores de combustão interna (Assumpção, 1981).

3.4 Processos de carbonização

Existem diferentes métodos de produção do carvão vegetal. Esses métodos se dividem em dois grandes grupos quanto à fonte de energia. No

primeiro grupo estão os processos nos quais a fonte de energia é interna, ou seja, parte do material é queimada para fornecer a energia necessária à transformação. Nesse grupo, as características apresentadas são baixo rendimento, sistemas mais simples e rudimentares e exigência de um maior tempo de produção. Esse baixo rendimento é influenciado pela fonte de energia inicial pela combustão parcial da madeira a ser carbonizada (Trugilho, 1999).

Na combustão controlada de parte do material, a carbonização se inicia com a introdução controlada de ar no forno, de modo a queimar parte da lenha contida e aquecer o forno até atingir a temperatura de carbonização. Os fornos mais utilizados, que funcionam com base neste princípio, são os fornos medas, de alvenaria, de encosta e metálicos. Esses fornos apresentam características como baixo rendimento, fácil controle da manobra de carbonização, baixo custo, facilidade de vedação das entradas de ar, fácil construção e possibilidade de deslocamento acompanhando a exploração florestal (Pinheiro et al., 2006).

Sistemas de carbonização nos quais a fonte de energia é externa estão inseridos no segundo grupo. Neste grupo, estão os processos em que o aproveitamento de energia para realizar a carbonização é mais eficiente, como os de carbonização contínua e processos descontínuos, nos quais ocorre o aproveitamento dos gases de carbonização para o início das reações térmicas envolvidas no processo (Trugilho, 1999).

Assis et al. (2008) desenvolveram um protótipo com câmara de combustão externa para avaliação do tempo do ciclo de carbonização sem alterar a qualidade do carvão vegetal. Os autores identificaram um ganho de 34% no tempo de resfriamento. A qualidade do carvão produzido considerando o menor tempo de resfriamento foi, em média, de 24,6% para teor de materiais voláteis, 0,2% para teor de cinzas, 74,8% para o teor de carbono fixo e 4,4% para a umidade, já considerando o maior tempo de resfriamento. As características do carvão produzido foram 4,9% para umidade, 26,8% para o teor de materiais

voláteis, 0,1% para o teor de cinzas e 73% para o teor de carbono fixo. Esses valores apresentados pelos autores mostram que não houve diferença na qualidade do carvão nos diferentes tempos de resfriamento.

3.5 Propriedades do carvão vegetal

3.5.1 Composição química

Santos (2008) afirma que a composição química é um importante parâmetro na qualidade do carvão vegetal, tendo em vista que sua composição é, principalmente, o carbono. Isso porque seu efeito reflete na utilização do forno por unidade de volume. O carbono é o principal redutor do óxido de ferro, produzindo gusa e os gases CO e CO₂. Ou seja, considerando um alto-forno com semelhantes condições operacionais, à medida que aumenta o teor de carbono fixo do carvão, maior a utilização volumétrica do alto-forno. O autor ainda apresenta os teores ideais para o carvão vegetal de uso siderúrgico em que o teor de carbono fixo deve ser entre 70% e 80 %, teor de materiais voláteis de 25% a 35%, teor de cinzas de 0,5% a 4% e enxofre de 0,03% a 0,10%.

Quanto ao teor de cinzas, um aspecto que deve ser considerado é a sua análise. O reflexo desse teor é a composição final da escória e o volume da mesma. No entanto, é muito importante ter consciência também do seu efeito catalisador nas reações que ocorrem entre o C-CO₂. Já são conhecidos os efeitos dos metais alcalinos na velocidade da reação C-CO₂ e os efeitos desta reação no comportamento do alto-forno (Oliveira et al., 1982). Neste trabalho, em estudos realizados pelo autor, a teor de cinzas resultantes de 13 fornadas foi 1,75%, com um desvio padrão de 0,7%.

Os materiais voláteis do carvão são importantes, pois é por meio de sua liberação dentro ou fora do alto-forno que ocorrerão modificações na estrutura do carvão. A mudança de características físicas, como porosidade, diâmetro

médio de poros e área específica total, é que levará ao maior ou ao menor controle do alto-forno (Oliveira et al., 1982).

3.5.2 Características físicas do carvão vegetal

A densidade aparente deve ser analisada com atenção. Quando a densidade do carvão vegetal é muito baixa, reflete diretamente na utilização do volume do alto-forno, ter menor volume útil para a produção de ferro-gusa, considerando uma determinada massa de minério de ferro.

O tamanho médio das partículas de carvão vegetal é outro fator a ser considerado, que está relacionado com a permeabilidade do alto-forno. Isso significa a capacidade da passagem dos gases produzidos para a redução do minério de ferro (Matos & Rios, 1982).

As dimensões das partículas de carvão que reagem com o CO_2 é um dos parâmetros que influenciam o fenômeno da difusão dos gases. Quando a partícula porosa tem dimensões pequenas, o gás reagente é capaz de difundir por todos os poros da partícula, antes de começar a reação. Com o aumento da partícula, considerando todos os outros parâmetros do processo constantes, o caminho percorrido pelo gás que reage é maior. Então, o gás reagente não atinge todos os sítios de reação no interior da partícula. Se a reação dentro dos poros com o aumento do tamanho das partículas torna-se incompleta, logo, a velocidade de reação vai depender do tamanho das partículas. Pode-se dizer, então, que a reação que ocorre entre C- CO_2 é controlada por um fenômeno físico (Matos & Rios, 1982).

3.5.3 Propriedades mecânicas do carvão vegetal

Algumas das principais propriedades mecânicas do carvão vegetal são as resistências ao esmagamento, ao cisalhamento, ao choque (impacto) e à rigidez.

A resistência mecânica do carvão vegetal, também chamada simplificada de friabilidade, é importante em toda a cadeia produtiva do aço, que vai desde a produção florestal até a utilização do produto final, passando pelo transporte e usina, onde há a sobrecarga suportada pela camada de carvão dentro do alto-forno. A friabilidade significa a menor ou a maior resistência do carvão à ruptura e a consequente produção de finos. Está bastante ligada à secagem da madeira antes da carbonização. Ainda hoje são raras as normas que abordam a avaliação mecânica do carvão, salvo alguns ensaios de friabilidade à quebra e tamboramento (Mendes et al., 1982). A única norma expedida em caráter experimental disponível é a NBR 1375-80 (Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT, 1983).

Os testes em caráter experimental realizados pela ABNT foram considerados a partir de ensaios normalizados para o coque, definidos nas normas ISO-R-556 e ISO-R-616 (International Organization for Standardization-ISO, 1995). Tentativas foram realizadas, de modo a adaptar esses testes para o carvão vegetal, mas sem sucesso. As razões pelas quais esses testes não foram bem sucedidos estão ligadas às variações das propriedades físicas do carvão vegetal, como, por exemplo, a granulometria e a geração de finos, pois o número de voltas no caso do teste de tambor é demasiadamente grande para este material, devido ao fato de a resistência do carvão vegetal ser menor que a do coque. Sendo assim, o resultado de teste com excessivo número de evoluções não permite detectar com eficiência a diferença entre diferentes tipos de carvão vegetal (CETEC, 1976).

A maior dificuldade em testes de resistência mecânica do carvão vegetal é a obtenção de corpos-de-prova isentos de defeitos. Em experimentos realizados por Mendes et al. (1982), foi demonstrado que os corpos-de-prova devem ser os menores possíveis, tendo em vista que, em amostras de tamanhos maiores, pode haver um maior desvio padrão nos resultados, em consequência

da ocorrência de defeitos não aparentes. Segundo o autor, a diminuição da seção das amostras pode minimizar a resistência da saída dos gases da carbonização, acarretando uma melhor ruptura das fibras, conseqüentemente diminuindo o número de microfissuras nas amostras. Dessa maneira, testes realizados pelo Centro de Tecnologia de Minas Gerais (CETEC) sugerem corpos-de-prova com dimensões diminutas. No referido trabalho, foram aplicadas as dimensões de 10 x 10 mm de seção e 50 mm de comprimento.

É importante lembrar que, na obtenção do carvão, devem-se analisar a taxa de aquecimento e os patamares a serem utilizados, de modo a reduzir a quantidade de defeitos no carvão produzido (Mendes et al., 1982). As taxas de aquecimento mais suaves, segundo o autor, podem suavizar a secagem e a saída dos gases da carbonização, reduzindo os defeitos nas amostras carbonizadas. Testes mecânicos realizados com madeira de bétula apresentaram tendência de aumento do módulo de elasticidade a partir de temperatura de 450°C. Nesse trabalho, desenvolvido por Moore et al. (1974), foi apresentado o módulo de elasticidade em função da temperatura. No tratamento térmico considerado à baixa temperatura, houve queda acentuada no módulo de elasticidade até a temperatura de 400°C. Essa queda é progressiva entre todas as temperaturas desse tratamento térmico, o qual partiu de 27°C até 400°C. Entretanto, nos tratamentos nos ensaios de resistência à alta temperatura, os quais partiram de 600°C a 700°C com taxa de aquecimento de 4°K por minuto, houve uma inversão dessa tendência de redução do módulo de elasticidade. Nesta etapa do trabalho, o aumento de temperatura representou um aumento no módulo de elasticidade da madeira de bétula carbonizada. Na Figura 1 podem ser observados com mais detalhes os valores de módulo de elasticidade em função da temperatura.

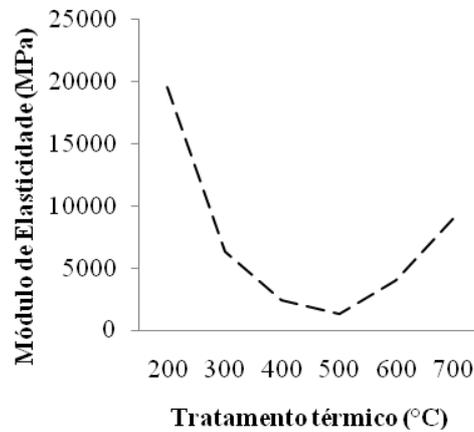


FIGURA 1 Módulo de elasticidade à flexão dinâmica, em função do tratamento térmico da madeira de bétula (Adaptado de Moore et al., 1974).

A magnitude dos resultados vai de 21.000 MPa, em temperaturas de 130°C, até 1.300 MPa, à temperatura de 500°C (Moore et al., 1974). Vale a pena levar em consideração os resultados obtidos pelo CETEC, segundo os quais a resistência à compressão aumenta com o aumento da temperatura de carbonização embora, nesse trabalho, tenham sido utilizadas temperaturas de carbonização de 300° a 900°C. À temperatura de 900°C, a resistência à compressão é maior que para a temperatura de carbonização de 500°C, ou seja, a temperatura usualmente utilizada na fabricação do carvão vegetal (Mendes et al., 1982).

O componente que atua na formação do carvão é, principalmente, a lignina, embora a celulose e a hemicelulose também influencie. As propriedades relacionadas a esse material estão relacionadas à interação desses precursores. A reação desses polímeros em determinadas condições de carbonização não é bem conhecida. No caso da madeira, é mais complexo, pelo fato de o grau da interação dos vários componentes e os efeitos do resíduo da celulose serem desconhecidos (Moore et al., 1974).

Blankenhorn et al. (1972) propuseram que a degradação térmica da madeira, sobretudo da lignina, se assemelha à formação do carbono vítreo de resinas fenólicas. Este processo envolve três fases. De 300° a 500°C, são formados feixes de grafite de ligações bastante instáveis; é nesta fase que ocorrem grandes perdas de massa e um declínio considerável das propriedades mecânicas. Entre 500° e 1.000°C, são formadas as ligações cruzadas entre o grafite como material, o hidrogênio é perdido e uma massa de fibrilas se orienta. Ocorre pequena perda de massa, mas há um aumento considerável das propriedades mecânicas.

O aumento na resistência em função da temperatura pode estar ligado ao aumento da quantidade de fibras por unidade de área. Com o aumento da temperatura, ocorre um possível rearranjo estrutural do carbono residual, apresentando como consequência um incremento na resistência mecânica do carvão vegetal (Mendes et al., 1982).

O comportamento mecânico do carvão para diferentes madeiras é semelhante. Com o aumento da temperatura de carbonização acima de 500°C, o módulo de elasticidade aumenta (Moore et al., 1974). Observando a microestrutura do carvão, constata-se que, independente da temperatura, a estrutura da madeira se mantém íntegra, embora haja diferentes níveis de contrações nos diferentes elementos que constituem a estrutura da madeira (Blankenhorn et al., 1972).

Isso pode ser comprovado por meio de estudos realizados por Blankenhorn et al. (1972) e Slocum et al. (1978), que verificaram as alterações no rendimento do carvão vegetal, da retratibilidade e da densidade durante a carbonização de diferentes madeiras sob temperaturas distintas. Os valores de contração tangencial observados foram de 45%, radial 58% e longitudinal de 19% entre as temperaturas de 200° e 400°C (Blankenhorn et al., 1972). Slocum et al. (1978) encontraram valores de retratibilidade para o carvalho carbonizado

a 300°C de 58% para contração tangencial, 44% para radial e 24% na longitudinal. Quando foram aplicadas temperaturas entre 400° e 800°C, houve um aumento na contração longitudinal de 90%, radial de 62% e tangencial de 43%. Nesse mesmo trabalho foi avaliada a densidade da madeira e do carvão que apresentou um decréscimo da densidade. A densidade da madeira de 0,76 g/cm³ passou para 0,60 g/cm³ quando transformada em carvão; já para a madeira de hickory, de 0,93 g/cm³ passou para 0,73g/cm³.

3.6 Análises de vibrações por meio do “beam identification nondestructive grading” (BING)

A análise da vibração é um meio simples e eficiente para caracterizar as propriedades elásticas de uma dada massa. Esse tipo de análise é crescente e vem sendo utilizado na ciência relacionada à madeira, como por Brancheriau & Bailleres (2002). O BING é um sistema de medição de vibrações transversais para determinar as propriedades mecânicas e detectar defeitos da madeira (Figura 2). Ele foi desenvolvido pelo Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), no intuito inicial de difundir o emprego da madeira em construções e também para realizar a classificação, de modo a aumentar a confiabilidade do material (Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement-CIRAD, 2007).

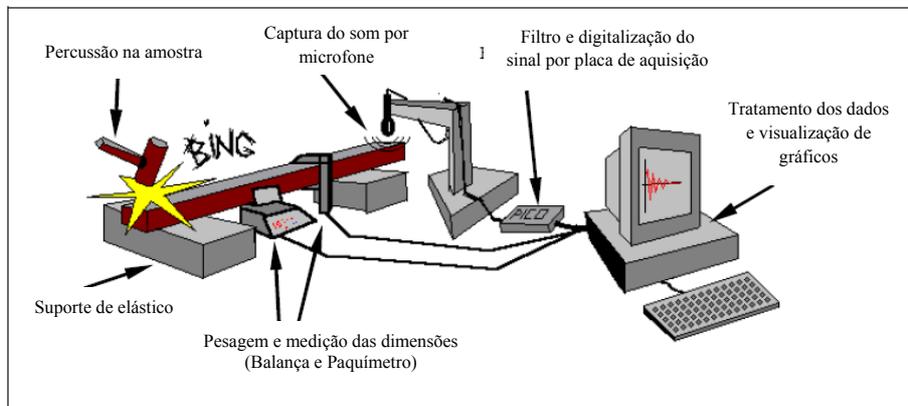


FIGURA 2 Esquema do princípio do ensaio de vibração. Adaptado de Brancheriau (2002).

Essa técnica tem se destacado entre as empregadas em testes não destrutivos, principalmente pela grande aderência entre o modelo físico do fenômeno e o correspondente matemático teórico (Targa et al., 2005). Entretanto, poucos estudos têm sido realizados com este equipamento. Uma exceção é o estudo de Targa et al. (2005), que determinaram o módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. Os valores médios de módulo de elasticidade dinâmica encontrados pelos autores neste estudo foram: 24.704 MPa para *Eucalyptus citriodora*, 16.990 MPa para *Eucalyptus grandis* e 19.566 MPa para *Eucalyptus saligna*.

O método de vibrações transversais é equacionado com base no modelo de Euler e Saint-Venant e é apresentado por diversos autores, como Hermon (1961), Snowdon (1968), Bodig & Jayne (1982), Gough et al. (1983) e Bucur (1995), apresentando:

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial v}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{Equação 3})$$

em que:

E: módulo de elasticidade;

I: momento de inércia;

v: deslocamento na direção y ou z, normais ao eixo da viga;

x: distância ao longo do eixo da viga;

ρ : densidade de massa;

A: área da secção transversal da viga;

t: tempo.

A solução geral da equação 3, considerando-se a vibração transversal de barras com extremidades livres, é:

$$E = \frac{4\pi^2 f_n^2 l^4 A \rho}{I m_n^4} \quad (\text{Equação 4})$$

em que:

f_n : frequência de vibração associada ao modo “n” (n-ésima harmônica), Hz= s^{-1} ;

l: comprimento da barra, m;

m_n : fator de correção associado à n-ésima harmônica, sem unidade;

$[E]=\text{Pa}$; $[\rho]=\text{Kg.m}^{-3}$; $[A]=\text{m}^2$; $[I]=\text{m}^4$.

De modo geral, analisa-se a vibração transversal de barras monitorando-se sua frequência de ressonância principal (1ª harmônica), e, nesse caso, a equação 4 toma a forma:

$$E = E_d = \frac{0,9464 \rho f_1^2 l^4}{h^2} \quad (\text{Equação 5})$$

em que

E_d : módulo de elasticidade dinâmico (o índice “d” diferencia esse módulo daquele por meio de ensaios convencionais estáticos), Pa;

h: altura da barra, m.

Essa expressão simplificada (Equação 5) tem sido utilizada em grande parte de estudos que utilizam a vibração transversal no método de ressonância (Targa et al., 2005).

Talvez estudos precursores tenham sido realizados por Kline (1952) e Blankenhorn et al. (1973), que utilizaram um aparato de mensuração de propriedades mecânicas, tendo como princípio a relação da audiofrequência na determinação de propriedades mecânicas para diferentes materiais, sobretudo a madeira. Segundo Blankenhorn et al. (1973), o módulo de elasticidade é determinado por meio da ressonância da frequência relacionada ao módulo, como pode ser observado na equação 6.

$$E = \left(\frac{1}{12 \times 7} \right) \times \left(\frac{l^4 \times \rho}{R^2} \right) \times f_0^2 \quad (\text{Equação 6})$$

em que

E: módulo de elasticidade dinâmico (dyne/cm²);

l: comprimento da amostra, em cm;

ρ : densidade em (g/cm³);

R: raio de giro da secção transversal, em cm;

F₀: frequência (db).

4 MATERIAL E MÉTODO

4.1 Material de estudo

Neste estudo foram utilizados os clones VM-01 (híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* com *Eucalyptus urophylla*) e MN-463 (híbrido natural de *Eucalyptus urophylla*), ambos plantados em espaçamento 3 x 3 m, no município de Paraopeba, MG. Esses clones tinham 7 anos de idade e eram provenientes de plantios comerciais da empresa V&M Florestal Ltda. As características químicas e a densidade básica dos clones estão apresentadas na Tabela 5.

TABELA 5 Características químicas e densidade básica das madeiras dos clones VM01 e MN463 (Andrade, 2009; Rezende, 2009).

| Clone MN 463 | | | | | | Clone VM01 | | | | | |
|--------------|------|-----|------|------|-------|------------|------|-----|------|------|-------|
| Ex | Li | Ls | Lt | Ho | DB | Ex | Li | Ls | Lt | Ho | DB |
| 5,2 | 24,5 | 3,7 | 28,2 | 66,6 | 0,496 | 6,0 | 24,9 | 3,8 | 28,7 | 65,3 | 0,536 |

Ex- teor de extrativos totais (%), Li – teor de lignina insolúvel (%), Ls – teor de lignina solúvel (%), Lt – lignina total (%), Ho – teor de holocelulose (%), DB – densidade básica (g/cm³).

Uma árvore de cada clone foi estudada para a caracterização mecânica da madeira e do carvão vegetal. Foram utilizadas mais duas árvores de cada clone, para efetuar os cálculos dos erros de laboratório.

4.2 Amostragem

A amostragem foi efetuada considerando a existência de variação das propriedades da madeira no sentido medula-casca do caule. As árvores foram abatidas e seccionadas em toras de 1,5 m de comprimento. Simultaneamente a esse procedimento, as toras foram devidamente identificadas.

4.2.1 Confeção das amostras de madeira

Depois de cortadas, as toras foram desdobradas na Unidade Experimental de Desdobro e Secagem da Madeira da Universidade Federal de Lavras. As pranchas, tão logo produzidas, foram devidamente identificadas.

A prancha central foi processada em corpos-de-prova com dimensões de 25 x 25 x 100 mm (Figura 3), para serem levados ao forno elétrico (mufla) adaptado para realizar carbonizações no Laboratório de Energia da Biomassa da UFLA (Figura 4). Esse forno consiste de um reator metálico conectado a uma tubulação em aço. O gás, durante a sua saída, passa por um condensador, onde é resfriado e coletado em um Erlenmeyer.

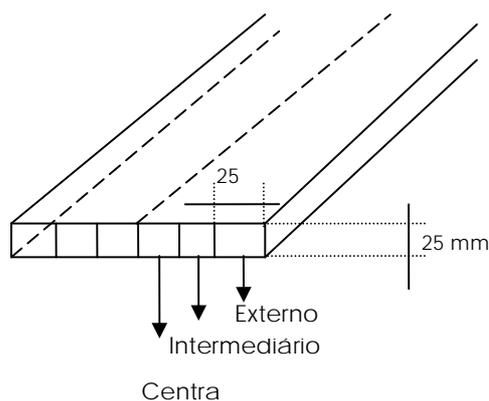


FIGURA 3 Esquema da amostragem para teste mecânicos da madeira de clones de *Eucalyptus*.

Para os ensaios mecânicos da madeira, foram confeccionados também, a partir dessas mesmas pranchas, corpos-de-prova nas dimensões de 25 x 25 x 100 mm e 25 x 25 x 410 mm (Figura 3), para a realização dos ensaios mecânicos de compressão paralela às fibras e flexão estática, respectivamente, no Laboratório de Mecânica da Madeira, de acordo com a norma ASTM –D143-94 (American Society for Testing and Materials-ASTM, 1995). As amostras

foram confeccionadas no Laboratório de Usinagem da Madeira da Universidade Federal de Lavras.



FIGURA 4 Forno elétrico adaptado para a realização de carbonização.

4.2.2 Confeção de corpos-de-prova de carvão vegetal

As amostras de madeira, depois de carbonizadas, foram enviadas para que fossem confeccionados os corpos-de-prova para os testes mecânicos do carvão. Os corpos-de-prova de carvão foram confeccionados na Unidade Experimental de Desdobro e Secagem da Madeira da Universidade Federal de Lavras. Uma serra de fita foi utilizada para o processamento do carvão vegetal, cuja lâmina utilizada apresentava as características próprias para corte de aço. Essa adaptação foi feita para que a execução da operação fosse desenvolvida com qualidade e segurança. Além da adaptação da lâmina, foi desenvolvido um aparato de segurança para o operador, pois as amostras processadas

apresentavam dimensões bastante reduzidas. Esse aparato pode ser observado na Figura 5.



FIGURA 5 Aparato de segurança de serra de fita para corte de peças de pequenas dimensões.

Para os diferentes testes mecânicos realizados no carvão foram confeccionados corpos-de-prova de diferentes dimensões (Tabela 6).

TABELA 6 Dimensões de corpos-de-prova para diferentes testes mecânicos.

| Teste mecânico | Dimensões (mm) |
|-------------------------------|----------------|
| Bing | 10 x 10 x 110 |
| Compressão paralela às fibras | 10 x 10 x 25 |

4.3 Parâmetros de carbonização

As carbonizações foram realizadas em forno elétrico adaptado com sistema de recuperação de gases. O dispositivo de entrada e saída de parâmetros foi informatizado.

O aparato de carbonização é constituído de um forno elétrico (mufla) conectado a um computador que envia os parâmetros de carbonização para um

proportional integral derivative controller e de um reator metálico cilíndrico com tampa de maciça rosqueável (Figura 6).



FIGURA 6 Aparato para carbonização informatizado e reator de carbonização.

Para obter amostras de carvão de modo a produzir corpos-de-prova, livres de defeitos ou com mínimo de defeitos, os parâmetros de carbonização foram diferenciados daquele normalmente utilizado na indústria. Quatro tratamentos foram aplicados nas carbonizações, variando as temperaturas finais de 350°C, 450°C, 550°C e 900°C, com taxa de aquecimento de 0,5°C por minuto. As temperaturas foram determinadas em ensaios preliminares em que a primeira temperatura apresentasse um carbono fixo de 75%; às duas temperaturas seguintes seriam somados 100°C a partir da primeira e da última temperatura de tratamento do carvão mineral para a produção do coque, que é 900°C.

A taxa de aquecimento foi obtida por meio de testes preliminares realizados no CIRAD Montpellier na unidade própria de pesquisa em biomassa e energia. Nesses testes preliminares foram carbonizadas madeiras de clones de *Eucalyptus* com as velocidades de 10°, 5°, 1°, 0,5° e 0,1°C/min. A velocidade de aquecimento que apresentou os menores feitos em função da qualidade da amostra foi a velocidade de 0,5°C/min. A velocidade aquecimento de 0,1°C/min

apresentou boa qualidade das amostras, mas as melhorias na amostra em função do tempo para obtê-la não foi a melhor relação.

4.4 Ensaios mecânicos da madeira e do carvão

Os ensaios de compressão paralela às fibras e de flexão estática da madeira foram realizados de acordo com a norma ASTM D143-94 (ASTM, 1995).

O ensaio não-destrutivo aplicado nos corpos-de-prova de carvão para determinar o módulo de elasticidade à flexão foi executado com o auxílio do BING®, desenvolvido pelo CIRAD, normalmente utilizado para madeira maciça. A determinação da propriedade mecânica é dada por meio da relação das frequências sonoras captadas por um microfone, da massa específica do material e do comprimento da amostra. O som, neste trabalho, foi produzido pelo impacto de uma esfera de 1 cm de diâmetro na amostra de carvão. A esfera foi liberada a uma altura de 30 cm da amostra ensaiada (Figura 7). Os modelos desenvolvidos para essa determinação podem ser observados com maiores detalhes em Brancheriau & Bailleres (2002).

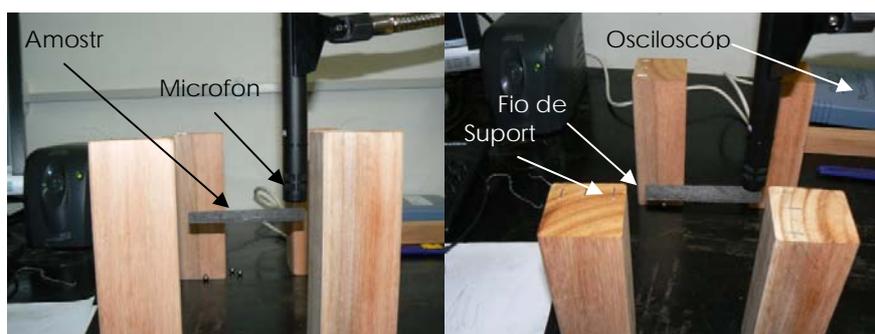


FIGURA 7 Sistema de vibração transversal BING®

Após as amostras serem submetidas ao ensaio não-destrutivo, foram também realizados, em máquina universal EMIC DL 30000, os testes destrutivos convencionais (Figura 8). Os parâmetros do teste do carvão vegetal foram desenvolvidos, neste trabalho, por meio de testes preliminares, nos quais foram identificadas as particularidades do material.

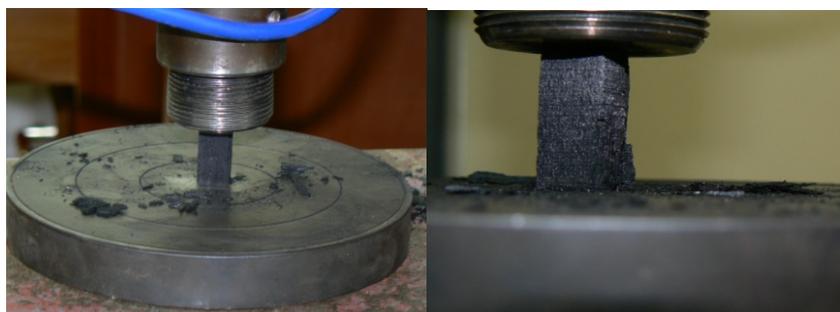


FIGURA 8 Detalhe do ensaio em carvão vegetal em máquina universal de ensaios.

A rótula normalmente utilizada para testes em madeira foi excluída do aparato, pois seu peso era suficiente para danificar parcialmente as amostras. A velocidade de aplicação de carga foi de 0,005 cm/min e o ensaio era interrompido quando se atingia perda de 20% da carga máxima. Esse ponto foi detectado quando não havia mais a possibilidade de ocorrer um rearranjo estrutural do corpo-de-prova. A dimensão dos corpos-de-prova para ensaio de compressão encontra-se descrita na Tabela 6.

4.5 Classificações das amostras de carvão vegetal

Foram realizadas avaliações visuais nos corpos-de-prova produzidos com carvão vegetal para classificá-los quanto à presença de defeitos. Essa classificação foi subjetiva, criando-se uma escala de 1 a 3, em que 1

correspondia ao corpo-de-prova que apresentava a superfície menos defeituosa e 3 a mais defeituosa. Essa avaliação foi realizada antes dos testes não destrutivos.

4.6 Delineamento estatístico e análise de dados

Inicialmente, foram realizadas a análise descritiva e a análise de correlação de Pearson entre as características avaliadas na madeira e no carvão vegetal. A seguir foi feita a análise de variância para verificar a influência das variáveis estudadas nas características mecânicas do carvão. Foi realizada também a análise de regressão para ajustar as equações que estimam as características mecânicas avaliadas em função da temperatura e do módulo de elasticidade à flexão dinâmica. O modelo testado para as regressões foi o linear simples, com intervalo de confiança de 95% de probabilidade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados em cinco principais tópicos: propriedades das madeiras dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*, propriedades mecânicas do carvão dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*, variação das propriedades mecânicas do carvão dos clones VM01 e MN463 com o aumento da temperatura, relação entre as propriedades da madeira e do carvão e avaliação não destrutiva das propriedades mecânicas do carvão dos clones VM01 e MN463.

Na Tabela 7 são apresentadas algumas características do carvão avaliado para mostrar a homogeneidade do material a que está sendo submetida a avaliação mecânica. Na Figura 9 pode-se observar o perfil da temperatura interna do forno elétrico, em função do tempo de carbonização. O perfil apresentado foi para a temperatura de 550°C. As demais temperaturas avaliadas apresentaram a mesma tendência.

TABELA 7 Química imediata do carvão vegetal, juntamente com o rendimento gravimétrico e rendimento em carbono fixo.

| | Clone MN 463 | | | | | Clone VM 01 | | | | |
|-------|--------------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|
| | TMV | TCZ | TCF | RGC | RCF | TMV | TCZ | TCF | RGC | RCF |
| Média | 18,4 | 0,3 | 81,2 | 33,6 | 26,8 | 15,3 | 0,3 | 84,4 | 34,0 | 28,2 |
| CV(%) | 58,4 | 57,7 | 13,2 | 15,9 | 8,0 | 68,4 | 49,2 | 12,4 | 14,5 | 6,2 |
| Max. | 44,6 | 1,6 | 98,3 | 53,4 | 35,4 | 36,1 | 0,8 | 96,5 | 44,2 | 31,8 |
| Min. | 1,4 | 0,1 | 55,1 | 23,5 | 21,9 | 3,2 | 0,0 | 63,7 | 24,7 | 23,1 |

TMV – teor de materiais voláteis, TCZ – teor de cinzas, TCF – teor de carbono fixo, RGC – rendimento gravimétrico, RCF – rendimento em carbono fixo, CV – coeficiente de variação, Max – máximo (%); Min – mínimo (%).

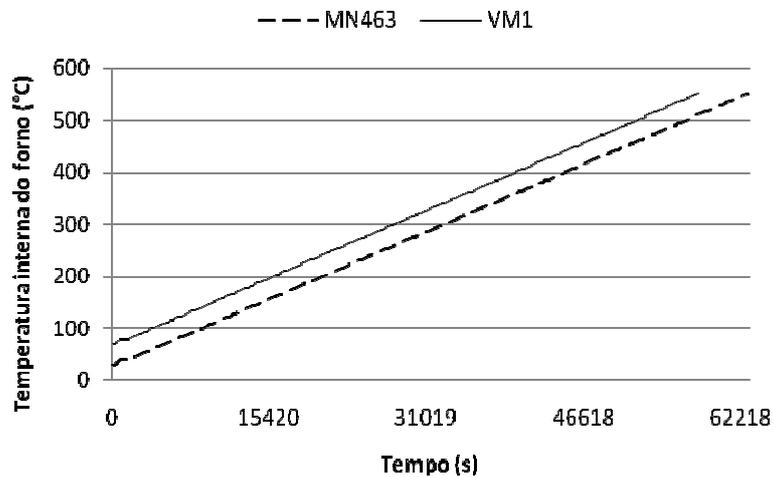


FIGURA 9 Perfil da temperatura interna do forno elétrico (MUFLA), em função do tempo de carbonização em temperatura de 550°C, para os clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*.

5.1 Propriedades mecânicas das madeiras dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*

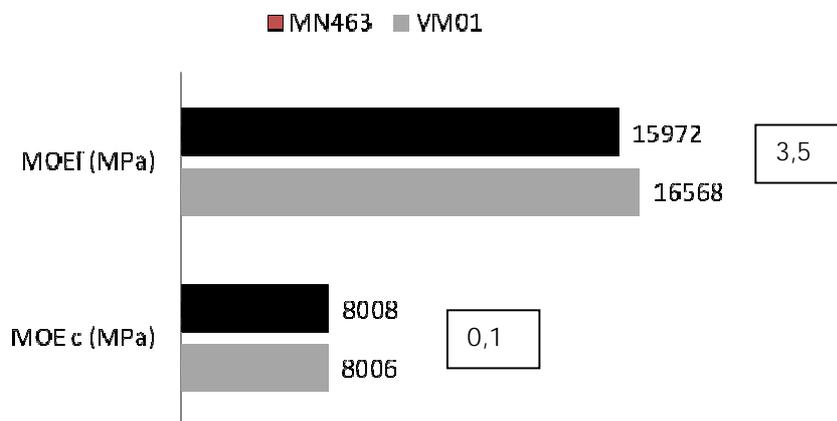


FIGURA 10 Módulo de elasticidade à flexão estática (MOE_f) e do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (MOE_c) das madeiras dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*.

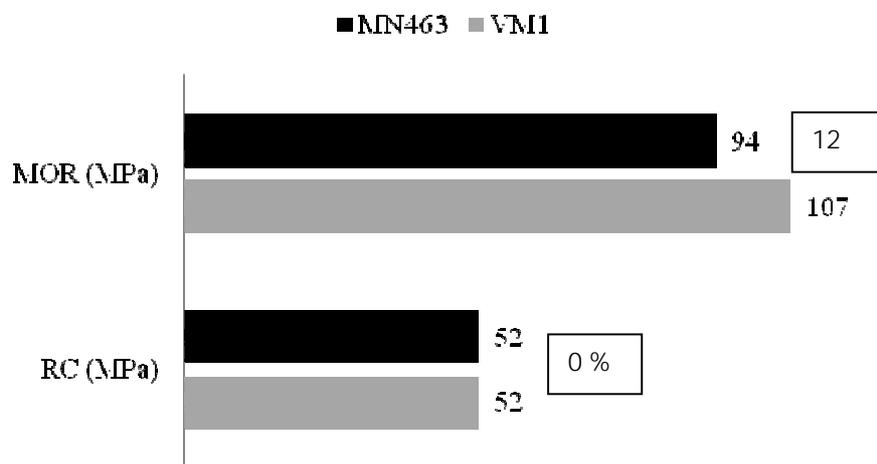


FIGURA 11 Módulo de ruptura (MOR) e resistência à compressão paralela às fibras (RC) das madeiras dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*.

Observa-se, nas Figuras 10 e 11, o comportamento dos clones VM01 e MN463 em relação às características mecânicas da madeira de *Eucalyptus*. O módulo de elasticidade à flexão estática (MOE_t) foi 3,5% maior para o clone VM01 que para o clone MN463. Essa diferença de médias entre os dois clones pode ser devido às características químicas e físicas de cada material genético. Pode-se observar, na Tabela 5, em que são apresentadas as características químicas e físicas das madeiras dos clones, que o clone que apresenta a maior média de módulo de elasticidade é o clone VM01. Ele apresenta densidade básica ligeiramente maior que o outro. Esses resultados podem ser confrontados com estudos de Lima (1999) que também encontrou valores de módulo de elasticidade à flexão estática maiores em madeiras de clones de *Eucalyptus* com maiores densidades. O módulo de ruptura (MOR) também apresenta a mesma tendência do clone VM01, que apresenta maiores médias de MOR que o MN463.

Bodig & Jayne (1982) afirmam que as propriedades mecânicas da madeira estão correlacionadas com a densidade. Sendo assim, os resultados encontrados contemplam essa afirmação, uma vez que houve diferença de 12% no módulo de ruptura entre os clones estudados.

A resistência à compressão paralela às fibras e o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras não apresentaram diferenças entre os clones. Apesar da densidade da madeira apresentar uma ligeira diferença. Talvez essa ligeira diferença não fosse suficientemente grande para influenciar essas características, de modo a influenciar as médias. No entanto, Gonzalez et al. (2009), estudando a qualidade da madeira de *Pinus*, verificaram que uma madeira que apresentava sua densidade 6% maior apresentou um MOR 16% maior, ou seja uma baixa variação na densidade ocorreu um impacto no MOR. Na Tabela 8, são apresentados os valores médios das propriedades mecânicas da madeira dos clones VM01 e MN463 e seus respectivos coeficientes de variação.

TABELA 8 Propriedades mecânicas, desvio padrão e coeficientes de variação das madeiras dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*.

| Clone | | VM01 | MN463 |
|---------------------------|--------|-------|-------|
| MOE _c (MPa) | M | 8006 | 8008 |
| | DP | 1754 | 1486 |
| | CV (%) | 22 | 19 |
| RC (MPa) | M | 52 | 52 |
| | DP | 8 | 7 |
| | CV (%) | 16 | 13 |
| MOE _f (MPa) | M | 16568 | 15972 |
| | DP | 3023 | 2751 |
| | CV (%) | 18 | 17 |
| MOR (MPa) | M | 107 | 94 |
| | DP | 19 | 15 |
| | CV (%) | 17 | 16 |

MOE_c: módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras; RC: resistência à compressão paralela às fibras; MOE_f: módulo de elasticidade à flexão estática; MOR: módulo de ruptura; M: média; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

5.1.1 Variação radial das propriedades mecânicas da madeira dos clones VM01 e MN463

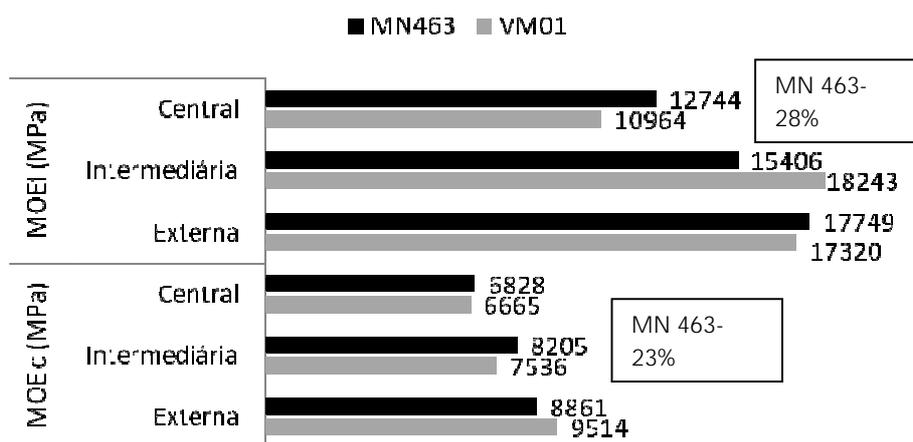


FIGURA 12 Módulo de elasticidade à flexão estática e módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras das madeiras dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*, em diferentes posições de amostragem.

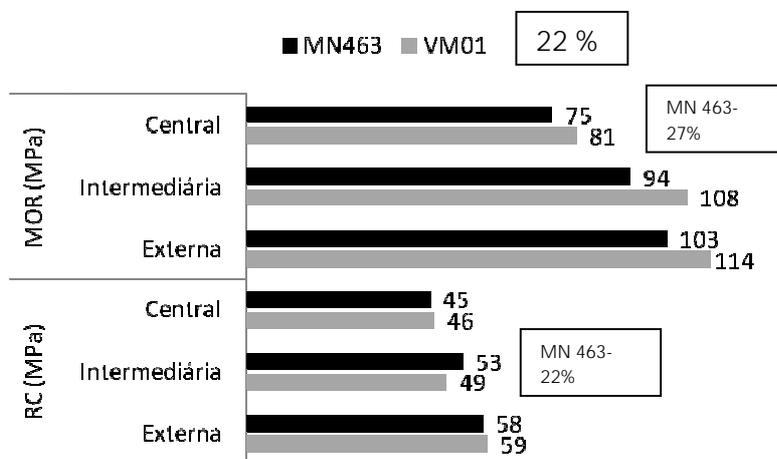


FIGURA 13 Módulo de ruptura e resistência à compressão paralela às fibras das madeiras dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*, em diferentes posições de amostragem.

Nas Figuras 12 e 13 apresenta-se o comportamento das características mecânicas da madeira dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*. Observa-se que, para os módulos de elasticidade à compressão paralela às fibras, a flexão estática, de ruptura e a resistência a compressão paralela às fibras apresentaram valores médios maiores na região periférica de amostragem. A percentagem de aumento das características mecânicas da madeira do clone MN463 do centro para a periferia foi de 28% para MOE_f , 23% para MOE_c , 27% para MOR e 22% para a RC. Para o clone VM01, as diferenças percentuais foram de 37%, 30%, 29% e 22%, para as características MOE_f , MOE_c , MOR e RC, respectivamente. O comportamento radial das propriedades mecânicas da madeira está de acordo com o encontrado por Cruz et al. (2003), em que a parte externa apresenta valores maiores que as posições intermediária e central para as propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus* sp. Entretanto, os autores encontraram diferenças entre as posições que variaram entre 19% e 22%.

Nos resultados apresentados nas Figuras 12 e 13, pode-se observar que o clone VM01 apresenta maior variação entre o centro e a periferia que o clone MN463. Talvez essa diferença possa estar ligada ao processo de cernificação do clone VM01 ser mais precoce que no clone MN463. Um dos indícios desse processo pode ser observado na Tabela 5, em que é apresentado o teor de extrativos da madeira. Como não existem evidências de que o teor de extrativos pode contribuir para a resistência mecânica da madeira, a razão pela qual essa diferença é percebida pode estar ligada à anatomia de cada material estudado, relacionados ao comprimento de fibra, ângulo de microfibrilas, dentre outras características anatômicas não estudadas neste trabalho. Pelos dados da Tabela 4 verifica-se que o teor de extrativos do clone VM01 é 13% maior que o clone MN463. Na Tabela 9 são apresentadas as propriedades mecânicas da madeira, levando em conta as posições radiais de amostragem estudadas.

TABELA 9 Propriedades mecânicas das madeiras dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*, em função da posição radial de amostragem no interior do caule.

| Clone | Posição | VM01 | MN463 |
|------------------------|---------------|-------|-------|
| MOE _c (MPa) | Externa | 9514 | 8861 |
| | Intermediária | 7536 | 8205 |
| | Central | 6665 | 6828 |
| RC (MPa) | Externa | 59 | 58 |
| | Intermediária | 49 | 53 |
| | Central | 46 | 45 |
| MOE _f (MPa) | Externa | 17320 | 17749 |
| | Intermediária | 18243 | 15406 |
| | Central | 10964 | 12744 |
| MOR (MPa) | Externa | 114 | 103 |
| | Intermediária | 108 | 94 |
| | Central | 81 | 75 |

MOE_c: módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras; RC: resistência à compressão paralela às fibras; MOE_f: módulo de elasticidade à flexão estática; MOR: módulo de ruptura.

5.2 Propriedades mecânicas do carvão dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*

Na Tabela 10 estão apresentados o resumo da análise de variância do efeito de clone, a temperatura e a posição de amostragem nas características mecânicas do carvão.

TABELA 10 Resumo da análise variância para as características mecânicas do carvão de clones de *Eucalyptus*.

| | Fonte variação | GL | QM | F | |
|-------------|-----------------------|-------------------|-------|----------|----------|
| Propriedade | MOE _{ccar} | Clone | 1 | 108548 | 1,97NS |
| | | Posição | 2 | 225689 | 4,09* |
| | | Temperatura | 2 | 1808815 | 32,72** |
| | | Clone * Temp | 2 | 54256 | 0,98 NS |
| | | Clone * Pos | 2 | 42904 | 0,78 NS |
| | | Temp*Pos | 4 | 56109 | 1,02 NS |
| | | Clone*Temp*Pos | 4 | 136013 | 2,46 NS |
| | | Erro | 119 | 55232 | |
| | | RC _{car} | Clone | 1 | 89 |
| | Posição | | 2 | 36381 | 5,38** |
| | Temperatura | | 2 | 208728 | 30,84** |
| | Clone * Temp | | 2 | 12900 | 1,91 NS |
| | Clone * Pos | | 2 | 11000 | 1,63 NS |
| | Temp*Pos | | 4 | 5432 | 0,80 NS |
| | Clone*Temp*Pos | | 4 | 3443 | 0,51 NS |
| | Erro | | 119 | 6767 | |
| | MOE _{f-BING} | | Clone | 1 | 23074 |
| | | Posição | 2 | 2077433 | 2,24 NS |
| | | Temperatura | 2 | 99532247 | 107,51** |
| | | Clone * Temp | 2 | 430079 | 0,46 NS |
| | | Clone * Pos | 2 | 223639 | 0,24 NS |
| | | Temp*Pos | 4 | 1004109 | 1,08 NS |
| | | Clone*Temp*Pos | 4 | 844136 | 0,91 NS |
| | | Erro | 119 | 925758 | |

MOE_{ccar}: módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras da carvão; RC_{car}: resistência à compressão paralela às fibras do carvão; MOE_{f-BING} módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão. NS: não significativo; * significativos, a 5% de probabilidade; ** significativo, a 1% de probabilidade.

De acordo com a análise de variância (Tabela 10), o efeito do clone para as propriedades do carvão vegetal não foi significativo. Entretanto, houve significância nos efeitos de posição e temperatura.

É importante ressaltar que os clones estudados são destinados a um mesmo fim, carvão vegetal. Isso faz com que as propriedades da madeira desses dois clones sejam semelhantes e, neste caso, as propriedades do carvão podem ser influenciadas por outros fatores que não a madeira proveniente dos clones.

Por essa razão, provavelmente, não houve influência do clone nas propriedades do carvão, como foi detectado pela análise de variância apresentada na Tabela 10.

Na Figura 14 mostram-se as características mecânicas do carvão, obtidas por meio de teste destrutivo. Observa-se que o clone VM01 apresenta maiores valores médios de módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras e de resistência à compressão paralela às fibras. A diferença entre um clone e outro foi de 10%, para as duas características avaliadas. Essa tendência do clone VM01 pode ser explicada em função da madeira que originou o carvão. O clone VM01 apresenta densidade maior que o clone MN463 e, talvez por essa razão, resultou em um carvão mais resistente.

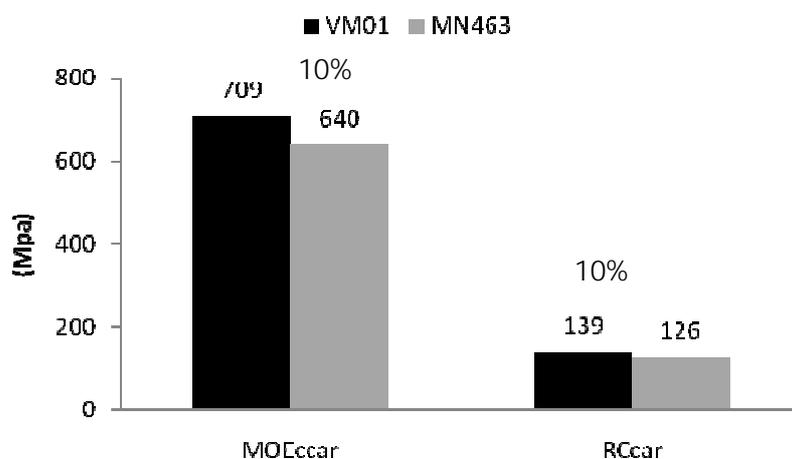


FIGURA 14 Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras e resistência à compressão paralela às fibras do carvão dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*.

5.2.1 Variação radial das propriedades mecânicas do carvão dos clones VM01 e MN463

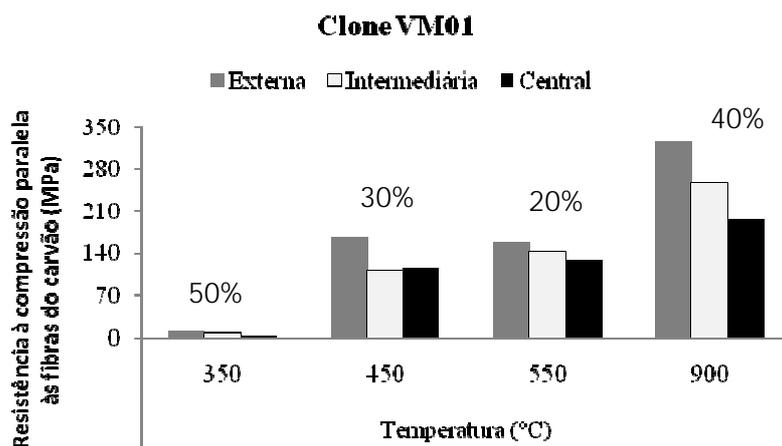


FIGURA 15 Resistência à compressão paralela às fibras do carvão do clone VM01 de *Eucalyptus* em diferentes posições de amostragem, em função da temperatura de carbonização.

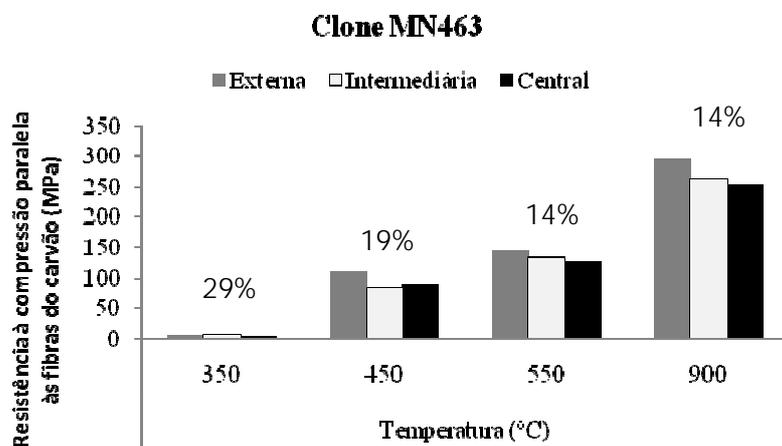


FIGURA 16 Resistência à compressão paralela às fibras do carvão do clone MN463 de *Eucalyptus* em diferentes posições de amostragem, em função da temperatura de carbonização.

Nas Figuras 15 e 16 mostra-se a tendência das médias de resistência à compressão paralela às fibras nas diferentes posições de amostragem. Observa-se que a resistência à compressão aumenta do centro para a periferia. Ocorrem exceções, como na temperatura de 450°C, para os dois clones e na temperatura de 550°C para o clone VM01. No entanto, essa diferença é muito baixa. Outro fato que pode ser observado é a magnitude dessas diferenças entre o centro e a periferia que, em média, é maior para o clone VM01 do que para o clone MN463. É importante ressaltar que o aumento da resistência à compressão do centro para a periferia apresenta semelhanças à tendência encontrada neste trabalho para a madeira e também, como já referenciado, em trabalhos realizados com madeira, desenvolvidos por Lima (1999) e Cruz et al. (2003).

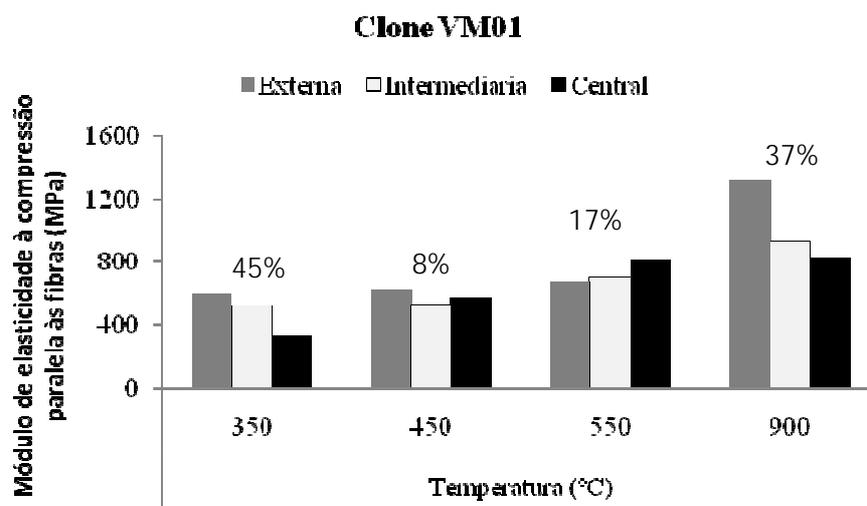


FIGURA 17 Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão do clone VM01 de *Eucalyptus* em diferentes posições de amostragem, em função da temperatura de carbonização.

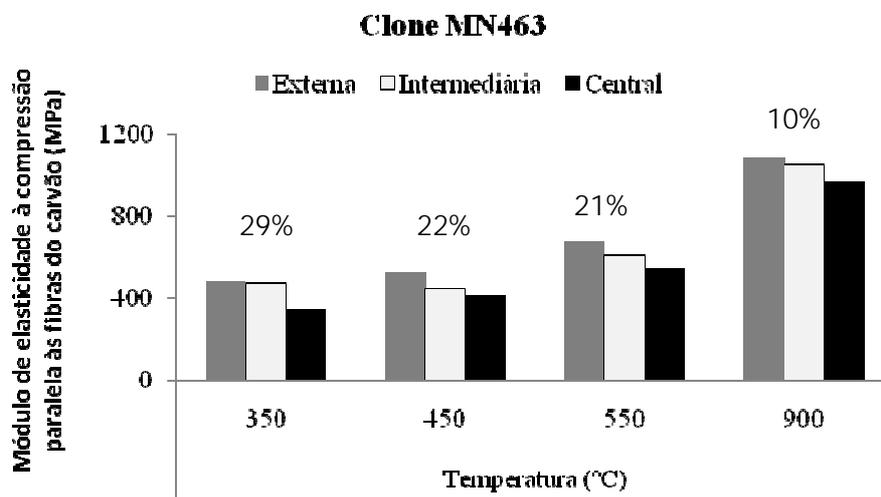


FIGURA 18 Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão do clone MN463 de *Eucalyptus* em diferentes posições de amostragem, em função da temperatura de carbonização.

Nas Figuras 17 e 18 estão apresentadas as tendências do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras nas diferentes posições de amostragem, em função das temperaturas de carbonização. Nelas observa-se que a posição que apresenta maiores médias de módulo de elasticidade foi a externa e a menor, a interna, sendo crescente do centro para a periferia. Foram identificadas duas exceções do clone VM01 disposto na Figura 16, a 450°C, em que a posição intermediária foi ligeiramente maior que a posição interna e a 550°C, em que a tendência de crescimento do centro para a periferia foi invertida. Em média, a diferença do centro para a periferia dessa propriedade foi de 27% para o clone VM01 e de 21% para o clone MN463. Também para essa propriedade é importante ressaltar que as tendências encontradas para o carvão seguem as encontradas para a madeira neste estudo.

Na Tabela 11 são apresentados os valores médios das propriedades mecânicas do carvão, levando em conta as posições radiais estudadas.

Embora o carvão seja um material diferente, nos resultados de resistência mecânica pode-se observar que ocorre a mesma tendência observada para madeira.

TABELA 11 Propriedades mecânicas do carvão dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*, em função das temperaturas de carbonização e da posição radial de amostragem no caule.

| Propriedade | Posição | Clone | | | | | | | |
|------------------------------|---------------|------------------|-----|-----|------|------------------|-----|-----|------|
| | | VM01 | | | | MN463 | | | |
| | | Temperatura (°C) | | | | Temperatura (°C) | | | |
| | | 350 | 450 | 550 | 900 | 350 | 450 | 550 | 900 |
| MOE _{ccar} (MPa) | Externa | 604 | 624 | 672 | 1315 | 483 | 527 | 690 | 1079 |
| | Intermediária | 517 | 530 | 703 | 927 | 475 | 449 | 605 | 1046 |
| | Central | 332 | 577 | 813 | 829 | 342 | 410 | 544 | 964 |
| RC _{car} (MPa) | Externa | 10 | 167 | 159 | 325 | 7 | 110 | 146 | 296 |
| | Intermediária | 7 | 113 | 142 | 255 | 7 | 84 | 133 | 263 |
| | Central | 5 | 117 | 128 | 195 | 5 | 89 | 126 | 254 |

MOE_{ccar}: módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras da carvão; RC_{car}: resistência à compressão paralela às fibras do carvão.

5.2.2 Variação das propriedades mecânicas do carvão dos clones VM01 e MN463 com o aumento da temperatura

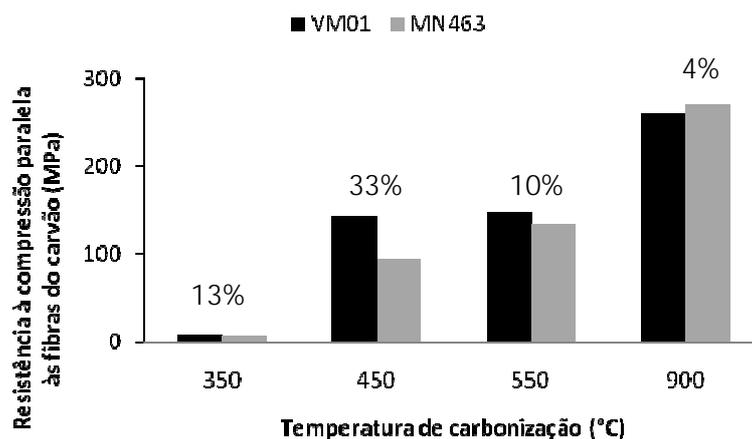


FIGURA 19 Resistência à compressão paralela às fibras do carvão dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*, em função da temperatura de carbonização.

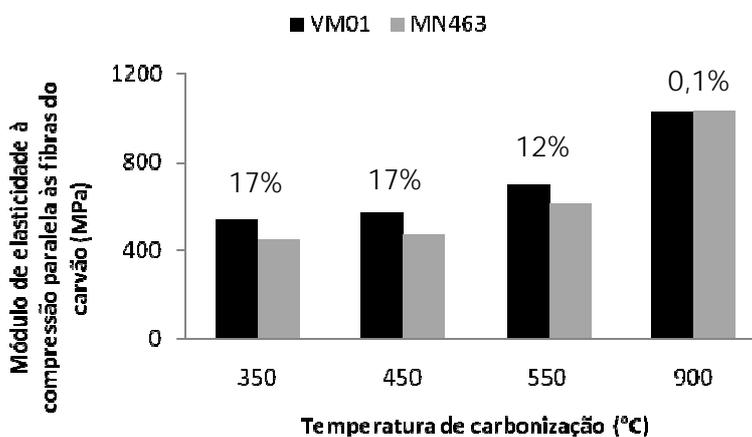


FIGURA 20 Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*, em função da temperatura de carbonização.

Nas Figuras 19 e 20 observa-se a tendência do aumento das características mecânicas do carvão com o incremento da temperatura de carbonização. Pode-se observar também que o clone VM01 apresenta maiores médias das características mecânicas até a temperatura de 550°C, depois ocorrendo uma inversão em relação de ordem favorável ao clone MN463. O clone VM01 apresentou aumento de 48% no módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras no aumento de 350°C para 900°C e o clone MN463 apresentou aumento de 57%. Já para a resistência à compressão, o aumento apresentado pelos clones VM01 e MN463 foi de 97%.

É importante ressaltar, nos dados observados, que há uma tendência de diminuição da diferença entre os clones com o aumento da temperatura. Provavelmente, o carvão produzido em temperaturas mais altas, como 900°C, apresenta características bastante homogêneas, distanciando-se, assim, da heterogeneidade da madeira.

O aumento da propriedade mecânica em função da temperatura pode ser explicado pelo rearranjo molecular do carvão com o aumento da temperatura, como relatado por Blankenhorn et al. (1972, 1973). Esse comportamento das propriedades mecânicas do carvão em função da temperatura foi observado também por experimentos exploratórios feitos por Mendes et al. (1982). As razões dessa influência foram explicadas por Blankenhorn et al. (1972, 1973), quando comentam sobre a formação de ligações cruzadas entre o grafite como material e da orientação da massa de fibrilas com o aumento da temperatura.

Na Tabela 12 são apresentados os valores médios das propriedades mecânicas do carvão nas diferentes temperaturas de carbonização: 350°C, 450°C, 550°C e 900°C.

TABELA 12 Propriedades mecânicas do carvão dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*, em função das temperaturas de carbonização.

| Clone | | VM01 | MN463 |
|------------------|---------------------|------|-------|
| Temperatura (°C) | Propriedade | MPa | MPa |
| 350 | MOE _{ccar} | 538 | 447 |
| | RC _{car} | 8 | 7 |
| 450 | MOE _{ccar} | 571 | 475 |
| | RC _{car} | 142 | 95 |
| 550 | MOE _{ccar} | 699 | 610 |
| | RC _{car} | 148 | 133 |
| 900 | MOE _{ccar} | 1026 | 1028 |
| | RC _{car} | 259 | 270 |

MOE_{ccar}: módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras da carvão; RC_{car}: resistência à compressão paralela às fibras do carvão.

TABELA 13 Resumo da análise de regressão das propriedades mecânicas do carvão de clones de *Eucalyptus*, em função da temperatura de carbonização.

| | | Coefficiente | Erro padrão (MPa) | Valor de t | R ² |
|--------------------|-----------|--------------|-------------------|------------|----------------|
| MOE _{car} | β_0 | 0,37 | 74,65 | 0,00 | 0,42** |
| | β_1 | 1,15 | 0,11 | 10,02 | |
| RC _{car} | β_0 | -51,33 | 25,76 | 8,25 | 0,38** |
| | β_1 | 0,36 | 0,04 | -4,93 | |

MOE_{ccar}: módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão; RC_{car}: resistência à compressão paralela às fibras do carvão. ** Significativo a 5% de probabilidade.

Para a estimativa da resistência à compressão paralela às fibras do carvão e do o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão do carvão de clones de *Eucalyptus*, em função da temperatura, foram ajustadas as equações lineares que estão apresentadas na Tabela 13 e nas Figuras 21 e 22, respectivamente.

Pode ser observado que a resistência média do carvão, a 450°C, é menor que a 900°C. Esse comportamento também foi observado por Blankernhorn et al. (1973). Segundo esses autores, os comportamentos se devem à formação de

ligações cruzadas e à orientação das fibrilas pela perda de hidrogênio acima de 500°C.

A análise de variância mostra a influência da temperatura nas propriedades mecânicas do carvão (Tabela 10). Isso pode ser observado também nas Figuras 21 e 22, nas quais são apresentadas as propriedades mecânicas do carvão, em função da temperatura.

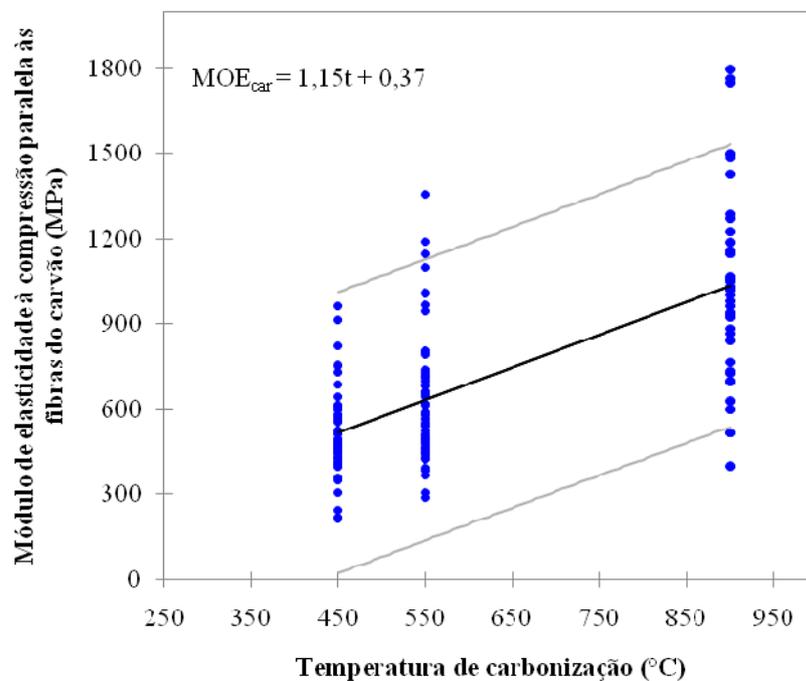


FIGURA 21 Modelo ajustado do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão de clones de *Eucalyptus* obtido por ensaios destrutivos, em função da temperatura.

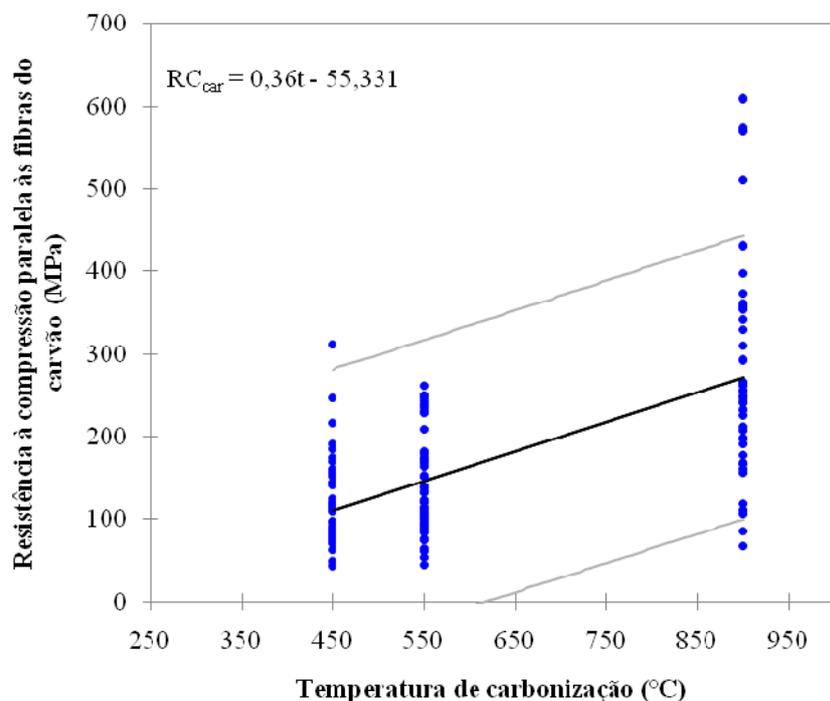


FIGURA 22 Modelo ajustado da resistência à compressão paralela às fibras do carvão de clones de *Eucalyptus* obtida por ensaios destrutivos, em função da temperatura.

TABELA 14 Variação das características mecânicas do carvão de clones de *Eucalyptus* por grau centígrado produzido na faixa de 450°C a 900°C.

| Característica | Varição %/°C |
|--|--------------|
| Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras | 0,22 |
| Resistência à compressão paralela às fibras | 0,33 |

Pelos dados da Tabela 14 observa-se que, para cada grau centígrado, entre 450°C e 900°C, ocorre uma variação de 0,22% no módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras e 0,33% na resistência à compressão paralela às fibras.

Na Tabela 15 apresenta-se a tendência de comportamento do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras e da resistência à compressão paralela às fibras do carvão, para os clones VM01 e MN463, nas diferentes temperaturas de carbonização.

TABELA 15 Matriz das tendências das propriedades mecânicas do carvão vegetal em diferentes posições de amostragem, em função das temperaturas de carbonização.

| Clone | Propriedade | Temperatura (°C) | | | | | | | | | | | |
|-------|---------------------|------------------|---|---|-----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|
| | | 350 | | | 450 | | | 550 | | | 900 | | |
| | | E | I | C | E | I | C | E | I | C | E | I | C |
| VM01 | MOE _{ccar} | | | | | | | | | | | | |
| | RC _{car} | | | | | | | | | | | | |
| MN463 | MOE _{ccar} | | | | | | | | | | | | |
| | RC _{car} | | | | | | | | | | | | |

MOE_{ccar}: módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão; RC_{car}: resistência à compressão paralela às fibras do carvão; E- externo; I- intermediário; C-central.

Na Tabela 15 pode-se verificar que o comportamento na maioria dos casos, independente do clone, é de um aumento do valor das características mecânicas do centro para a periferia. Uma das exceções é para o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão do clone VM01 na temperatura de 550°C, que apresenta inversão da tendência. Esse comportamento predominante pode ser influenciado pelas características físico-químicas da madeira que deram origem aos respectivos carvões e acompanha também a tendência das características mecânicas da madeira que apresenta, neste estudo, o mesmo comportamento. Quando se considera a madeira, é

possível apresentar diversos trabalhos que confirmam esse comportamento, como o de Lima (1999) e o de Cruz et al. (2003). Entretanto, quando se considera o carvão vegetal, os raros estudos existentes sobre esse assunto não contemplam tal informação.

5.3 Relação entre as propriedades da madeira e do carvão

Na avaliação da relação existente entre as características mecânicas da madeira e do carvão foi produzida a matriz de correlação de Pearson. Os valores de correlação estão apresentados na Tabela 16.

TABELA 16 Matriz de correlação de Pearson entre as características mecânicas do carvão de clones de *Eucalyptus* e as características mecânicas da madeira de origem.

| Temperatura | Material | Característica | Carvão | | Madeira | | |
|-------------|----------|-------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------|---------------|
| | | | MOE _{ccar} (MPa) | RC _{car} (Mpa) | MOE _f (Mpa) | MOR (MPa) | MOEc (Mpa) |
| 350°C | Carvão | RC _{car} (Mpa) | 0,831 | | | | |
| | | MOE _f (Mpa) | 0,297 | 0,319 | | | |
| | Madeira | MOR (MPa) | 0,448 | 0,279 | 0,776 | | |
| | | MOEc (Mpa) | 0,197 | 0,138 | 0,462 | 0,623 | |
| | | RC (MPa) | 0,204 | 0,139 | 0,501 | 0,646 | 0,936 |
| 450°C | Carvão | RC _{car} (Mpa) | 0,847 | | | | |
| | | MOE _f (Mpa) | 0,217 | 0,173 | | | |
| | Madeira | MOR (MPa) | 0,238 | 0,345 | 0,809 | | |
| | | MOEc (Mpa) | 0,012 | 0,119 | 0,461 | 0,611 | |
| | | RC (MPa) | 0,007 | 0,118 | 0,513 | 0,643 | 0,930 |
| 550°C | Carvão | RC _{car} (Mpa) | 0,846 | | | | |
| | | MOE _f (Mpa) | 0,173 | 0,144 | | | |
| | Madeira | MOR (MPa) | 0,357 | 0,290 | 0,808 | | |
| | | MOEc (Mpa) | 0,073 | 0,008 | 0,502 | 0,619 | |
| | | RC (MPa) | 0,036 | -0,011 | 0,549 | 0,661 | 0,931 |
| 900°C | Carvão | RC _{car} (Mpa) | 0,741 | | | | |
| | | MOE _f (Mpa) | 0,192 | 0,322 | | | |
| | Madeira | MOR (MPa) | 0,056 | 0,238 | 0,704 | | |
| | | MOEc (Mpa) | 0,357 | 0,476 | 0,420 | 0,752 | |
| | | RC (MPa) | 0,474 | 0,539 | 0,256 | 0,565 | 0,923 |

MOE_{ccar}: módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão; RC_{car}: resistência à compressão paralela às fibras do carvão; MOE_f: módulo de elasticidade à flexão estática; MOR: módulo de ruptura da madeira; MOEc: módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras da madeira e RC: resistência à compressão paralela às fibras da madeira.

Na Tabela 16 são apresentados os valores de correlação de Pearson. Observa-se que, em geral, as correlações entre as propriedades da madeira e do carvão foram baixas, variando de -0,011 a 0,539. As temperaturas que apresentaram os maiores coeficientes de correlação foram 350°C e 900°C, sendo 0,448 o valor de correlação entre o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão e o módulo de ruptura da madeira para 350°C e, para 900°C, o valor de correlação foi 0,539 entre as características de resistência à compressão paralela às fibras do carvão e resistência à compressão paralela da madeira. Foi observado, na temperatura de 900°C, que ocorre um maior número de características que apresentam correlações maiores em comparação obtidas nas demais temperaturas. Esse fato pode induzir a uma reflexão que não se correlaciona ao carvão vegetal de fato e, sim, a um produto que foi tratado a 900°C.

5.4 Avaliação não destrutiva das propriedades mecânicas do carvão dos clones VM01 e MN463

Neste item serão apresentados os resultados que se referem à característica mecânica obtida por meio de ensaios não destrutivos e suas relações com as outras características mecânicas do carvão.

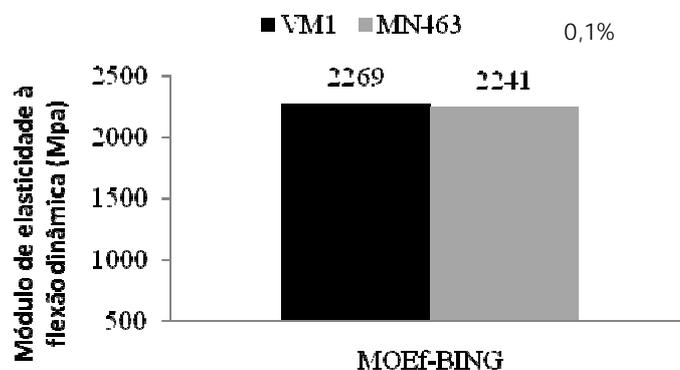


FIGURA 23 Módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*.

Na Figura 23 são mostrados os valores médios do módulo de elasticidade à flexão dinâmica dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*. Observa-se que não houve diferenças entre os clones para esta característica. Possivelmente, isso se deve à grande variação do valor do módulo entre as temperaturas. O clone VM01 foi ligeiramente superior, quando se observa o valor absoluto, ao clone MN463. Este fato pode estar sendo influenciado pela densidade da madeira que originou os respectivos carvões, tendo em vista a maior densidade do clone VM01.

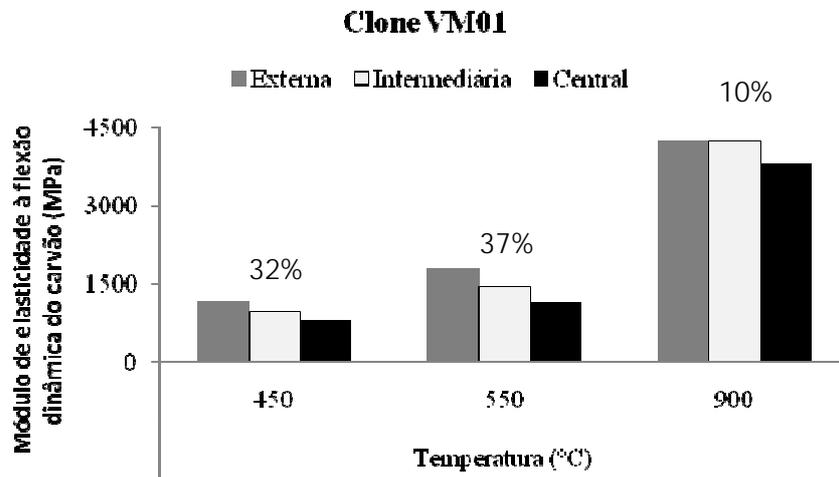


FIGURA 24 Módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão do clone VM01 de *Eucalyptus* em diferentes posições de amostragem, em função da temperatura de carbonização.

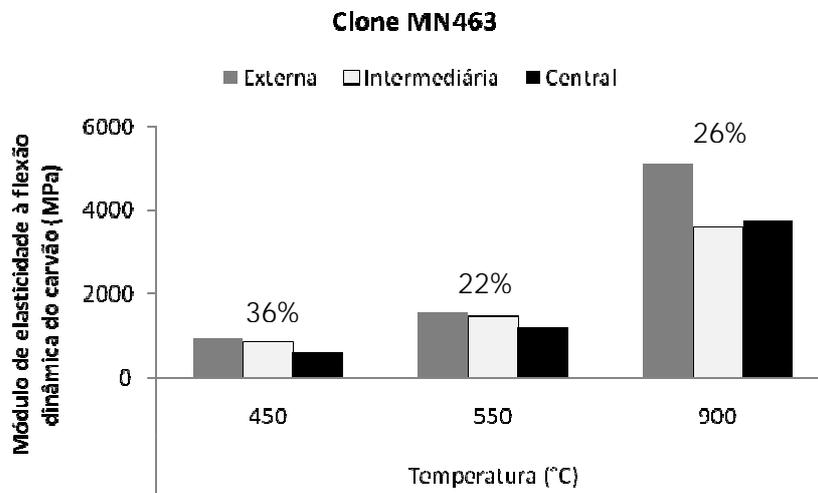


FIGURA 25 Módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão do clone MN463 de *Eucalyptus* em diferentes posições de amostragem, em função da temperatura de carbonização.

Nas Figuras 24 e 25 estão apresentadas as tendências do módulo de elasticidade à flexão dinâmica nas diferentes posições de amostragem. Observa-se que a periferia apresenta maiores médias de módulo de elasticidade, independente dos clones avaliados. Essa tendência foi também encontrada para as madeiras avaliadas neste estudo e também em trabalhos desenvolvidos por Cruz et al. (2003), com madeiras de clones de *Eucalyptus*, que encontraram um aumento das propriedades mecânicas do centro para a periferia. Lima (1999) também encontrou esse comportamento estudando 26 clones de *Eucalyptus*.

Na Tabela 17 são apresentados os valores de módulos de elasticidade à flexão dinâmica para os clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*.

TABELA 17 Módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*, em função das temperaturas de carbonização e posição radial de amostragem no caule.

| Propriedade | Posição | Clone | | | | | |
|-------------------------------|---------------|------------------|------|------|------------------|------|------|
| | | VM01 | | | MN463 | | |
| | | Temperatura (°C) | | | Temperatura (°C) | | |
| | | 450 | 550 | 900 | 450 | 550 | 900 |
| MOE _{fBING} (MPa) | Externa | 1164 | 1804 | 4262 | 940 | 1554 | 5086 |
| | Intermediária | 967 | 1447 | 4249 | 831 | 1449 | 3589 |
| | Central | 789 | 1139 | 3823 | 603 | 1220 | 3749 |

MOE_{fBING} módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão

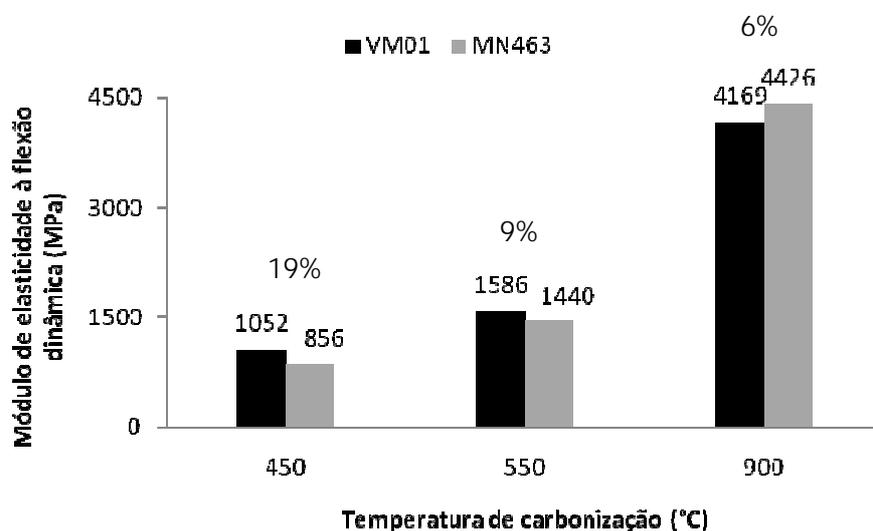


FIGURA 26 Módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*, em função da temperatura de carbonização.

Verificando o comportamento dos clones VM01 e MN463 nas diferentes temperaturas de carbonização, na Figura 26 observa-se que há uma diferença entre eles. A 450°C, o módulo de elasticidade à flexão dinâmica do clone VM01 é 19% maior que no clone MN463; a 550°C, é 9% maior e, a 900°C, a tendência de o clone VM01 ser maior se inverte. O clone MN463 se torna 6% maior que o clone VM01. Uma tendência observada para as outras propriedades do carvão dos clones com o aumento da temperatura de carbonização.

Na Tabela 18 são apresentados os valores médios de módulo de elasticidade à flexão dinâmica para os clones VM01 e MN463.

TABELA 18 Módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*, em função das temperaturas de carbonização.

| Temperatura (°C) | Propriedade | Clone | |
|------------------|-----------------------|-------|-------|
| | | VM01 | MN463 |
| | | MPa | MPa |
| 450 | MOE _{F-BING} | 1052 | 856 |
| 550 | | 1586 | 1440 |
| 900 | | 4169 | 4426 |

MOE_{F-BING} módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão.

TABELA 19 Resumo da análise de regressão do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão de clones de *Eucalyptus*, em função da temperatura de carbonização.

| | | Coefficiente | Erro padrão (MPa) | Valor de t | R ² |
|-----------------------|-----------|--------------|-------------------|------------|----------------|
| MOE _{F-BING} | β_0 | -2621,44 | 287,07 | -9,13 | 0,69** |
| | β_1 | 7,59 | 0,44 | 17,20 | |

MOE_{F-BING}: módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão. ** Significativo a 5% de probabilidade.

Para a estimativa do módulo de elasticidade à flexão do carvão do carvão de clones de *Eucalyptus*, em função da temperatura, foi ajustada uma equação linear que está apresentada na Tabela 19. Para o módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão, o ajuste gráfico está representado na Figura 27.

Como se pode observar, a resistência média do carvão, a 450°C, é menor que a 900°C. Esses comportamentos também foram observados por Blankernhorn et al. (1973).

A análise de variância mostra influência da temperatura nas propriedades mecânicas do carvão (Tabela 10). Isso pode ser observado também na Figura 27, na qual está apresentado o módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão, em função da temperatura.

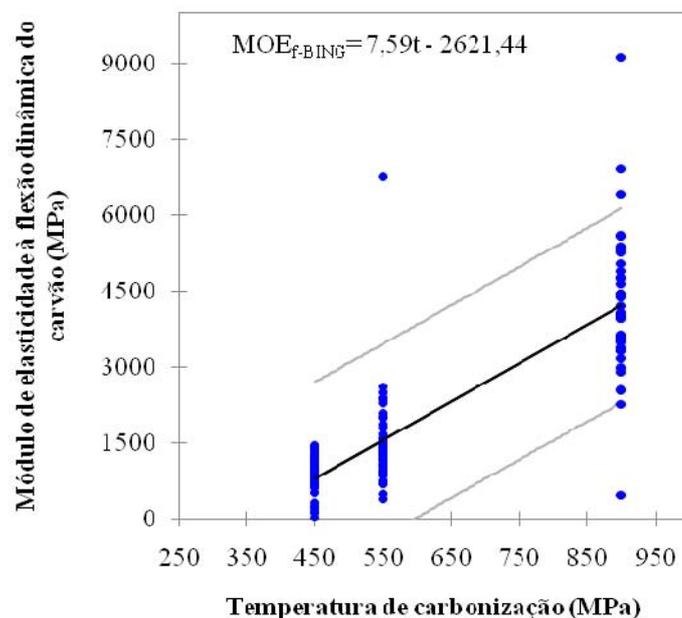


FIGURA 27 Modelo ajustado do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão obtido por ensaio não destrutivo, em função da temperatura.

TABELA 20 Variação das características mecânicas do carvão de clones de *Eucalyptus* por grau centígrado produzido na faixa de 450°C a 900°C.

| Característica | Variação %/°C |
|--|---------------|
| Módulo de elasticidade à flexão dinâmica | 0,96 |

Pelos dados da Tabela 20 observa-se que, para cada grau centígrado, entre 450° e 900° ocorre o ganho de 0,96% de aumento no módulo de elasticidade em flexão dinâmica. Comparando com as demais variações apresentadas na Tabela 14 é possível, então, deduzir que a propriedade mais afetada pelo aumento da temperatura é o módulo de elasticidade à flexão dinâmica.

TABELA 21 Resumo da análise de regressão linear do módulo de elasticidade do carvão de clones de *Eucalyptus* obtido pelo método destrutivo, em função do módulo de elasticidade obtido por meio de ensaio não-destrutivo.

| | | Coefficiente | Erro padrão (MPa) | Valor de t | R ² |
|-------|-----------|--------------|-------------------|------------|----------------|
| VM01 | β_0 | 462,37 | 59,14 | 7,81 | 0,45** |
| | β_1 | 0,14 | 0,02 | 6,87 | |
| MN463 | β_0 | 437,94 | 39,32 | 11,13 | 0,42** |
| | β_1 | 0,11 | 0,015 | 7,46 | |

** Significativo, a 5% de probabilidade.

Para a estimativa do módulo de elasticidade do carvão de clones de *Eucalyptus* em função do módulo obtido pelo método destrutivo foram ajustados os modelos de regressão que estão apresentados na Tabela 21. Para o clone MN463, a representação gráfica dessa relação encontra-se na Figura 28 e a distribuição dos resíduos, na Figura 29. Para o clone VM01, o ajuste gráfico e a distribuição dos resíduos estão representados nas Figuras 30 e 31, respectivamente.

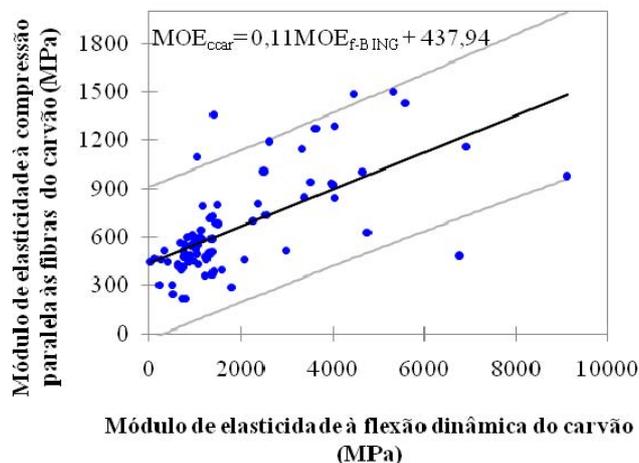


FIGURA 28 Ajuste do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão do clone de *Eucalyptus* MN463, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão vegetal obtido no ensaio não-destrutivo.

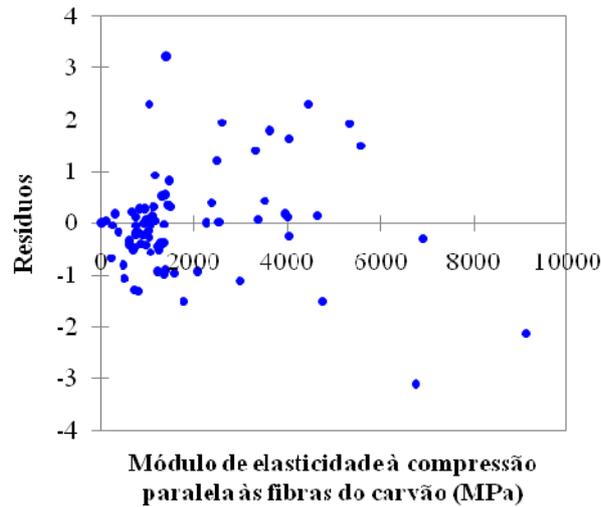


FIGURA 29 Distribuição dos resíduos do ajuste da regressão entre o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras, obtido pelo método destrutivo, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão obtido pelo método não-destrutivo do clone MN463 de *Eucalyptus*.

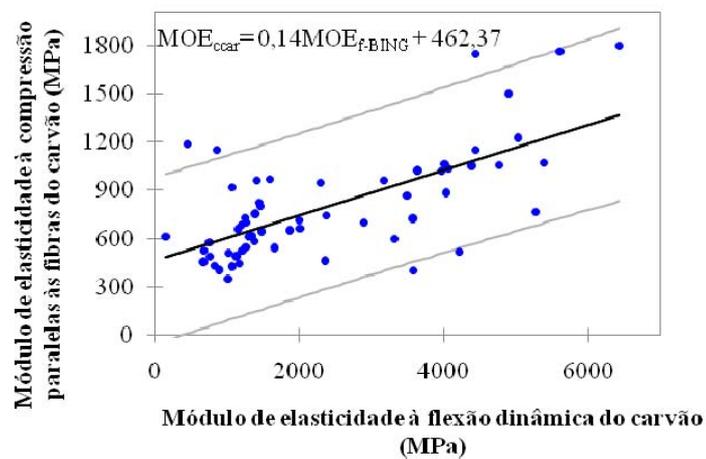
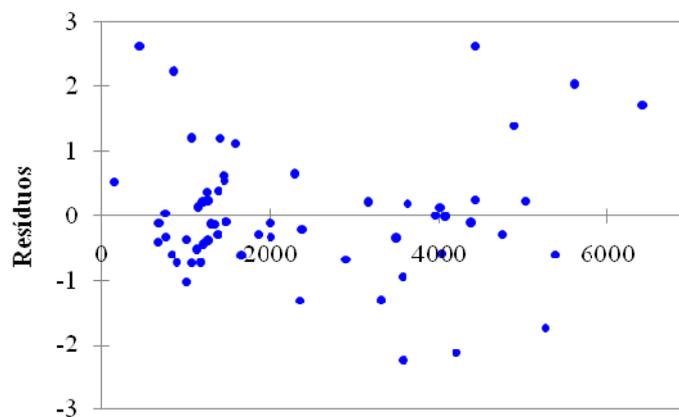


FIGURA 30 Ajuste do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão do clone VM01, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão obtido no ensaio não-destrutivo.



Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão (MPa)

FIGURA 31 Distribuição dos resíduos do ajuste da regressão entre o módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão obtido pelo método destrutivo, em função do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão obtido pelo método não-destrutivo do clone VM01.

TABELA 22 Resumo da análise de regressão linear entre a resistência à compressão paralela às fibras obtida por ensaio destrutivo e o módulo de elasticidade obtido por meio de ensaio não destrutivo.

| | | Coefficiente | Erro padrão (MPa) | Valor de t | R ² |
|-------|-----------|--------------|-------------------|------------|----------------|
| VM01 | β_0 | 97,56 | 19,900 | 4,90 | 0,37** |
| | β_1 | 0,04 | 0,007 | 5,82 | |
| MN463 | β_0 | 77,67 | 13,570 | 5,72 | 0,45** |
| | β_1 | 0,04 | 0,005 | 7,81 | |

** Significativo, a 5% de probabilidade.

Para a estimativa da resistência à compressão paralela às fibras do carvão de clones de *Eucalyptus*, em função do módulo obtido pelo método não-destrutivo foram ajustadas equações lineares que estão apresentadas na Tabela 22. Para o clone MN463, a representação gráfica dessa relação é apresentada na Figura 32 e a distribuição dos resíduos encontra-se na Figura 33. Para o clone VM01, o ajuste gráfico e a distribuição dos resíduos estão representados nas Figuras 34 e 35, respectivamente.

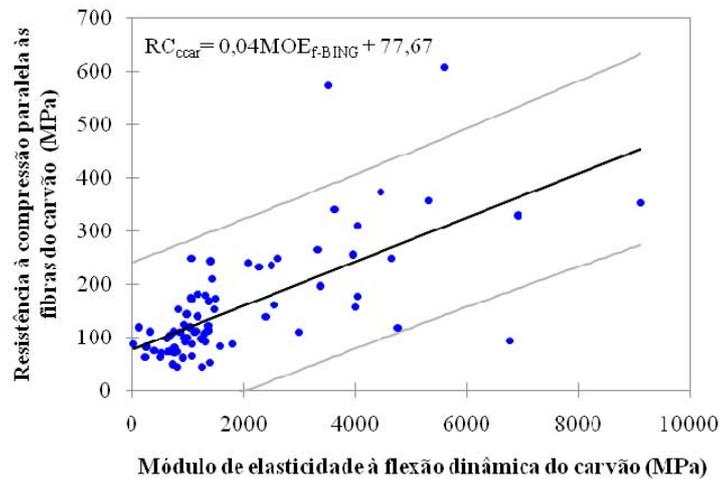


FIGURA 32 Ajuste da resistência à compressão paralela às fibras do carvão do clone de *Eucalyptus* MN463, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão vegetal obtido no ensaio não destrutivo.

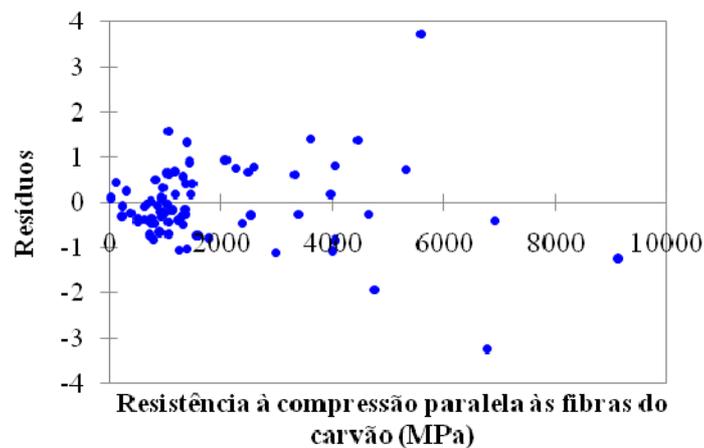


FIGURA 33 Distribuição dos resíduos do ajuste da regressão entre o módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão do clone MN463 de *Eucalyptus* obtido pelo método destrutivo, em função da resistência à compressão paralela às fibras do carvão obtido pelo método não destrutivo.

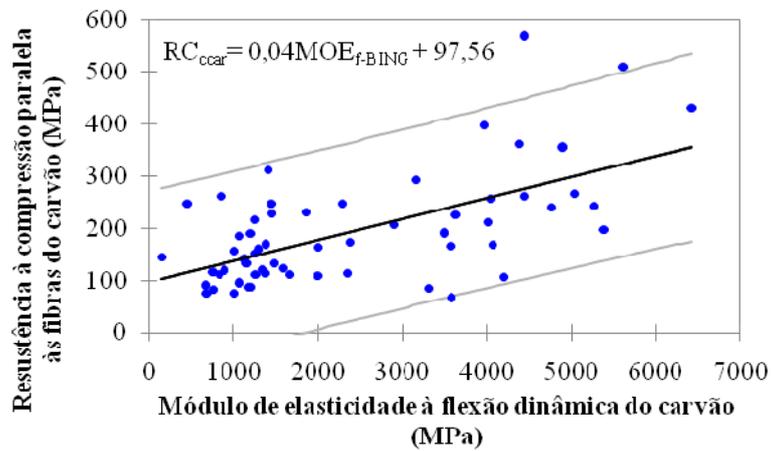


FIGURA 34 Ajuste da resistência à compressão paralela às fibras do carvão do clone de *Eucalyptus* VM01, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão vegetal obtido no ensaio não-destrutivo.

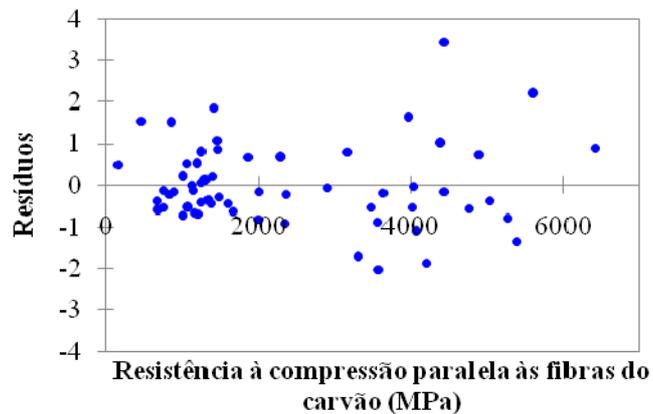


FIGURA 35 Distribuição dos resíduos do ajuste da regressão entre o módulo de elasticidade à flexão dinâmica obtido pelo método destrutivo, em função da resistência à compressão paralela às fibras obtida pelo método não destrutivo do carvão do clone VM01 de *Eucalyptus*.

Não sendo significativo o efeito dos clones, foi ajustado um modelo para estimar cada uma das propriedades estudadas, considerando os dois clones agrupados.

TABELA 23 Resumo da análise de regressão linear do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras e a resistência à compressão às fibras obtidas por ensaios destrutivos, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica obtida por meio de ensaio não destrutivo.

| | | Coefficiente | Erro Padrão (MPa) | Valor de t | |
|--------------------|-----------|--------------|----------------------|------------|--------|
| MOE _{car} | β_0 | 446,41 | 33,39 | 13,37 | 0,45** |
| | β_1 | 0,13 | 0,01 | 10,40 | |
| RC _{car} | β_0 | 84,42 | 11,25 | 7,51 | 0,42** |
| | β_1 | 0,04 | 0,00 | 10,02 | |

MOE_{car}: módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão; RC_{car}: resistência à compressão paralela às fibras do carvão. ** Significativa a 5% de probabilidade.

Para a estimativa da resistência à compressão paralela às fibras do carvão e para o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras de clones de *Eucalyptus*, em função do módulo obtido pelo método não-destrutivo, foram ajustados os modelos de regressão apresentados na Tabela 23. Para o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras, a representação gráfica está apresentada na Figura 36 e a distribuição dos resíduos, na Figura 37. Para a resistência à compressão paralela às fibras, o ajuste gráfico e a distribuição dos resíduos estão representados nas Figuras 38 e 39, respectivamente.

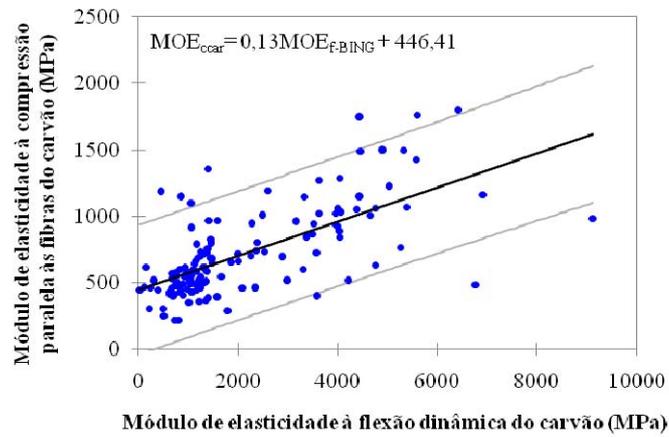


FIGURA 36 Ajuste do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão de clones de *Eucalyptus*, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão vegetal obtido no ensaio não-destrutivo.

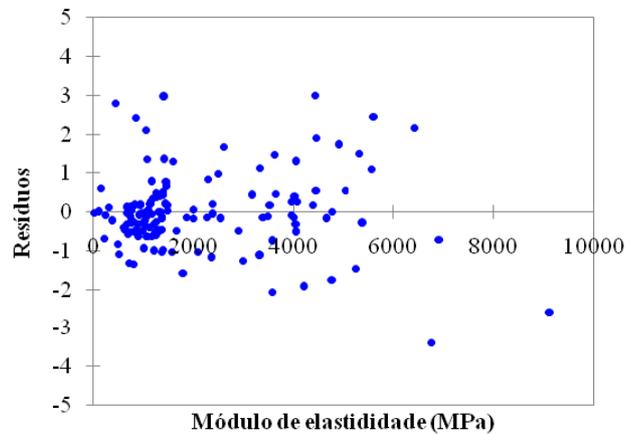


FIGURA 37 Distribuição dos resíduos do ajuste da regressão entre o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão obtido pelo método destrutivo, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão obtido pelo método não-destrutivo de clones de *Eucalyptus*.

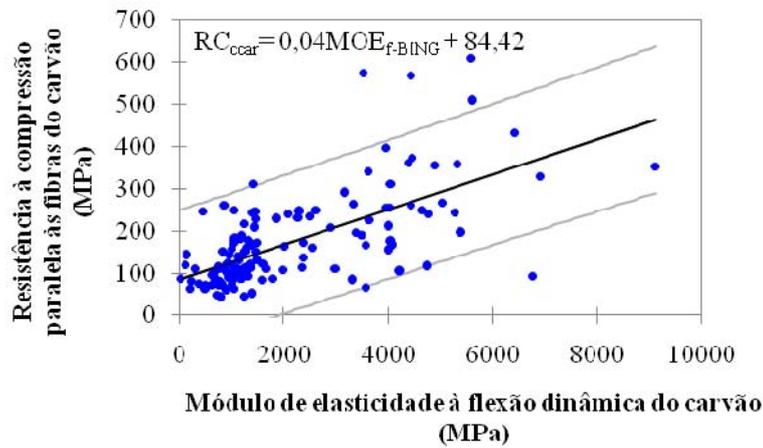


FIGURA 38 Ajuste da resistência à compressão paralela às fibras do carvão de clones de *Eucalyptus*, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão obtido no ensaio não-destrutivo.

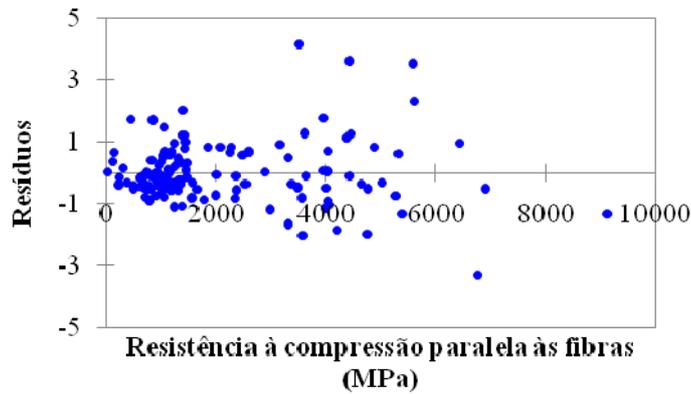


FIGURA 39 Distribuição dos resíduos do ajuste da regressão entre a resistência à compressão paralela às fibras do carvão obtido pelo método destrutivo, em função do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão obtido pelo método não-destrutivo de clones de *Eucalyptus*.

6 CONCLUSÕES

Com base nas interpretações dos resultados apresentados neste trabalho para madeira dos clones VM01 e MN463 de *Eucalyptus*, pode-se concluir que:

- as características mecânicas da madeira do clone VM01 apresentaram valores médios ligeiramente superiores aos do clone VM463;

- as características mecânicas do carvão aumentaram com o aumento da temperatura final de carbonização;

- a variação nas características mecânicas do carvão para cada 1°C de temperatura foram 0,22% para módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras, 0,33% para a resistência à compressão paralela às fibras e 0,96% para o módulo de elasticidade à flexão dinâmica;

- houve um aumento do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão no sentido medula-casca de 27% para o clone VM01 e de 21% no clone MN463;

- houve um aumento da resistência à compressão paralela às fibras do carvão no sentido medula-casca de 35% para o clone VM01 e de 19% no clone MN463;

- houve um aumento do módulo de elasticidade à flexão dinâmica do carvão no sentido medula-casca de 26% para o clone VM01 e de 28% no clone MN463;

- em geral, a posição externa do caule apresentou maior valor de propriedade mecânica do carvão, independente da temperatura e do clone utilizado;

- o clone VM01 apresentou o melhor comportamento mecânico para as temperaturas abaixo de 900°C e o clone MN463 para a temperatura de 900°C;

- os ajustes dos modelos de regressão das características mecânicas do carvão obtidas por ensaios destrutivos e não-destrutivos apresentaram coeficientes de determinação baixos;

- foi possível avaliar o carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* em diferentes temperaturas, por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O carvão é um material que mantém semelhanças estruturais com o seu precursor, a madeira, mas é completamente diferente. Foram identificadas algumas dificuldades no desenvolvimento do presente trabalho, que serão apresentadas para oferecer uma contribuição para trabalhos futuros.

É importante que a amostragem para estudos em mecânica do carvão seja bastante intensa, uma vez que a avaliação da qualidade das amostras é bastante dificultosa. Isso porque o carvão apresenta defeitos que não podem ser observados a olho nu. Esse fato aumenta bastante a variabilidade dos resultados obtidos.

É aconselhável desenvolver um novo método de obtenção de amostras de carvão vegetal, de modo a diminuir ainda mais os defeitos para que se possam evitar ao máximo as imperfeições presente no interior das amostras.

Outro fato que também reforça essa necessidade é o gasto com as ferramentas de corte utilizadas no trabalho, que pode inviabilizar uma amostragem mais intensa, uma vez que uma fita de serra para aço processou somente 16 amostras carbonizadas a 900°C de temperatura.

É importante fazer a avaliação da umidade em função do comportamento mecânico do carvão. Outro ponto importante é avaliar a influência do tempo de residência nas características mecânicas do carvão, uma vez que esse detalhe não foi contemplado neste estudo.

Uma consideração também importante é desenvolver um método destrutivo para quantificar o módulo de elasticidade dinâmica para calibrar ferramentas não destrutivas como o Bing.

Os planos de submissão de esforços são aqueles importados da madeira e talvez não seja o mais adequado para o carvão. Por isso, sugere-se criar novas notações para a caracterização desses planos no carvão vegetal.

Uma última recomendação seria a realização de vários testes junto com o fabricante do BING, de modo a ajustar uma melhor frequência para a temperatura estudada, uma vez que, com o aumento da temperatura, o carvão vai se alterando estruturalmente, modificando, assim, o modo de propagação das ondas sonoras até o receptor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, K.; SOFIA, J. **Após pressão, Lula e Agnelli selam acordo.** Disponível em: <<http://www.plataformabndes.org.br/index.php/en/noticias/38-materias/358-apos-pressao-lula-e-agnelli-selam-acordo>>. Acesso em: 3 out. 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards**: section 4, 04.10 wood. Philadelphia, 1995. 608p.
- ANDRADE, C.R. **Espectroscopia no infravermelho próximo para prever propriedades da madeira e do carvão de plantio clonal de *Eucalyptus* sp.** 2009. 107p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira)- Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- ASSIS, C.O.; TRUGILHO, P.F.; MENDES, L.M.; SILVA, J.R.M.; LIMA, J.T. Sistema alternativo para carbonização de madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.78, p.133-140, Jun. 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1983. Não paginado.
- ASSUMPÇÃO, R.M.V. Gaseificação de madeira e carvão: princípios e aplicações. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Gaseificação de madeira e carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1981. p.54-72.
- BALLARIN, A.W.; PALMA, H.A.L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.27, n.3, p.371-380, maio/jun. 2003.
- BEER, F.P.; JOHNSTON, E.R.; DEWOLF, J.T. **Resistência dos materiais**. 3.ed. São Paulo: Pearson, 2008. 1255p.
- BLANKESHORN, P.R.; JENKINS, G.M.; KLINE, D.E. Dynamic mechanical properties and microstructure of some carbonized hardwoods. **Wood and Fiber**, Lawrence, v.4, n.3, p.212-224, 1972.
- BLANKENHORN, P.R.; KLINE, D.E.; BEALL, F.C. Dynamic mechanical behavior of Black Cherry (*Prunus serotina* Ehrh). **Carbon**, Elmsford, v.11, n.4, p.603-611, 1973.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: V.N.Reinhold, 1982. 712p.

BRANCHERIAU, L.; BAILLERES, H. Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review. **Wood Science and Technology**, New York, v.36, n.5, p.347-365, Aug. 2002.

BRITTO, J.O. **Carvão vegetal no Brasil: gestões econômicas e ambientais**. Piracicaba: ESALQ, 1990. 75p. (Série Estudos Avançados, 4).

BROWN, H.P.; PANSIN, A.J.; FORSAITH, C.C. **Textbook of wood technology**. New York: McGraw-Hill Book, 1949. v.1, 652p.

BROWN, H.P.; PANSIN, A.J.; FORSAITH, C.C. **Textbook of wood technology**. New York: McGraw-Hill Book, 1952. v.2, 783p.

BROWNING, B.L. **The chemistry of wood**. New York: J.Wiley, 1963. 689p.

BUCUR, V. **Acoustic of wood**. Boca Raton: CRC, 1995. 284p.

BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154p.

CENTRE DE COOPERATION INTERNATIONALE EN RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT. Département Persyst. **BING®, système d'analyse de la qualité des bois**. Disponível em: <http://www.indexld.com/bing/description_detail_bing.htm>. Acesso em: 10 abr. 2007.

CRUZ, C.R.; LIMA, J.T.; MUNIZ, G.I.B. Variação dentro das árvores e entre clones das propriedades físicas e mecânicas da madeira de híbridos de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.64, p.33-47, dez. 2003.

DONALDSON, L.A. Variation in microfibril angle among three genetic group of *Pinus radiata* trees. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Wellington, v.23, n.1, p.90-100, Jan. 1993.

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

FREESE, F. **Statistics for land managers**. Edinburgh: Paeony, 1984. 215p.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Diagnóstico energético do setor independente de ferro gusa em Minas Gerais**. Belo Horizonte, 1988. v.2. Não paginado. Relatório técnico final.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Estudo da influência da temperatura de carbonização na resistência ao esmagamento e ao tamboramento do carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1976. v.1. Não paginado. Relatório técnico.

GREEN, D.W.; WINANDY, J.E.; KRETSCHMANN, D.E. Mechanical properties of wood. In: UNITED STATE FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison, 1999. p.1-45.

GONÇALEZ, C.J.; VIEIRA, F.S.; CAMARGO, J.A.A.; ZERBINI, N.J. Influência do sítio nas propriedades da madeira de *Pinus Caribaea* var. *Hondurensis*. **Revista Cerne**, Lavras, v.15, n.2, p.251-255, abr./jun. 2009.

GOUGH, W.; RICHARDS, J.P.G.; WILLIAMS, R.P. **Vibrations and waves**. 2.ed. London: Prentice Hall, 1983. 249p.

HEARMON, R.F.S. **An introduction to applied anisotropic elasticity**. Oxford: Oxford University, 1961. 136p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Coke: determination of shatter indices ISO-R-616**. Washington, 1995. No page.

KLINE, D.E. A recording apparatus for measuring the dynamic mechanical properties of polymers. **Journal of Polymer Science**, Barking, v.22, n.102, p.449-454, 1956.

KOLLMANN, F.P.; COTÉ, W.A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. v.1, 592p.

LIMA, J.T. **Clonal variation in the solid wood properties of *Eucalyptus***. 1999. 276f. Thesis (Doctor in Wood Science)-University of Wales, Bangor.

LIMA, J.T. The wood density of 3 *Eucalyptus saligna* Smith clones in relation to age. **Annales des Sciences Forestières**, Versailles, v.52, n.3, p.347-352, Sept. 1995.

LIMA, J.T.; BRESSE, C.M.; CAHALAN, C.M. Genotype-environment interaction in basic density of *Eucalyptus* clones. **Wood Science and Technology**, New York, v.3, n.34, p.197-206, Oct. 2000.

LIMA, J.T.; ROSADO, S.C.S.; TRUGILHO, P.F. Assessment of wood density of clones of *Eucalyptus grandis*. **Southern African Forestry Journal**, Menlopark, v.191, n.7, p.21-27, July 2001.

MATOS, M.; RIOS, C.A. Reatividade do carvão vegetal. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982. p.91-112.

MENDES, M.G.; GOMES, P.A.; OLIVEIRA, J.B. Propriedades e controle da qualidade do carvão vegetal. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982. p.77-89.

MILANEZ, B. **Siderurgia, sociedade e meio ambiente**. Disponível em: <<http://www.riosvivos.org.br/canal.php?c=34&mat=12591>>. Acesso em: 3 out. 2009.

MOORE, G.R.; BLANKENHORN, P.R.; BEALL, F.C.; KLINE, D.E. Some physical properties of birch carbonized in a nitrogen atmosphere. **Wood and Fiber**, Madison, v.6, n.3, p.193-199, 1974.

MORESCHI, J.C. **Propriedades tecnológicas da madeira**. Curitiba: UFPR, 2005. 164p.

NEUILLY, M. **Modélisation et estimation des erreurs de mesures**. Paris: CETAMA, 1993. 644p.

OLIVEIRA, J.B.; MENDES, M.G.; GOMES, P.A. Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982. p.62-73.

PEARSON, R.G.; GILMORE, R.C. Effect of fast growth rate on the mechanical properties of loblolly pine. **Forest Products Journal**, Madison, v.30, n.5, p.47-54, Dec. 1980.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2000. 113p. (Documentos, 38).

PINHEIRO, P.C.C. da; VIANA, E.; REZENDE, M.E.A. de; SAMPAIO, R.S. **A produção de carvão vegetal**. Belo Horizonte: UFMG, 2006. 103p.

REZENDE, R.N. **Secagem de toras de clones de *Eucalyptus* empregados na produção de carvão**. 2009. 181p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SANTOS, M.A.S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: FÓRUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL, 1., 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2008. 1 CD-ROM.

SERPA, P.N.; VITAL, B.R.; DELLA LUCIA, R.M.; PIMENTA, A.S. Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.27, n.5, p.723-733, set./out. 2003.

SILVA, F.T. Produtos energéticos obtidos a partir de biomassa lignocelulósica-pré-tratamentos. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE FLORESTAS ENERGÉTICAS, 1., 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: EMBRAPA, 2009. 1 CD-ROM.

SLOCUM, D.H.; MCGINNES, E.A.; BEALL, F.C. Charcoal yield, shrinkage, and density changes during carbonization of oak and hickory woods. **Wood Science**, London, v.11, n.1, p.42-47, 1978.

SNOWDON, J.C. **Vibration and shock on damped mechanical systems**. New York: J.Wiley, 1968. 486p.

TARGA, L.A.; BALLARIN, A.W.; BIAGGIONI, M.A.M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.2, p.291-299, jul./dez. 2005.

TRUGILHO, P.F. **Produtos energéticos e preservação da madeira**. Lavras: UFLA, 1999. 59p.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization**. New York: Chapman & Hall, 1991. 494p.

VITAL, B.R.; ANDRADE, A.M.; VALENTE, O.F.; CAMPOS, J.C.C.
Influência da casca no rendimento e na qualidade do Carvão vegetal de
Eucalyptus grandis. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba,
v.41/42, n.5, p.44-49, jan./dez. 1989.

WANGAARD, F.F. **The mechanical properties of wood**. London: Chapman &
Hall, 1950. 377p.

WATSON, A.J.; DADSWELL, H.E. Influence of fibre morphology on paper
properties: micellar spiral angle. **Appita**, Victoria, v.17, p.151-156, 1964.

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