



ALLAN MOTTA COUTO

**INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES
ANATÔMICAS, QUÍMICAS E FÍSICAS DA
MADEIRA DE *Eucalyptus* e *Corymbia* NA
QUALIDADE DO CARVÃO PARA USO
SIDERÚRGICO**

LAVRAS-MG

2014

ALLAN MOTTA COUTO

**INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES ANATÔMICAS, QUÍMICAS E
FÍSICAS DA MADEIRA DE *Eucalyptus* e *Corymbia* NA QUALIDADE DO
CARVÃO PARA USO SIDERÚRGICO**

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 Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Paulo Fernando Trugilho

LAVRAS - MG

2014

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Couto, Allan Motta.

Influência das características anatômicas, químicas e físicas da madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia* na qualidade do carvão para uso siderúrgico / Allan Motta Couto. – Lavras : UFLA, 2014.

173 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Paulo Fernando Trugilho.

Bibliografia.

1. Variação radial. 2. Temperatura de carbonização. 3. Carvão vegetal. 4. Carvão vegetal - Propriedades mecânicas. 5. Anatomia da madeira. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 662.74

ALLAN MOTTA COUTO

**INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES ANATÔMICAS, QUÍMICAS E
FÍSICAS DA MADEIRA DE *Eucalyptus* e *Corymbia* NA QUALIDADE DO
CARVÃO PARA USO SIDERÚRGICO**

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 Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADO em 04 de Junho de 2014.

Dr. Alfredo Napoli	CIRAD
Dr. José Tarcísio Lima	UFLA
Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein	UFLA
Dr. Helder Bolognani Andrade	VALLOUREC FLORESTAL

Dr. Paulo Fernando Trugilho
Orientador

LAVRAS – MG

2014

A Deus.

Aos meus pais Antônio e Sara.

Ao meu irmão Alysson.

Aos meus amigos.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Sou especialmente grato ao professor Paulo Fernando Trugilho pelos ensinamentos passados, confiança nos trabalhos realizados e paciência em minha orientação.

Aos professores Dr. Alfredo Napoli, Dr. José Tarcísio Lima e Dr. José Reinaldo Moreira da Silva pela coorientação e importantes conselhos durante o período do meu doutorado.

À VALLOUREC FLORESTAL pelo suporte e apoio logístico necessários à condução deste trabalho.

Ao estagiário Camilo Barcelos pela imensa ajuda na coleta dos dados e análise do experimento.

Aos amigos Jonnys, Javan, Altobely, Lisiane, Rodrigo Nobre e Pedrão pela amizade e convivência.

Aos quase irmãos Gabriel e Thiagão, pelos inúmeros momentos que passamos juntos (incluindo os ruins).

Aos parceiros de república Dobeheiner, Tiago Birro, Gleiton, Davi e Ivo por terem feito com que eu me sentisse em casa, mesmo estando longe dela.

Aos meus pais Antônio e Sara, pela minha formação moral, apoio incondicional e por terem se privado de seus sonhos para que eu pudesse realizar os meus.

Ao meu irmão Alysson pela parceria e companheirismo mesmo a distância.

E a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho e aqueles que, por ventura, tiveram seus nomes omitidos.

RESUMO

O presente estudo teve por objetivo avaliar a influência das propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira sobre a produção e características de qualidade do carvão vegetal produzido em diferentes temperaturas de carbonização. Foram utilizadas madeiras oriundas de três materiais genéticos, *Corymbia citriodora* e dois clones de híbridos naturais de *E. urophylla* (VM04 e MN463) amostradas em três posições radiais distintas. Cada material genético foi representado por três indivíduos contendo o diâmetro médio da população. As madeiras foram caracterizadas física, química e anatomicamente. Posteriormente os materiais foram carbonizados a uma taxa de aquecimento de 100°C/hora em três temperaturas finais de carbonização (350, 450 e 550°C). O carvão vegetal produzido foi caracterizado física, química e mecanicamente, além disso foram obtidos os rendimentos gravimétricos do processo de carbonização. Observou-se um decréscimo, no sentido medula-casca, do teor de extrativos totais, lignina total, carbono elementar, poder calorífico superior e diâmetro do lume da fibra. Entretanto, há uma tendência de incremento da densidade básica, teor de holocelulose e oxigênio elementar, comprimento da fibra, largura da fibra, espessura da parede, fração parede da fibra e frequência de vaso o mesmo sentido. Não foi observado um padrão de variação radial característico para o teor de minerais. Maiores temperaturas finais de carbonização promoveram acréscimo do teor de carbono elementar, carbono fixo, minerais, resistência e rigidez no carvão vegetal produzido, além de reduzir o teor de oxigênio e hidrogênio elementar, compostos voláteis. Carvão produzido com madeira mais próxima da medula tende a apresentar maior rendimento gravimétrico e teor de minerais, menor densidade relativa aparente, menor teor de hidrogênio elementar, menor resistência, rigidez e densidade energética. O diâmetro do lume, espessura da parede e fração parede da fibra apresentam alta relação com a densidade básica da madeira. As demais características anatômicas como comprimento da fibra, largura da fibra, frequência e diâmetro de vaso apresentaram baixas relações com a densidade básica da madeira. A densidade relativa aparente, densidade energética, tensão máxima suportada e resistência a penetração da semi esfera do carvão vegetal apresentam altas relações com a densidade básica, diâmetro do lume, espessura da parede e fração parede da fibra. Quanto maior for a densidade básica, espessura da parede da fibra e fração parede da fibra, maior será a densidade relativa aparente, resistência e rigidez do carvão vegetal. Entretanto, quanto maior for o diâmetro do lume da fibra menor tenderá ser a densidade relativa aparente, resistência a penetração da semi esfera e tensão máxima suportada pelo carvão vegetal. Carvão com maior densidade relativa aparente tende a apresentar maior resistência e rigidez.

Palavras-chave: Variação radial. Temperatura de carbonização. Carvão vegetal.

ABSTRACT

The purpose of this research was to evaluate the anatomical, chemical and physical properties of wood in relation to charcoal quality obtained from different carbonization temperatures. Were used wood from three genetic resources, namely *Corymbia citriodora* and two clones of natural hybrids of *E. urophylla* (VM04 and MN463), sampled on three different radial positions. For each genetic resource, represented by three individuals with around the plantation mean diameter, after characterization, the wood was carbonized at 100°C per hour, and the final temperatures were 350, 450 and 550°C. The charcoal obtained from these temperatures was also characterized. Besides, the gravimetric yields of the carbonization process were derived. It was found an decrease in the direction medulla-bark for the content of total extractives, total lignin, elemental carbon, higher heating value and diameter of fiber lumen. There is a increase tendency in the basic density, content of holocellulose and elemental oxygen, fiber length and width, wall thickness and fraction of fiber wall and vessel frequency. It was not found a typical radial variation pattern for the mineral content. The higher final carbonization temperatures led to an increase in content of elemental and fixed carbon, minerals, charcoal strength and stiffness, besides causing decrease in content of elemental oxygen and hydrogen, volatile compounds. The charcoal obtained from wood extracted nearest to medulla tends to show greater gravimetric yield and mineral content, lower values of apparent relative density, content of elemental hydrogen, strength, stiffness and energy density. Beyond another anatomical characteristics, which showed weak relations with wood basic density, the lumen diameter, wall thickness and fraction of fiber wall were found to show strong relations. The apparent relative density, energy density, Maximum tension support and resistance to penetration of the semi sphere of charcoal showed strong relations with wood basic density, lumen diameter, wall thickness, and fraction of fiber wall. However, as greater is the wood basic density, fiber wall thickness and fraction of fiber wall, the greater will be the apparent relative density, and charcoal strength and stiffness. Besides, when the diameter of fiber lumen is greater, the apparent relative density, resistance against semisphere penetration and charcoal maximum tension are lower. Therefore, charcoal with greater apparent relative density tends to show greater strength and stiffness.

Keywords: Radial variation. Carbonization temperature. Charcoal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema gráfico para amostragem da madeira destinado às análises laboratoriais.....	40
Figura 2	Esquema gráfico da subdivisão do pranchão central para retirada da madeira para avaliação física, química, anatômica e carbonização.....	41
Figura 3	Classificação das partículas em função da granulometria.....	42
Figura 4	Esquema do ensaio de dureza janka adaptado.....	48
Figura 5	Gráfico da tensão em função da profundidade de penetração da semi esfera no carvão vegetal.....	50
Figura 6	Valores médios de densidade básica para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	55
Figura 7	Valores médios de densidade básica para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	56
Figura 8	Padrão de variação radial do teor de extrativos totais para os três materiais genéticos avaliados.....	58
Figura 9	Padrão de variação radial do teor de lignina para os três materiais genéticos avaliados.....	61
Figura 10	Variação radial do teor de minerais para os três materiais genéticos.....	63
Figura 11	Padrão de variação radial do teor de holocelulose para os três materiais genéticos.....	65
Figura 12	Valores médios de concentração em carbono elementar para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).	68

Figura 13	Valores médios de concentração em oxigênio elementar para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)	68
Figura 14	Valores médios da concentração em hidrogênio elementar para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)	69
Figura 15	Valores médios de poder calorífico superior para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	71
Figura 16	Valores médios de poder calorífico superior para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	71
Figura 17	Valores médios da densidade energética para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	73
Figura 18	Valores médios de densidade energética para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	73
Figura 19	Valores médios de comprimento de fibra para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	76
Figura 20	Valores médios de comprimento de fibra para as posição radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	76
Figura 21	Padrão de variação radial da largura da fibra para os três materiais genéticos estudados	78

Figura 22	Valores médios de diâmetro do lume da fibra para os arterial genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	80
Figura 23	Valores médios de diâmetro de lume da fibra para s posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	80
Figura 24	Valores médios de espessura da parede da fibra para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)	82
Figura 25	Valores médios de espessura da parede da fibra para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)	82
Figura 26	Valores médios de fração parede da fibra para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	83
Figura 27	Valores médios de fração parede da fibra para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	84
Figura 28	Valores médios de frequência de vaso para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	86
Figura 29	Valores médios de frequência de vaso para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	86
Figura 30	Valores médios de diâmetro de vaso para o material genético e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	87

Figura 31	Valores médios de rendimento gravimétrico da carbonização das posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)	90
Figura 32	Desdobramento da interação entre as fontes de variação Material genético e Temperatura Final de Carbonização para o rendimento gravimétrico da carbonização	91
Figura 33	Desdobramento da interação entre as fontes de variação Material genético e Posição radial para a variável densidade relativa aparente	94
Figura 34	Valores médios do teor de carbono elementar para Temperatura Final de Carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	96
Figura 35	Valores médios do teor de oxigênio elementar para Temperatura Final de Carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	96
Figura 36	Valores médios de concentração em hidrogênio elementar do carvão vegetal para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)	97
Figura 37	Valores médios de concentração em hidrogênio elementar do carvão vegetal para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	98
Figura 38	Valores médios de concentração em hidrogênio elementar para as Temperaturas Finais de Carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)	98

Figura 39	Desdobramento da interação entre as fontes de variação Material genético e Temperatura Final de Carbonização para a variável teor de materiais voláteis.....	100
Figura 40	Desdobramento da interação entre as fontes de variação Material genético e Temperatura Final de Carbonização para a variável teor de carbono fixo	102
Figura 41	Valores médios de concentração em minerais para fonte de variação Temperatura Final de Carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)	104
Figura 42	Padrão de variação radial da concentração de minerais do carvão vegetal orirundo dos três materiais genéticos estudados ...	105
Figura 43	Valores médios de tensão máxima suportada para fonte de variação Temperatura Final de Carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)	108
Figura 44	Padrão de variação radial tensão máxima suportada do carvão vegetal para cada material genético	109
Figura 45	Valores médios de resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal para os Materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)	111
Figura 46	Valores médios de resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal para as Posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	112

Figura 47	Valores médios de resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal para as Temperaturas Finais de Carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla Scott-Knott ($\alpha=0,05$)	112
Figura 48	Desdobramento da interação entre as fontes de variação Material genético e Temperatura Final de Carbonização para a variável poder calorífico superior	115
Figura 49	Valores médios de densidade energética para os Materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	117
Figura 50	Valores médios de densidade energética para as Posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	117
Figura 51	Valores médios de densidade energética para as temperaturas finais de carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)	118
Figura 52	Relação funcional entre densidade básica e diâmetro do lume da fibra	121
Figura 53	Relação funcional entre densidade básica e espessura da parede da fibra	121
Figura 54	Relação funcional entre densidade básica e fração parede da fibra.....	122
Figura 55	Relação funcional entre densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e densidade básica da madeira	136
Figura 56	Relação funcional entre densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e diâmetro do lume da fibra	137

Figura 57	Relação funcional entre densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e espessura da parede da fibra	137
Figura 58	Relação funcional entre densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e fração parede da fibra.	138
Figura 59	Relação funcional entre densidade energética do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e densidade básica da madeira.....	140
Figura 60	Relação funcional entre densidade energética do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e diâmetro do lume da fibra.....	140
Figura 61	Relação funcional entre densidade energética do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e espessura da parede da fibra	141
Figura 62	Relação funcional entre densidade energética do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e fração parede da fibra	141
Figura 63	Relação funcional entre a resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e densidade básica da madeira	144
Figura 64	Relação funcional entre a resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e diâmetro do lume das fibras	144
Figura 65	Relação funcional entre a resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e espessura da parede das fibras.....	145

Figura 66	Relação funcional entre a resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e fração parede das fibras.....	145
Figura 67	Relação funcional entre a tensão máxima suportada pelo carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e densidade básica da madeira.....	148
Figura 68	Relação funcional entre a tensão máxima suportada pelo carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e diâmetro do lume das fibras.....	148
Figura 69	Relação funcional entre a tensão máxima suportada pelo carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e espessura da parede das fibras	149
Figura 70	Relação funcional entre a tensão máxima suportada pelo carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e fração parede das fibras	149
Figura 71	Relação funcional entre resistência à penetração da semi esfera e densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização	152
Figura 72	Relação funcional entre tensão máxima suportada e densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização.....	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Normas analíticas utilizadas na determinação da concentração dos principais componentes químicos da madeira	43
Tabela 2	Parâmetros de análise da composição elementar	43
Tabela 3	Resumo da análise de variância para densidade básica da madeira.....	55
Tabela 4	Resumo da análise de variância dos dados para os principais componentes químicos da madeira.....	57
Tabela 5	Valores médios da concentração em extrativos totais dos materiais genéticos em cada posição radial e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	59
Tabela 6	Valores médios do teor de lignina total dos materiais genéticos em cada posição radial e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	61
Tabela 7	Valores médios do teor de minerais dos materiais genéticos em cada posição radial e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	63
Tabela 8	Valores médios da concentração em holocelulose dos materiais genéticos em cada posição radial e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	65
Tabela 9	Resumo da análise de variância dos dados para os principais componentes químicos elementares da madeira.....	67
Tabela 10	Resumo da análise de variância dos dados para o poder calorífico superior e densidade energética da madeira.....	70

Tabela 11	Resumo da análise de variância para comprimento da fibra, largura da fibra e diâmetro do lume da fibra presentes na madeira.....	75
Tabela 12	Valores médios de largura da fibra dos materiais genéticos em cada posição radial e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	78
Tabela 13	Resumo da análise de variância dos dados para espessura da parede da fibra e fração parede da fibra presentes na madeira.....	81
Tabela 14	Resumo da análise de variância para frequência e diâmetro de vaso na madeira.....	85
Tabela 15	Resumo da análise de variância para rendimento gravimétrico da carbonização e densidade relativa aparente do carvão vegetal	89
Tabela 16	Valores médios de rendimento gravimétrico da carbonização dos materiais genéticos em cada temperatura final de carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	92
Tabela 17	Valores médios da densidade relativa aparente do carvão oriundo dos materiais genéticos em cada posição radial e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)	94
Tabela 18	Resumo da análise de variância para composição química elementar do carvão vegetal.....	95
Tabela 19	Resumo da análise de variância para composição química imediata do carvão vegetal.....	99

Tabela 20	Valores médios da concentração em materiais voláteis do carvão oriundo dos materiais genéticos em cada temperatura final de carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	101
Tabela 21	Valores médios do teor de carbono fixo do carvão oriundo dos materiais genéticos em cada temperatura final de carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)	103
Tabela 22	Valores médios do teor de minerais do carvão oriundo dos materiais genéticos em cada posição radial e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	105
Tabela 23	Resumo da análise de variância para as propriedades mecânicas de módulo de elasticidade e módulo de ruptura do carvão vegetal.....	107
Tabela 24	Valores médios de tensão máxima suportada pelo carvão oriundo dos materiais genéticos em cada posição radial e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)	110
Tabela 25	Resumo da análise de variância para poder calorífico superior e densidade energética do carvão vegetal.....	114
Tabela 26	Valores médios do poder calorífico superior do carvão dos oriundo materiais genéticos em cada temperatura final de carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	115
Tabela 27	Correlações entre as propriedades anatômicas e densidade básica.....	119

Tabela 28	Ajustes da densidade básica em função das propriedades anatômicas da madeira	120
Tabela 29	Correlações entre a composição química elementar da madeira e as propriedades do carvão vegetal	124
Tabela 30	Correlações entre a composição química da madeira e as propriedades do carvão vegetal produzido a uma temperatura final de 350°C.....	127
Tabela 31	Correlações entre a composição química da madeira e as propriedades do carvão vegetal produzido a uma temperatura final de 450°C.....	128
Tabela 32	Correlações entre a composição química da madeira e as propriedades do carvão vegetal produzido a uma temperatura final de 550°C.....	129
Tabela 33	Correlações entre as propriedades anatômicas da madeira e densidade básica com as propriedades do carvão vegetal produzido a uma temperatura final de 350°C.....	131
Tabela 34	Correlações entre as propriedades anatômicas da madeira e densidade básica com as propriedades do carvão vegetal produzido a uma temperatura final de 450°C.....	132
Tabela 35	Correlações entre as propriedades anatômicas da madeira e densidade básica com as propriedades do carvão vegetal produzido a uma temperatura final de 550°C.....	133
Tabela 36	Estatística dos ajustes entre a densidade básica e variáveis anatômicas da madeira e a densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização.....	135
Tabela 37	Estatística dos ajustes entre a densidade básica e variáveis anatômicas da madeira e a densidade energética do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização	139

Tabela 38	Estatística dos ajustes entre a densidade básica e variáveis anatômicas da madeira e a resistência à penetração da semiesfera do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização.....	143
Tabela 39	Estatística dos ajustes entre a densidade básica e variáveis anatômicas da madeira e a tensão máxima suportada pelo carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização.....	147
Tabela 40	Estatística dos ajustes entre a densidade relativa aparente do carvão vegetal e as propriedades mecânicas do mesmo, para as três condições de carbonização	151

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	OBJETIVOS	26
2.1	Objetivo geral	26
2.2	Objetivos específicos	26
3	REFERENCIAL TEÓRICO	27
3.1	Madeira como matéria prima	27
3.2	Carvão vegetal	28
3.3	Qualidade do carvão vegetal siderúrgico	30
3.4	Influência da qualidade da madeira sobre a qualidade do carvão vegetal siderúrgico	33
3.5	Influência dos parâmetros da carbonização sobre as propriedades do carvão vegetal	35
3.6	Avaliação das propriedades mecânicas do carvão vegetal	36
4	MATERIAL E MÉTODOS	39
4.1	Material biológico	39
4.2	Amostragem e preparo do material	39
4.3	Caracterização da madeira	42
4.3.1	Determinação da densidade básica	42
4.3.2	Caracterização química da madeira	42
4.3.3	Caracterização anatômica da madeira	44
4.3.4	Determinação do poder calorífico superior e densidade energética da madeira	45
4.4	Carbonização do material	45
4.5	Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização química, física, mecânica e energética do carvão vegetal	46
4.5.1	Determinação do rendimento gravimétrico da carbonização	46
4.5.2	Determinação da densidade relativa aparente do carvão vegetal ...	46
4.5.3	Determinação da qualidade química do carvão vegetal	47
4.5.4	Determinação das propriedades mecânicas do carvão vegetal	47
4.5.5	Determinação do poder calorífico superior e densidade energética do carvão vegetal	51
4.6	Análises estatísticas	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1	Caracterização física, química e anatômica da madeira	54
5.2	Caracterização física, química e mecânica do carvão vegetal	88
5.3	Influência dos parâmetros anatômicos sobre a densidade básica ...	119
5.4	Influência da composição química elementar da madeira sobre as propriedades do carvão vegetal	123

5.5	Influência dos principais componentes químicos da madeira sobre as propriedades do carvão vegetal.....	125
5.6	Influência das propriedades anatômicas e densidade básica da madeira sobre as propriedades do carvão vegetal.....	130
5.7	Relação entre a densidade relativa aparente e as propriedades mecânicas do carvão vegetal.....	150
6	CONCLUSÕES.....	154
6.1	Caracterização física, química e anatômica da madeira e determinação do padrão de variação radial das propriedades em questão.....	154
6.2	Caracterização física, química e mecânica do carvão vegetal produzido em três distintas temperaturas de carbonização.....	155
6.3	Influência das variáveis anatômicas sobre a densidade básica da madeira.....	155
6.4	Influência das propriedades anatômicas da madeira sobre as propriedades físicas e mecânicas do carvão vegetal.....	156
6.5	Influência da densidade relativa aparente sobre as propriedades mecânicas do carvão vegetal.....	156
	REFERÊNCIAS.....	157
	ANEXOS.....	165

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, na atualidade, é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal do mundo (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2014). Isso se deve ao fato de o país ser um dos poucos a utilizar o carvão vegetal para fins industriais como, por exemplo, a termorredução de minério de ferro. Grande parte da produção nacional do ferro-gusa produzido utiliza o carvão vegetal como termorreduzidor, enquanto que nos demais países produtores utilizam quase que exclusivamente o carvão mineral para o mesmo objetivo.

A utilização de carvão vegetal, em detrimento do mineral, na produção de ferro-gusa é consequência da baixa ocorrência de jazidas de carvão mineral com qualidade adequada em território nacional. Assim, quando a opção é a utilização de carvão mineral para termorredução do minério de ferro, há a necessidade da importação deste insumo de países produtores. Outro fator explicativo sobre a utilização de carvão vegetal na produção siderúrgica nacional são as características geográficas do Brasil. O país apresenta área e condições edafoclimáticas favoráveis à produção de madeira, que, por sua vez, pode ser destinada à produção de carvão vegetal.

As funções do carvão no processo de termorredução do minério de ferro são basicamente, fornecer energia na forma de calor, recompor o poder redutor do dióxido de carbono, sustentação da carga de minério de ferro e permitir a percolação gasosa pelo leito. Funções estas vitais à produção de ferro-gusa. Assim sendo, o carvão empregado no processo produtivo deve apresentar características tecnológicas que colaboram com estas funções.

Apesar de desempenharem as mesmas funções no processo de termorredução do minério de ferro, os carvões mineral e vegetal apresentam características distintas entre si. A avaliação e determinação de tais propriedades

são importantes para aumentar o controle do processo e da qualidade do ferro gusa produzido.

O carvão de origem mineral apresenta algumas vantagens tecnológicas em comparação ao carvão de origem vegetal. Dentre estas podem ser citadas a maior resistência mecânica, reatividade adequada e granulometria apropriada. Características estas que auxiliam fortemente o processo de termorredução do minério de ferro. Entretanto, o carvão mineral apresenta elevado teor de compostos inorgânicos, que são considerados pejorativos ao processo, principalmente se estiverem presentes compostos fosfatados e sulfurosos.

Citam-se diversas vantagens comparativas do carvão vegetal sobre o mineral, e a principal delas é o papel ambiental que o carvão vegetal desempenha. Seu caráter renovável, menor potencial poluidor e menor impacto ambiental em sua produção são características inerentes à produção de carvão vegetal. Diante destas características há a possibilidade de o carvão vegetal se adequar ao conceito de produto sustentável, uma designação muito desejada na atualidade. Entretanto, as características tecnológicas do carvão vegetal para produção de ferro gusa não apresentam um nível tão alto de adaptação à produção de ferro gusa quando comparado ao carvão mineral.

As propriedades físicas e químicas do carvão vegetal são comumente avaliadas e estudadas pelas empresas produtoras e entidades técnico-científicas. Diferentemente destas, possivelmente pela falta de uma normativa específica, as propriedades mecânicas do carvão vegetal representam foco de estudo bem menos frequente. As propriedades mecânicas são parâmetros de extrema importância quando o objetivo é a produção do ferro gusa. Tal importância é devido ao fato de que uma das funções do carvão é a sustentação da carga de minério de ferro no interior do alto forno siderúrgico. Logo, para desempenhar esta função de maneira adequada e satisfatória, é necessário que o carvão apresente maior resistência mecânica.

Não apenas as propriedades físicas e químicas do carvão são frequentemente avaliadas, as propriedades da madeira a ser carbonizada também são alvo de inúmeros estudos. Tal afirmativa está conexas ao fato de as propriedades da madeira influenciarem diretamente as propriedades do carvão vegetal. Pesquisas objetivando avaliar a influência das propriedades físicas e químicas da madeira sobre a qualidade do carvão vegetal são mais frequentes. Entretanto, pouca atenção foi dada à influência das propriedades anatômicas da madeira em relação às propriedades do carvão vegetal.

Devido à maior importância na economia mundial, pesquisas envolvendo o carvão mineral são bem mais frequentes comparadas às pesquisas envolvendo carvão vegetal destinado à siderurgia. Esta maior relevância começa a ser aplicada ao carvão vegetal, que devido a sua importância ambiental e ao fato de o carvão mineral ser um recurso não renovável, tem tido maior visibilidade mundial na atualidade.

O conhecimento da influência dos parâmetros anatômicos da madeira sobre a produção e qualidade do carvão vegetal é extremamente escasso. Assim sendo experimentações nesta temática podem ser de grande importância para propor novos índices de qualidade da madeira destinada à produção de carvão vegetal siderúrgico.

Outro ponto a ser levado em consideração é a carência de conhecimento sobre as propriedades mecânicas do carvão vegetal, bem como dos fatores que as afetam. Assim sendo, pesquisas relacionadas à quantificação da influência das propriedades da madeira e parâmetros de carbonização sobre as propriedades mecânicas do carvão vegetal podem ser de grande relevância prática e científica.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste estudo foi avaliar a influência das propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira sobre as propriedades físicas, químicas e mecânicas do carvão vegetal produzido em diferentes temperaturas de carbonização.

2.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar física, química e anatomicamente a madeira de três materiais genéticos distintos;
- b) Determinar o padrão de variação radial das propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira;
- c) Caracterizar física, química e mecanicamente o carvão vegetal produzido em três diferentes temperaturas finais de carbonização;
- d) Avaliar a influência dos parâmetros anatômicos sobre a densidade básica da madeira;
- e) Avaliar a influência das propriedades físicas e anatômicas da madeira sobre as propriedades mecânicas do carvão vegetal;
- f) Avaliar a influência da densidade relativa aparente do carvão vegetal sobre as suas propriedades mecânicas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Madeira como matéria prima

Madeira é o tecido resultante do crescimento primário e secundário dos vegetais superiores. É formada pela organização das estruturas anatômicas originadas pela divisão das células meristemáticas do câmbio vascular e meristemas apicais do vegetal. Sendo um material de caráter biológico, a madeira tende a apresentar uma elevada variabilidade. Variabilidade esta que pode ser originada por fatores ambientais, fatores genéticos e pela interação entre ambos.

As características químicas, anatômicas, físicas e mecânicas da madeira apresentam diversos níveis de variação. Tais propriedades variam na madeira oriunda de indivíduos de espécies distintas, de indivíduos de mesma espécie, de indivíduos pertencentes ao mesmo material genético e variam ainda em diferentes posições internas de um fuste. Dentro de um fuste há dois tipos básicos de variação: variação longitudinal e radial (OLIVEIRA; HELLMMEISTER; TOMAZELLO, 2005; TOMAZELLO, 1985, 1987; VALE; BRASIL; MARTINS, 1999) sendo mais proeminente a variação no sentido radial, segundo Mallan (1995).

Diante de tamanha variabilidade, a madeira apresenta uma gama praticamente infindável de utilizações. Tal material tem sido empregado na construção civil, produção de celulose e papel, painéis reconstituídos, produtos de maior valor agregado como molduras, pisos, componentes estruturais e outros. Portanto, a madeira apresenta uma grande importância nos mais diversos ramos industriais.

A madeira pode ser utilizada ainda como fonte de energia. A forma mais simples de se utilizar a madeira como fonte energética é sua queima direta. A

decomposição dos elementos químicos orgânicos que constituem a madeira liberam quantidades consideráveis de energia quando em combustão. Atualmente, existem distintas formas de combustíveis produzidos a partir da madeira, a exemplo citam-se os gases energéticos produzidos por processos de gaseificação (ARANTES et al., 2008), alcatrão e carvão vegetal pelo processo de carbonização (OLIVEIRA et al., 2013). Logo, a madeira pode ser considerada como um importante e diversificado recurso energético.

Dentre as formas energéticas, nas quais a madeira se faz presente, o carvão vegetal apresenta relevante importância. Isso é devido a sua majoritária utilização no processo industrial de termorredução do minério de ferro em território nacional. O Brasil tem por característica ser um dos poucos países que utilizam o carvão vegetal em escala industrial. Os demais países produtores de carvão vegetal utilizam tal combustível principalmente para produção de calor residencial. Portanto, tal material combustível apresenta singular importância para a indústria siderúrgica brasileira.

3.2 Carvão vegetal

O carvão vegetal é o produto sólido da decomposição térmica da madeira na ausência ou presença controlada de oxigênio. O principal objetivo do processo de conversão da madeira em carvão vegetal é aumentar a concentração de carbono da fração sólida dos produtos resultantes do processo de carbonização. É um dos materiais mais utilizados no mundo, sendo produzido em maior ou menor escala por praticamente todos os países do globo.

A produção mundial de carvão vegetal no ano de 2012 foi de, aproximadamente, 50 milhões de toneladas. Deste total o Brasil foi responsável por 7,6 milhões, representando 15% da produção mundial de carvão vegetal no ano citado (FAO, 2014).

A explicação para a participação tão intensa por parte do Brasil na produção de carvão vegetal é o fato de o mesmo ser destinado, quase que exclusivamente, ao setor industrial siderúrgico como termorreduzidor do minério de ferro (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2011). Diferentemente do Brasil, países como a Nigéria, Etiópia, Índia, Congo e Gana, considerados também como grandes produtores, utilizam o carvão vegetal, majoritariamente, como fonte de calor residencial e cocção de alimentos.

Outro ponto a ser levado em consideração sobre a produção do carvão vegetal são suas vantagens comparativas ao principal termorreduzidor mundial de minério de ferro, o carvão mineral. Dentre as vantagens destacam-se o seu caráter renovável, menor potencial poluidor, menor impacto ambiental em sua produção, menor concentração de compostos inorgânicos e praticamente inexistência de compostos fosfatados e sulfurosos. Outra vantagem, no caso do Brasil, é a ampla consolidação da tecnologia de fabricação de carvão vegetal (ABRAF, 2010). Entretanto, o carvão vegetal apresenta limitações quanto a suas propriedades mecânicas comparado ao carvão mineral.

No Brasil, a opção majoritária pela utilização do carvão vegetal na siderurgia se dá basicamente por dois fatores. O primeiro está ligado à baixa ocorrência de jazidas de carvão mineral de qualidade adequada no território nacional. Isso implica a necessidade da importação de carvão mineral de países produtores caso seja a opção utilizá-lo na produção de ferro gusa (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). O segundo fator refere-se aos fatores geográficos do Brasil, que conta com uma extensão territorial de dimensões continentais e características edafoclimáticas favoráveis à produção de madeira, que por sua vez pode ser perfeitamente destinada à produção do carvão vegetal.

3.3 Qualidade do carvão vegetal siderúrgico

Um carvão vegetal considerado de boa qualidade, para uso industrial, deve apresentar parâmetros físicos, químicos e mecânicos que auxiliem, ou, até mesmo sejam necessários às etapas do processo produtivo do ferro gusa. São basicamente quatro as funções desempenhadas pelo carvão no interior do alto forno siderúrgico: fornecimento de energia na forma de calor, recuperação do poder reductor do dióxido de carbono, sustentação da carga de minério de ferro e possibilitar a percolação gasosa pelo leito. Logo, o carvão vegetal deve apresentar características tecnológicas compatíveis com as funções que o mesmo exerce durante o processo de termorredução do minério de ferro.

Dentro dos parâmetros físicos, a densidade do carvão vegetal é um dos mais citados. Esta propriedade reflete diretamente sobre a operação do alto forno siderúrgico. Quanto maior a densidade do carvão vegetal, maior será a quantidade, em massa, de carbono no interior do alto forno. Logo, há uma otimização da utilização do espaço interno do alto forno quanto maior for a densidade do carvão vegetal (GOMES; OLIVEIRA, 1980).

Além da densidade, outro fator característico do carvão vegetal é seu teor de carbono fixo. Carbono fixo é a fração de carbono no carvão vegetal que, ao contrário dos compostos voláteis que entram em combustão na fase gasosa, queima na fase sólida. Vale et al. (2011) afirmam que combustíveis com maior teor em carbono fixo queimam mais lentamente. Este fato implica um maior tempo de residência nos aparelhos de queima comparativamente aos materiais que apresentam menor teor de carbono fixo.

Carbono fixo é um carbono fortemente ligado a outros átomos de carbono. As ligações C-C são relativamente mais resistentes, resultando em uma maior resistência à degradação térmica. Esta alta resistência à degradação térmica faz com que o carvão permaneça no estado sólido no interior do alto

forno siderúrgico por maiores períodos. O carbono no estado sólido reage com o dióxido de carbono, gás sem poder redutor, produzindo monóxido de carbono, que por sua vez apresenta alto poder redutor. Logo, carvão com maior concentração de carbono fixo é benéfico ao processo de recuperação do poder redutor do dióxido de carbono no interior do alto forno siderúrgico.

Outro aspecto importante sobre o carbono fixo no carvão vegetal é seu efeito na otimização do processo produtivo de ferro gusa. Quanto maior for o teor de carbono fixo presente no carvão maior será a quantidade em massa deste composto no interior do alto forno siderúrgico. Portanto, há uma preferência por carvões com maior concentração de carbono fixo devido a melhor utilização do espaço interno do alto forno siderúrgico durante a termorredução do minério de ferro (ASSIS; ALMEIDA; PORTO, 1982; ROCHA; KLITZKE, 1998). Entretanto, o alto forno siderúrgico que utiliza carvão vegetal é projetado e construído de forma que o processo de termorredução ocorra adequadamente com carvão vegetal que detenha um teor de carbono fixo próximo a 75%.

O teor de materiais voláteis também é uma propriedade que influencia diretamente a qualidade do carvão vegetal. Voláteis são compostos orgânicos que volatilizam quando expostos à presença de altas temperaturas. A concentração destes compostos é inversamente proporcional ao teor de carbono fixo, sendo assim considerado pejorativo sob o ponto de vista qualitativo do carvão vegetal quando em excesso. A saída de materiais voláteis poderia romper o carvão vegetal colaborando com a produção de finos dentro do alto forno. Estes finos podem dificultar a percolação de gases no interior do leito, o que prejudica o processo produtivo do ferro gusa. Entretanto, há a linha de raciocínio que diz que os compostos voláteis detêm compostos redutores que seriam importantes na redução do minério de ferro (BRITO, 1993).

A concentração de compostos inorgânicos também é um indicativo sobre a qualidade do carvão vegetal. Estes compostos são considerados resíduos

após a queima, reduzindo assim o valor do carvão em termos qualitativos se a concentração destes for considerada alta. Compostos inorgânicos que contêm enxofre e fósforo, se presente em maiores quantidades no carvão vegetal, podem ser incorporados no metal produzido causando redução da qualidade mecânica do mesmo. Tal fenômeno é denominado segregação. Entretanto, compostos inorgânicos alcalinos funcionam como catalisadores da reação de recuperação do poder redutor do dióxido de carbono, influenciando na reatividade do carvão vegetal (OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1982).

Quando o objetivo é a termorredução do minério de ferro, as propriedades mecânicas do carvão vegetal tornam-se parâmetros na qualificação do mesmo. Uma das funções do carvão vegetal no interior do alto forno é o suporte de carga do minério de ferro, logo, quanto maior a resistência e rigidez do carvão, melhor a qualidade do mesmo (FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS - CETEC, 1980).

A granulometria do carvão vegetal é outro parâmetro físico que interfere no funcionamento do alto forno durante o processo produtivo de ferro gusa. Durante o processo há a necessidade dos gases redutores percolarem pelo leito de minério e carvão. Se as partículas de carvão forem exageradamente pequenas, o fluxo desses gases ficará prejudicado. Portanto há uma redução da permeabilidade do leito quanto menor for a granulometria do carvão vegetal.

Reatividade pode ser definida, segundo Gomes e Oliveira (1980), como sendo a velocidade com a qual, a uma determinada temperatura, o carbono reage com um gás contendo oxigênio (CO_2 , O_2 , etc.). Um carvão considerado de boa qualidade deve apresentar reatividade compatível com a velocidade que o minério de ferro é reduzido. O carvão vegetal é caracterizado como um material de alta reatividade comparado ao carvão mineral.

3.4 Influência da qualidade da madeira sobre a qualidade do carvão vegetal siderúrgico

As propriedades e produtividade do carvão vegetal dependem diretamente das propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira que o originou. Propriedades como umidade, densidade básica, concentração de lignina, extrativos e minerais são as principais propriedades influentes sobre a qualidade do carvão vegetal.

Densidade básica é uma propriedade física considerada como principal índice de qualidade da madeira por influenciar as demais propriedades e, conseqüentemente, as de seus derivados (PANSWIN, 1964). No processo de carbonização, madeiras mais densas são preferenciais devido à otimização da utilização no volume interno do forno de carbonização. Madeira mais densa, quando carbonizada, dá origem a um carvão com densidade mais elevada e maior resistência mecânica (ANTAL; MOK, 1990; BRITO, 1993; CETEC, 1980).

O teor de lignina na madeira exerce influência sobre o rendimento do processo de carbonização, conseqüentemente sobre a produtividade do carvão vegetal. A lignina é o composto orgânico com maior termorresistência presente em materiais lignocelulósicos, ou seja, a degradação deste composto pelo aumento da temperatura ocorre de uma forma menos drástica comparada à degradação térmica dos demais compostos orgânicos presentes na madeira. Isto se deve à complexidade química estrutural apresentada pela lignina, que reflete em um maior rendimento, produção e produtividade em carvão vegetal quanto maior for o teor deste composto na madeira (MARTINS, 1980).

Os compostos inorgânicos, ao contrário dos orgânicos, não sofrem alteração durante o processo de carbonização. Entretanto, com a volatilização de parte da fração orgânica da madeira em virtude da degradação térmica, há um

aumento relativo do teor de inorgânicos no carvão vegetal. Logo, madeira com maior concentração de minerais produzirá também, carvão com maior teor de inorgânicos (PIMENTA; BARCELOS, 2000; VITAL et al., 1994).

A umidade da madeira é um parâmetro considerado indesejado em qualquer tipo de processo energético, pois esta absorve grande quantidade de energia, reduzindo a energia útil gerada. No processo de carbonização não é diferente, além de comprometer a produção e a produtividade, afeta diretamente as propriedades mecânicas do carvão vegetal. A rápida elevação da temperatura durante o processo de carbonização faz com que a água no interior da madeira passe rapidamente para o estado gasoso. O vapor de água por sua vez sai da peça de madeira de uma forma drástica causando fissuras, se isso ocorre, o carvão produzido terá suas propriedades mecânicas prejudicadas.

As propriedades anatômicas podem interferir nas propriedades físicas do carvão vegetal produzido. A presença de locais não preenchidos por material orgânico, como por exemplo, espaços intercelulares, interior do lume e vasos, classificam a madeira como um material poroso. Quando a madeira é carbonizada essa porosidade persiste no carvão vegetal. Portanto, madeiras de maior porosidade tendem a gerar carvões com a mesma característica.

Oliveira et al. (2006), em estudo objetivando caracterizar anatomicamente a madeira de *Mimosa tenuiflora* bem como as propriedades do carvão produzido com a mesma, sugerem que para a produção de carvão vegetal, é importante bucar madeiras que apresentem elevada densidade, fibras com elevada fração parede e baixas proporções de tecidos parenquimáticos e vasos.

Trugilho et al. (1997), utilizando a técnica de correlação canônica visando correlacionar características da madeira com as propriedades do carvão vegetal, concluíram que as madeiras com elevada densidade básica, baixo teor de minerais, fibras de menor largura e de paredes mais espessas produzem um

carvão de alta densidade relativa aparente e o baixo teor de minerais quando carbonizada.

3.5 Influência dos parâmetros da carbonização sobre as propriedades do carvão vegetal

Além das propriedades da madeira, os parâmetros de carbonização influenciam na qualidade do carvão vegetal. Taxa de aquecimento, temperatura final de carbonização e pressão são os parâmetros utilizados no processo de carbonização da madeira. Tais parâmetros afetam a produção, produtividade e as características físicas e químicas do carvão vegetal.

Temperatura final do processo de carbonização está relacionada ao rendimento do processo de carbonização. Carbonização em temperaturas mais elevadas reflete na diminuição do rendimento gravimétrico em carvão, uma vez que a volatilização dos compostos orgânicos é mais acentuada em maiores temperaturas (VIEIRA et al., 2013). Entretanto, maiores temperaturas de carbonização causam uma melhoria na qualidade química do carvão vegetal, pois há um aumento no teor de carbono fixo (PINHEIRO; FIGUEIREDO; SEYE, 2005; SYRED et al., 2006).

Outro efeito da temperatura final de carbonização sobre a qualidade do carvão vegetal é relativo às suas propriedades mecânicas. Vieira (2009), avaliando o efeito da temperatura final de carbonização sobre as propriedades mecânicas do carvão, observou um incremento da resistência e rigidez do carvão com o aumento da temperatura final de carbonização.

É importante considerar no processo de carbonização a taxa de aquecimento. A velocidade com que a temperatura aumenta influencia diretamente o rendimento do processo. Taxas de aquecimento mais brandas favorecem um maior rendimento da fração sólida produzida pelo processo de

carbonização (BRITO, 1992a), enquanto que o aquecimento mais drástico favorece a produção de gases condensáveis e não condensáveis.

A pressão também exerce influência sobre o rendimento do processo de carbonização. Carbonizar a madeira em altas pressões limita ou aumenta a resistência à saída dos compostos voláteis das cavidades internas da madeira/carvão. O aumento do período de permanência dos compostos voláteis no interior do sólido favorece a condensação destes compostos nas cavidades internas. Posteriormente os compostos orgânicos condensados sofrem reações secundárias, que fixam estes compostos na matriz sólida aumentando a massa da fração sólida produzida (NUMAZAWA, 2000).

3.6 Avaliação das propriedades mecânicas do carvão vegetal

Segundo Vieira (2009) as principais propriedades mecânicas do carvão vegetal são a rigidez, resistência à compressão, cisalhamento e ao choque. A resistência do carvão, simploriamente denominada friabilidade, tem uma relevante importância quando o objetivo é a termorredução do minério de ferro. Tal propriedade tem reflexo na produção de finos durante a movimentação do lote de carvão, que por consequência afeta a quantidade de carvão com granulometria adequada destinada à produção de ferro gusa. Portanto, um carvão com maior resistência, ou menor friabilidade, tende a gerar menor quantidade de finos, aumentando assim a quantidade de carvão com granulometria adequada à termorredução do minério de ferro.

Outro ponto afetado pela resistência do carvão é o suporte de carga dentro do alto forno siderúrgico. Se o carvão não suportar a carga de minério ele se rompe formando peças de menores dimensões. Havendo alta proporção de peças de menores granulometrias no interior do alto forno, haverá maior dificuldade de circulação de gases do interior do leito. A permeabilidade do leito

é de vital importância para o processo produtivo de ferro gusa. Logo, um carvão mais resistente tende a contribuir com a percolação de gases no interior do alto forno (CETEC, 1980).

A avaliação da friabilidade do carvão vegetal tem sido comumente avaliada por métodos como tamboramento (COUTINHO; FERRAZ, 1988) e em menor frequência pelo teste de queda. Testes estes que visam simular o desgaste sofrido pelas peças de carvão em operação rotineira, entretanto, em escala laboratorial. Estes testes proporcionam um indicativo de resistência do lote de carvão, mas não apresentam o quanto de tensão o material carvão suporta.

Ensaio mecânicos mais precisos têm sido propostos mais recentemente. Araujo et al. (2010), Moutinho (2013) e Vieira (2009), avaliaram a resistência e rigidez do carvão vegetal oriundo de madeira de *Eucalyptus* por técnicas que apresentam maior controle e sensibilidade na coleta de dados. Os autores supracitados utilizaram máquinas de ensaio universal objetivando caracterizar mecanicamente o carvão vegetal. Os valores observados pelos autores são numericamente contrastantes devido às singularidades metodológicas utilizadas em cada estudo.

Uma dificuldade em avaliar as propriedades mecânicas do carvão vegetal é a inexistência de uma normativa específica que padronize os ensaios. Tal gargalo dificulta a comparação de resultados obtidos entre os autores. Portanto, a comparação entre autores é possível apenas na caracterização do comportamento das propriedades mecânicas do carvão em função de uma fonte de variação e não em termos quantitativos.

Outra dificuldade é a obtenção de corpos de prova de carvão vegetal livre de defeitos. Trincas e fissuras são inerentes ao material carvão. Mendes, Gomez e Oliveira (1982) mencionam que quanto menor a peça de madeira a ser carbonizada menor será a quantidade de fissuras presente no carvão vegetal produzido. O autor relata que menor dimensão dos corpos de prova facilita a

saída de gases diminuindo a pressão interna no carvão vegetal. Um corpo de prova com menores dimensões também colabora com uma carbonização mais homogênea no interior da peça.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material biológico

A seleção dos clones utilizados neste estudo foi realizada a partir de uma amostra piloto que continha um total de 14 materiais genéticos representados por um indivíduo cada. Os 14 materiais genéticos foram caracterizados anatomicamente por meio da mensuração das dimensões das fibras (comprimento, largura, diâmetro do lume, espessura de parede e fração parede), raio (altura e largura) e elemento de vaso (comprimento, diâmetro e frequência). Com os dados advindos da caracterização anatômica foi realizada análise de similaridade juntamente com análise de componentes principais, que permitiram a segregação dos 14 materiais genéticos em três grupos distintos. De cada segmento formado foi selecionado o material genético central, ou seja, o mais representativo do grupo.

Os três materiais genéticos selecionados foram o VM04 e MN463 (clones de híbridos naturais do *Eucalyptus urophylla*) e *Corymbia citriodora*, todos aos sete anos de idade plantados com espaçamento 3 x 3 metros, sendo os dois primeiros provenientes da empresa Vallourec Florestal Ltda. (Paraopeba - MG) e o último da Celulose Nipo-Brasileira CENIBRA (Belo Oriente - MG).

4.2 Amostragem e preparo do material

Cada clone foi representado por três indivíduos com diâmetro médio do povoamento. De cada indivíduo foi retirado um torete de um metro de comprimento, que inclui a altura do DAP (1,30 metros do solo), como mostrado na Figura 1.

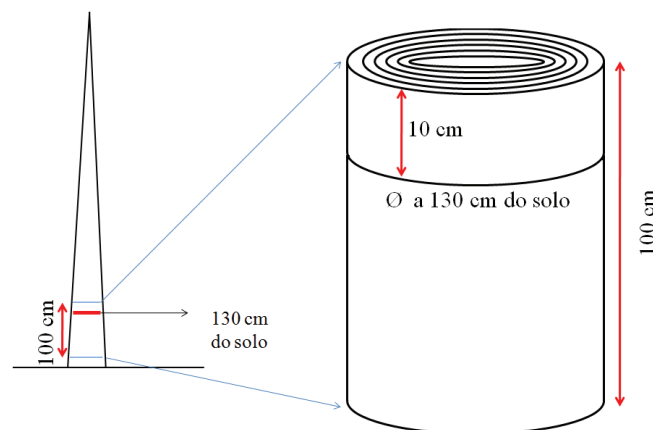


Figura 1 Esquema gráfico para amostragem da madeira destinado às análises laboratoriais

Cada torete foi processado mecanicamente com o objetivo de obter um pranchão central de 4 cm de espessura e 100 cm de comprimento. Estes, por sua vez, foram subdivididos longitudinal e radialmente de forma a obter as amostras destinadas à avaliação laboratorial. A subdivisão do pranchão central foi planejada de modo a se obter materiais destinados à análise química, física, anatômica e carbonização em três posições radiais distintas: próximo à medula (Interno), próximo ao câmbio (Externo) e uma posição entre as duas anteriores (Intermediário). A Figura 2 apresenta graficamente a forma pela qual os pranchões centrais foram subdivididos.

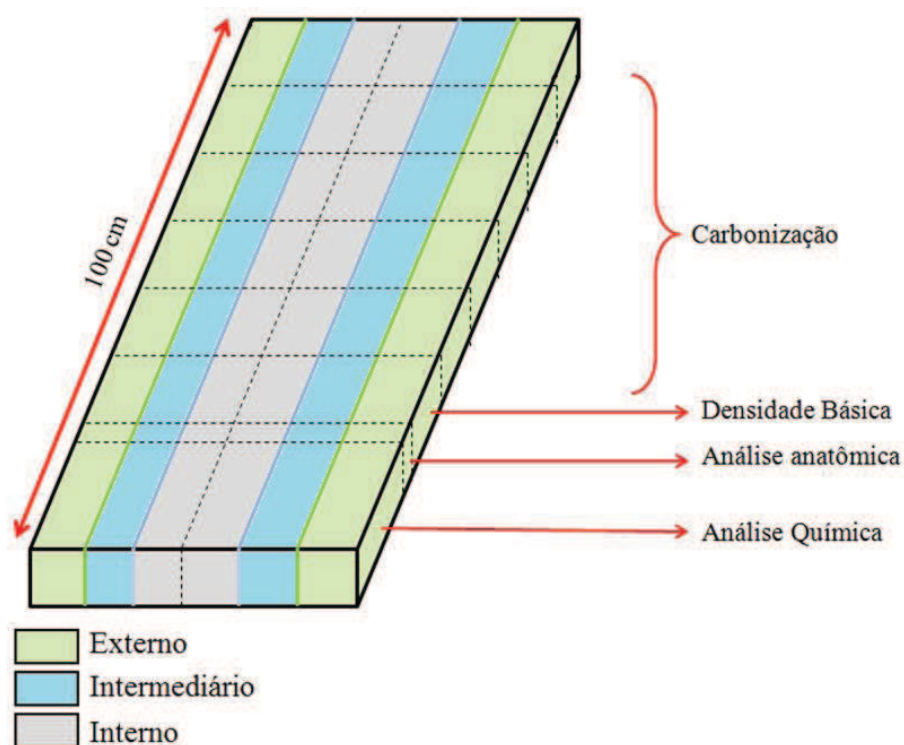


Figura 2 Esquema gráfico da subdivisão do pranchão central para retirada da madeira para avaliação física, química, anatômica e carbonização

Os materiais destinados à determinação da densidade básica e anatomia foram mantidos submersos em água para evitar a desidratação. As amostras destinadas à análise química foram retiradas com auxílio de uma plaina elétrica. As maravalhas obtidas foram moídas em moinho tipo Willey para redução dimensional. Estas por sua vez foram classificadas com auxílio de um conjunto de peneiras, sendo que cada fração foi destinada a análises diferentes como mostra a Figura 3. As partículas devidamente classificadas foram acondicionadas em câmara climática a $60 \pm 5\%$ de umidade relativa e 20 ± 3 °C para estabilização da sua umidade em torno de 12%.

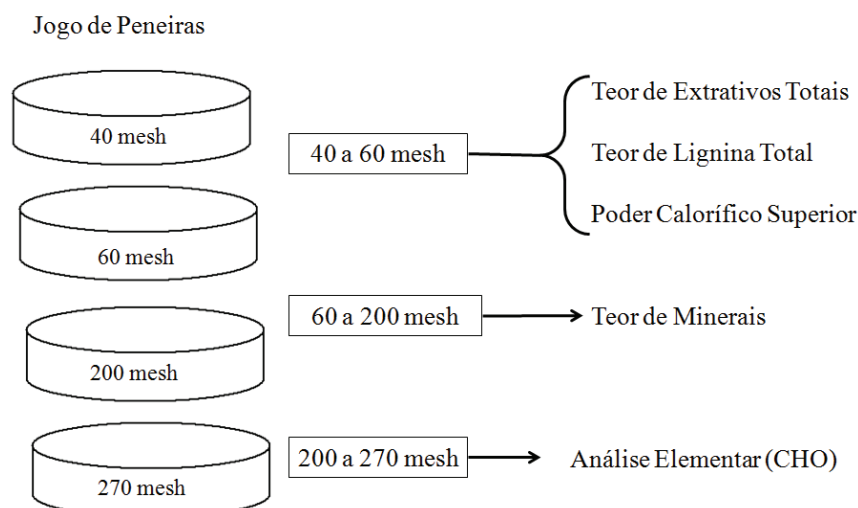


Figura 3 Classificação das partículas em função da granulometria

4.3 Caracterização da madeira

As propriedades físicas, químicas, anatômicas e energéticas da madeira utilizada foram avaliadas segundo diretrizes normativas citadas a seguir.

4.3.1 Determinação da densidade básica

A densidade básica da madeira foi determinada segundo a norma analítica NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2003b).

4.3.2 Caracterização química da madeira

Para a caracterização química do material utilizado foram determinadas as concentrações dos principais componentes químicos da madeira, como

extrativos totais, lignina total, minerais e holocelulose segundo normativas analíticas e procedimentos listados na Tabela 1.

Tabela 1 Normas analíticas utilizadas na determinação da concentração dos principais componentes químicos da madeira

Análise	Normativa analítica
Teor de extrativos totais	NBR 14853 (ABNT, 2003d)
Teor de minerais	NBR 13999 (ABNT, 2003c)
Teor de lignina insolúvel	NBR 7989 (ABNT, 2003a)
Teor de lignina solúvel	Goldschimid (1971)
Teor de holocelulose	Diferença entre os demais componentes químicos estruturais.

Para determinação da composição química elementar das amostras foram utilizados dois miligramas de material com granulometria entre 200 e 270 mesh, que foram secos em estufa a $103\pm 2^\circ\text{C}$. A massa de serragem foi envolta em uma película de estanho e, posteriormente, foi acondicionada em analisador elementar.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados na determinação do teor de carbono, hidrogênio e oxigênio elementares dos materiais.

Tabela 2 Parâmetros de análise da composição elementar

Parâmetros de análise	
Temperatura do tubo de combustão	1150 °C
Temperatura do tubo de redução	850 °C
Gás de arraste	Hélio (99,99%)
Fluxo do gás de arraste	200 ml.min ⁻¹
Gás oxidante	Oxigênio (99,99%)
Fluxo do gás oxidante durante análise	10 ml.min ⁻¹
Fluxo do gás oxidante durante a combustão	35 ml.min ⁻¹
Pressão interna do sistema	1350±100 mbar

Desta forma, foram obtidos os teores em carbono, hidrogênio, e oxigênio das amostras.

4.3.3 Caracterização anatômica da madeira

Os materiais destinados à análise anatômica foram usinados de forma a ficarem perfeitamente orientados nos três planos de corte: transversal, tangencial e radial. Cada corpo de prova detinha dimensões lineares de 1,5x1,5x1,5cm. Para montagem das lâminas histológicas foi utilizada a metodologia descrita por Johansen (1940) e para preparo do macerado utilizou-se metodologia descrita por Franklin (1945).

As características anatômicas avaliadas foram: comprimento da fibra, largura da fibra, diâmetro do lume da fibra, espessura da parede da fibra (Equação 1), fração parede da fibra (Equação 2), diâmetro de elemento de vaso e frequência de vaso. As cinco primeiras são características obtidas com o material macerado e as duas últimas nas lâminas histológicas. Em cada parâmetro avaliado foram realizadas 30 medições por amostra.

$$EPF = \frac{LF - DLF}{2} \quad (1)$$

$$FPF = \left(\frac{LF - DLF}{LF} \right) \times 100 \quad (2)$$

Em que: EPF: espessura da parede da fibra (μm); LF: largura da fibra (μm); DLF: diâmetro do lume da fibra (μm) e FPF: fração parede da fibra (%).

4.3.4 Determinação do poder calorífico superior e densidade energética da madeira

O poder calorífico superior foi determinado em calorímetro conforme a norma NBR 8633 da ABNT (1983b). A densidade energética foi determinada pelo produto da densidade básica da madeira e poder calorífico superior da mesma, conforme a Equação 3.

$$DE = PCS \times DB \quad (3)$$

Em que: DE: densidade energética da madeira (cal.cm^{-3}); PCS: Poder calorífico superior da madeira (cal.g^{-1}) e DB: densidade básica da madeira (g.cm^{-3})

4.4 Carbonização do material

As amostras destinadas à carbonização foram mecanicamente processadas de modo a possuírem dimensões lineares de 2x2x2cm de comprimento, largura e espessura, respectivamente.

Os corpos de provas, no intuito de se evitar colapso, rachaduras e fissuras, foram secos de forma mais branda. Primeiramente, os corpos de prova foram expostos ao ar em uma câmara dotada de um condicionador de ar programado para fixar a temperatura interna em 20°C durante um período de 21 dias. Posteriormente, foram inseridos em estufa com circulação forçada de ar, a 50°C, por um período de sete dias. Finalmente os corpos de prova foram secos a 103°C até estabilização de suas massas.

A carbonização da madeira, previamente seca, foi realizada em forno tipo mufla a uma taxa de aquecimento de 100°C/hora e temperaturas finais de 350, 450 e 550°C, permanecendo nestas por um período de 30 minutos.

4.5 Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização química, física, mecânica e energética do carvão vegetal

A determinação do rendimento gravimétrico da carbonização, caracterização química, física, mecânica e energética do carvão vegetal foram realizadas segundo as diretrizes analíticas descritas a seguir.

4.5.1 Determinação do rendimento gravimétrico da carbonização

O rendimento gravimétrico da carbonização foi determinado pela relação entre a massa de carvão vegetal anidro e a massa seca de madeira enfiada conforme demonstrado na Equação 4.

$$RG = 100x \left(\frac{M_{\text{carvão seco}}}{M_{\text{madeira seca}}} \right) \quad (4)$$

Em que: RG: rendimento gravimétrico da carbonização (%); $M_{\text{carvão seco}}$: massa seca de carvão vegetal produzido (g) e $M_{\text{madeira seca}}$: massa seca de madeira enfiada (g)

4.5.2 Determinação da densidade relativa aparente do carvão vegetal

A densidade relativa aparente do carvão vegetal foi determinada segundo normativa analítica utilizada na determinação da densidade básica da madeira, NBR 11941 da ABNT (2003b), entretanto o carvão vegetal não foi

saturado com água e o fluido utilizado na mensuração do volume foi mercúrio líquido.

4.5.3 Determinação da qualidade química do carvão vegetal

Foi realizada a análise química imediata do carvão com intuito de determinar o teor de materiais voláteis, minerais e carbono fixo, por meio da norma NBR 8112 da ABNT (1983a).

A determinação dos teores elementares do carvão vegetal foi conduzida da mesma forma utilizada para madeira como descrito no item 4.3.2.

4.5.4 Determinação das propriedades mecânicas do carvão vegetal

O ensaio utilizado na caracterização mecânica dos materiais carbonizados consistiu basicamente em presionar uma semi esfera de 1 cm^2 de área diametral sobre o corpo de prova de carvão vegetal de dimensões lineares aproximadas de $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}$ de comprimento, largura e espessura, respectivamente, paralelamente ao eixo longitudinal das fibras e a uma velocidade constante de $0,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, até que o mesmo se rompa (Figura 4).

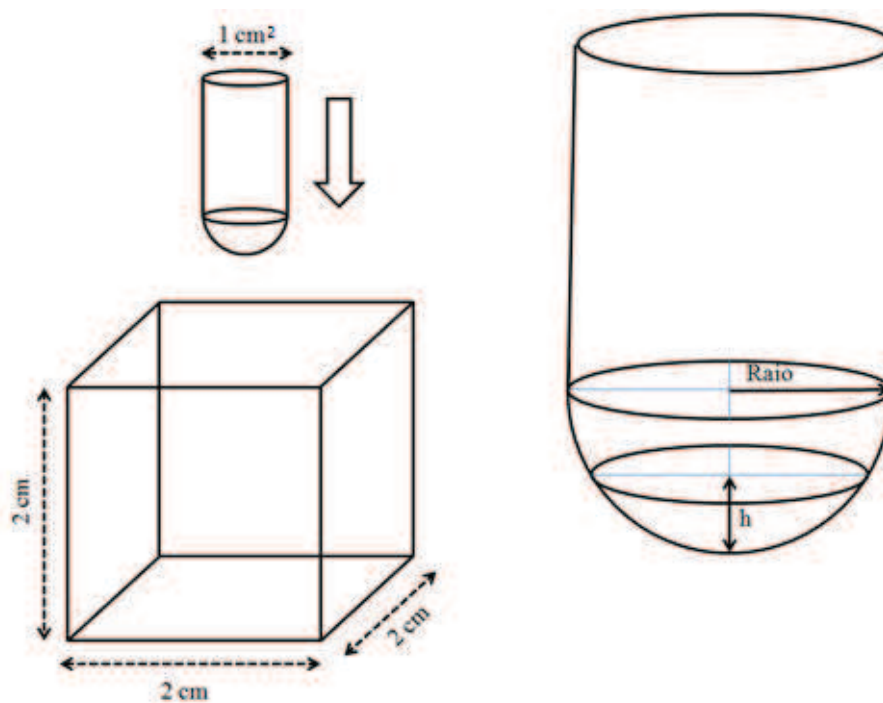


Figura 4 Esquema do ensaio de dureza janka adaptado

Existem trabalhos que utilizam o ensaio de compressão paralela ou normal das fibras para avaliação das propriedades mecânicas do carvão vegetal. Entretanto, este ensaio exige que os corpos de prova sejam perfeitamente prismáticos, o que é um limitante, uma vez que o material biológico deforma durante o processo de carbonização. Assim, há a necessidade de processamento mecânico objetivando a correção dos desvios dimensionais do corpo de prova tornando-o perfeitamente prismático. Processamento este que pode causar alterações na estrutura interna do carvão vegetal, que já não é um material livre de defeitos por natureza. Outro ponto observado é que o corpo de prova de carvão vegetal perde arestas durante o ensaio de compressão, alterando assim a área de aplicação da carga. Logo, a tensão altera de uma forma que não é

corretamente computada. Portanto, o ensaio utilizado pode ser uma alternativa mais facilmente aplicável pela não necessidade de processamento mecânico do corpo de prova de carvão vegetal e pelo maior controle da área de aplicação da carga.

O carvão vegetal, diferentemente da madeira, não permanece íntegro durante a completa penetração da semi esfera. Ele se rompe em diferentes estágios de penetração. Logo, não há como comparar a carga suportada em uma profundidade de penetração específica, uma vez que a área de contato entre a semi esfera e o corpo de prova de carvão vegetal não é constante no instante do colapso estrutural do corpo de prova.

A estratégia para solucionar o desafio supracitado foi relacionar a carga aplicada e a área de contato entre a semi esfera e o corpo de prova durante o ensaio. A relação entre a carga e a área de contato resulta na tensão aplicada sobre o corpo de prova, assim é possível reproduzir uma curva de tensão/profundidade de penetração do ensaio mecânico. Com os dados de tensão aplicada e profundidade de penetração foi possível determinar um índice relativo à resistência à penetração da semi esfera (RP) e à tensão máxima suportada.

A área de contato entre a semi esfera e o corpo de prova de carvão vegetal, ou área da calota esférica, foi determinada pela Equação 5.

$$AC = 2\pi Rh \quad (5)$$

Em que: AC: área de contato entre a semi esfera e o corpo de prova de carvão vegetal (cm²); R: raio da semi esfera (cm) e h é a profundidade de penetração da semi esfera no corpo de prova de carvão vegetal.

A Figura 5 apresenta um exemplo de gráfico produzido em um dos ensaios realizados. Em um primeiro estágio há uma relação constante entre o incremento de tensão e penetração da semi esfera. Esta constante é relativa à

resistência à penetração da semi esfera no carvão vegetal, sendo esta determinada conforme a Equação 6. A resistência à penetração da semi esfera poderia ser portanto uma medida inferencial sobre a rigidez do carvão vegetal. No segundo estágio há uma tensão limite que o carvão vegetal suporta, nesta tensão há o colapso da estrutura do corpo de prova e o mesmo começa a não mais resistir à penetração da semi esfera. Mesmo após o colapso inicial, o corpo de prova continua suportando carga até que se rompe por completo.

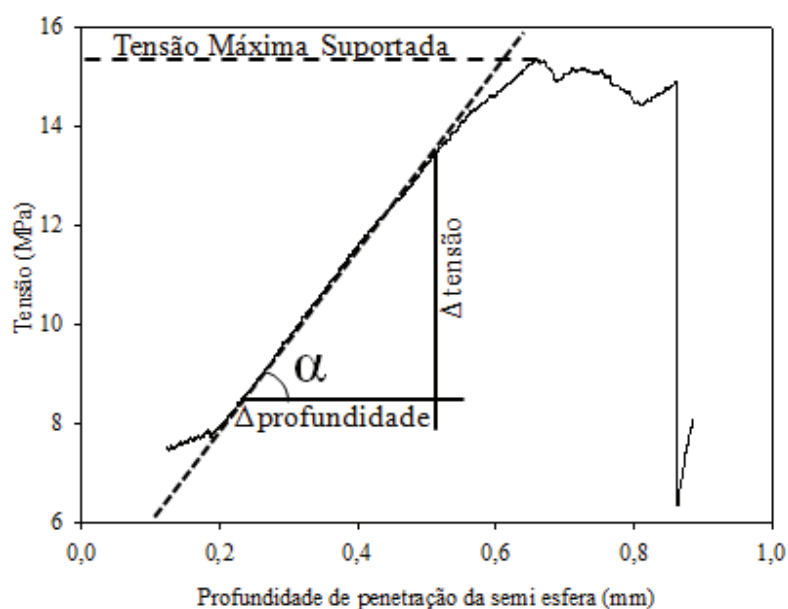


Figura 5 Gráfico da tensão em função da profundidade de penetração da semi esfera no carvão vegetal

$$RP = tg\alpha = \frac{\Delta\text{tensão}}{\Delta\text{profundidade de penetração}} \quad (6)$$

Em que: RP: Resistência à penetração da semi esfera no corpo de prova de carvão vegetal ($\text{MPa}\cdot\text{mm}^{-1}$); $tg\alpha$: tangente do ângulo α ; $\Delta_{\text{tensão}}$: variação da

tensão (MPa); $\Delta_{\text{profundidade de penetração}}$: variação da profundidade de penetração da semi esfera (mm).

4.5.5 Determinação do poder calorífico superior e densidade energética do carvão vegetal

O poder calorífico foi determinado em calorímetro conforme a norma NBR 8633 da ABNT (1983b). A densidade energética foi determinada pelo produto da densidade relativa aparente do carvão vegetal e poder calorífico superior do mesmo, conforme demonstrado na Equação 7.

$$DE = PCS \times DRA \quad (7)$$

Em que: DE: densidade energética do carvão vegetal (cal.cm^{-3}); PCS: Poder calorífico do carvão vegetal (cal.g^{-1}) e DRA: densidade relativa aparente do carvão vegetal (g.cm^{-3})

4.6 Análises estatísticas

Para a análise estatística das características físicas, químicas, anatômicas e energéticas dos materiais genéticos e posições radiais, foi utilizado o Delineamento Inteiramente Casualizado disposto em esquema fatorial com dois fatores, sendo três níveis para ambas as fontes de variação (Materiais genéticos e Posições Radiais) com seis repetições por tratamento. Para comparação múltipla de médias foi utilizado o teste Scott-Knott ao nível de 5% de significância. O modelo estatístico utilizado é dado por:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Em que:

Y_{ikj} é o valor observado na parcela experimental que recebeu o nível i ($i=1, 2$ e 3) do fator α e o nível j ($j=1, 2$ e 3) do fator β na repetição k ($k=1, 2, 3, 4, 5$ e 6);

μ representa uma constante comum a todas as observações;

α_i é o efeito do nível i do fator α (*material genético*);

β_j é o efeito do nível j do fator β (*posição radial*);

$\alpha\beta_{ij}$ é o efeito da interação entre o nível i do fator α e o nível j do fator β ;

ε_{ijk} é o erro experimental.

Para a avaliação da influência da variação dos parâmetros de carbonização, material genético e posição radial sobre a qualidade do carvão vegetal foi utilizado o Delineamento Inteiramente Casualizado disposto em esquema fatorial com três fatores, sendo três níveis para as três fontes de variação (Temperaturas finais de carbonização, Materiais genéticos e Posições radiais) com seis repetições por tratamento. Para comparação múltipla de médias foi utilizado o teste Scott-Knott ao nível de 5% de significância. O modelo estatístico utilizado é dado por:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \alpha\beta_{ij} + \alpha\gamma_{ik} + \beta\gamma_{jk} + \alpha\beta\gamma_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Em que:

Y_{ijkl} é o valor observado na parcela experimental que recebeu o nível i ($i=1, 2$ e 3) do fator α , o nível j ($j=1, 2$ e 3) do fator β e o nível k ($k=1, 2$ e 3) do fator γ na repetição l ($l=1, 2, 3, 4, 5$ e 6);

μ representa uma constante comum a todas as observações;

α_i é o efeito do nível i do fator α (*material genético*);

β_j é o efeito do nível j do fator β (*posição radial*);

γ_k é o efeito do nível k do fator γ (temperatura final de carbonização);
 $\alpha\beta_{ij}$ é o efeito da interação entre o nível i do fator α e o nível j do fator β ;
 $\alpha\gamma_{ik}$ é o efeito da interação entre o nível i do fator α e o nível k do fator γ ;
 $\beta\gamma_{jk}$ é o efeito da interação entre o nível j do fator β e o nível k do fator γ ;
 $\alpha\beta\gamma_{ijk}$ é o efeito da interação entre o nível i do fator α , o nível j do fator β
e o nível k do fator γ ;
 ε_{ijklm} é o erro experimental.

Para a avaliação da influência dos parâmetros anatômicos da madeira sobre a densidade básica, influência da densidade básica e parâmetros anatômicos sobre as propriedades do carvão vegetal foi utilizada a análise de correlação linear de Pearson e regressão linear simples.

Os modelos ajustados entre as propriedades da madeira e propriedades do carvão vegetal foram qualificados em função da significância dos coeficientes de regressão, pelo teste t, significância da regressão, pelo teste F, adequação aos pressupostos residuais de normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e homocedasticidade residual (Goldfeld-Quandt) e coeficiente de determinação ajustado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para facilitar o entendimento os resultados foram apresentados e discutidos em sete tópicos principais: (5.1) caracterização física, química e anatômica da madeira; (5.2) caracterização física, química e mecânica do carvão vegetal; (5.3) influência das propriedades anatômicas sobre a densidade básica da madeira; (5.4) influência da composição química elementar da madeira sobre as propriedades do carvão vegetal; (5.5) influência dos principais componentes químicos da madeira sobre as propriedades do carvão vegetal; (5.6) influência das propriedades anatômicas e densidade básica da madeira sobre as propriedades do carvão vegetal; e (5.7) influência da densidade relativa aparente sobre as propriedades mecânicas do carvão vegetal.

5.1 Caracterização física, química e anatômica da madeira

Os valores médios juntamente com o coeficiente de variação das propriedades químicas, anatômicas e da densidade básica da madeira de cada material genético podem ser visualizados no Anexo A.

A Tabela 3 apresenta o resumo da análise de variância dos dados de densidade básica da madeira. Observa-se que entre as fontes de variação presentes na análise, apenas a interação dentre as fontes de variação anteriormente citadas não apresentou significância estatística, inferindo não existir dependência entre materiais genético e posição radial de amostragem. Observa-se ainda que a análise de variância apresentou baixo coeficiente de variação experimental (8,43%), indicando que a escolha do delineamento utilizado foi adequada.

Tabela 3 Resumo da análise de variância para densidade básica da madeira

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	
Material Genético (MG)	2	0,09	*
Posição Radial (PR)	2	0,03	*
MG x PR	4	0,00	ns
Erro	45	0,00	
CV _{exp} (%)		8,43	

GL: Graus de liberdade; CV_{exp} (%): Coeficiente de variação experimental; ns: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

As Figuras 6 e 7 apresentam o comportamento da densidade básica entre os materiais genéticos e o padrão de variação radial da densidade básica, respectivamente. Notas-se que o clone *C. citriodora* apresentou maior densidade básica comparada aos demais materiais, seguido do VM04 e MN463, respectivamente. Observa-se na Figura 7 que há um incremento da densidade básica no sentido medula-câmbio.

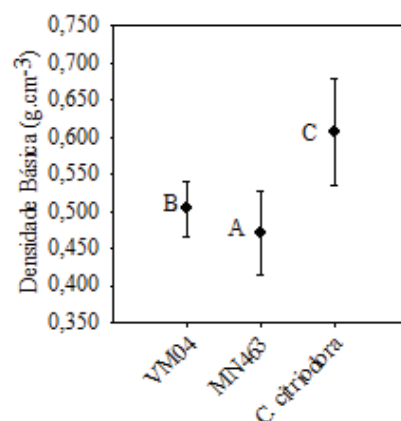


Figura 6 Valores médios de densidade básica para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

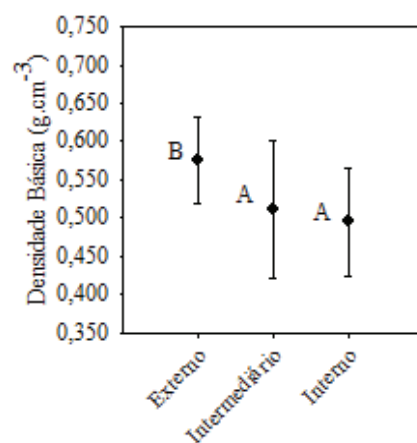


Figura 7 Valores médios de densidade básica para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

O incremento da densidade básica no sentido medula-câmbio é explicada com base em dois fenômenos. Na fase inicial de crescimento do indivíduo as células do câmbio apresentam uma maior atividade. Assim, as células produzidas não possuem o período necessário para que haja espessamento da parede celular, refletindo assim na formação de fibras de paredes mais finas (TREVISAN et al., 2008). Logo, a madeira produzida nos períodos iniciais de crescimento é formada por células de paredes mais delgadas e, conseqüentemente, de menor densidade básica.

Outro fator influente no padrão de variação radial da densidade básica é proporção lenho inicial e tardio. Nas proximidades da medula há presença de uma maior proporção de lenho inicial, que apresenta uma menor densidade comparada ao lenho tardio. Portanto, há uma tendência da madeira próxima à medula apresentar uma menor densidade comparada à madeira próxima ao câmbio vascular (ZAMUDIO et al., 2002).

Santos et al. (2011) avaliando a madeira de três clones de híbridos de *Eucalyptus urophylla* aos seis anos de idade encontraram valores de densidade básica média variando de 0,479 a 0,529 g.cm⁻³. Sette Júnior et al. (2012) avaliando o efeito da idade e posição longitudinal nas propriedades físicas e mecânicas da madeira observaram um valor de densidade básica de 0,460g.cm⁻³ para a madeira de *Eucalyptus grandis* aos 72 meses de idade. Os valores de densidade básica da madeira oriunda dos clones VM04 (0,503g.cm⁻³) e MN463 (0,471g.cm⁻³) encontram-se dentro da variação observadas pelos autores anteriormente citados. A madeira de *C. citriodora* apresentou densidade superior (0,606g.cm⁻³) em relação às literaturas mencionadas.

A Tabela 4 apresenta o resumo da análise de variância para a composição dos principais componentes químicos da madeira. Nota-se que para todas as variáveis houve efeito significativo da interação entre as fontes de variação Material Genético e Posição radial. Interação significativa indica que existe dependência entre os fatores e, assim, deve-se proceder ao seu desdobramento e avaliação de um efeito dentro do outro.

Tabela 4 Resumo da análise de variância dos dados para os principais componentes químicos da madeira

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio			
		EXT	LIG	MIN	HOL
Material genético (MG)	2	98,87 *	175,35 *	0,41 *	7,91 *
Posição radial (PR)	2	28,53 *	50,51 *	0,02 ^{ns}	152,82 *
MG x PR	4	17,47 *	7,64 *	0,03 *	15,54 *
Erro	45	0,71	2,17	0,01	2,25
CV _{exp} (%)		14,82	4,99	34,19	2,33

GL: Graus de liberdade; CV_{exp} (%): Coeficiente de variação experimental; EXT: Teor de extrativos totais; LIG: Teor de lignina total; MIN: Teor de minerais; HOL: Teor de holocelulose; ^{ns}: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

A Figura 8 apresenta o padrão de variação radial da concentração em extrativos totais para cada material genético. A Tabela 5, por sua vez, apresenta o desdobramento da interação das posições radiais dentro de cada material genético por meio dos valores médios do teor de extrativos totais juntamente com a classificação do teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$). Nota-se que para os materiais MN463 e VM04 não houve diferença estatística significativa para a concentração de extrativos totais nas posições radiais consideradas. Nota-se ainda que a concentração destes compostos é semelhante entre estes dois materiais genéticos.

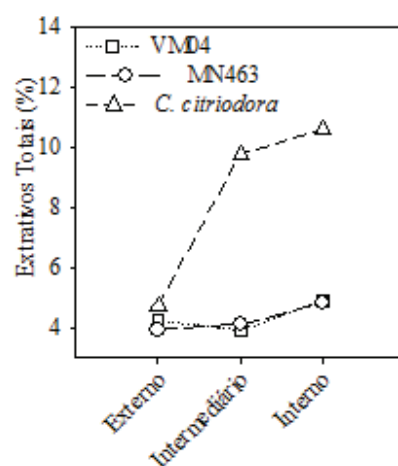


Figura 8 Padrão de variação radial do teor de extrativos totais para os três materiais genéticos avaliados

Tabela 5 Valores médios da concentração em extrativos totais dos materiais genéticos em cada posição radial e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Material Genético	Posição Radial	Extrativos Totais (%)	
<i>C. citriodora</i>	Externo	4,73	A
	Intermediário	9,77	B
	Interno	10,61	B
MN463	Externo	3,92	A
	Intermediário	4,10	A
	Interno	4,83	A
VM04	Externo	3,91	A
	Intermediário	4,23	A
	Interno	4,88	A

Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

A variação radial do teor em extrativos totais para o material *C. citriodora* apresentou comportamento diferenciado comparado aos demais materiais genéticos. Sendo que, neste material, a madeira mais próxima ao câmbio vascular apresentou um menor teor em extrativos totais. Isto é devido ao processo de cernificação da madeira. A medida que a fibra apresenta um período maior de vida, tem-se o início do processo de cernificação. A transformação da madeira do alburno em cerne é caracterizada pela morte das células do raio, consumo dos compostos de reserva e impregnação por compostos extrativos na parede celular da fibra (HIGUCHI, 1997). Logo, a madeira mais afastada do câmbio vascular tende a apresentar maiores concentrações em extrativos totais.

Andrade et al. (2011) avaliando a eficiência da técnica de espectroscopia na região do infravermelho próximo (NIRS) para predição da concentração dos componentes químicos da madeira de híbridos naturais de *Eucalyptus urophylla* aos sete anos de idade, encontraram um valor médio de 5,2% para a concentração de extrativos totais. Milagres et al. (2013) em estudo similar,

observaram um teor médio de 3,1% de extrativos totais na madeira de *Eucalyptus* spp. também aos sete anos de idade. Os valores médios de extrativos totais encontrados nos materiais VM04 e MN463 assemelharam-se aos valores referenciais anteriormente citados. O mesmo não pode ser dito para a madeira de *C. citriodora*, que apresentou maiores valores para o teor de extrativos totais principalmente nas posições interna e intermediária .

A Figura 9 representa o padrão de variação radial do teor de lignina total para os três materiais genéticos. Nota-se que há uma tendência da madeira mais próxima à medula apresentar maior concentração deste composto. Tal comportamento é visualizado para os três clones, entretanto é mais evidente para o clone VM04. Nota-se ainda que o clone *C. citriodora* apresentou teores inferiores em lignina total comparado aos demais materiais genéticos. A Tabela 6 apresenta o desdobramento da interação das posições radiais dentro de cada material genético por meio dos valores médios da concentração em lignina total juntamente com a classificação obtida pelo teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

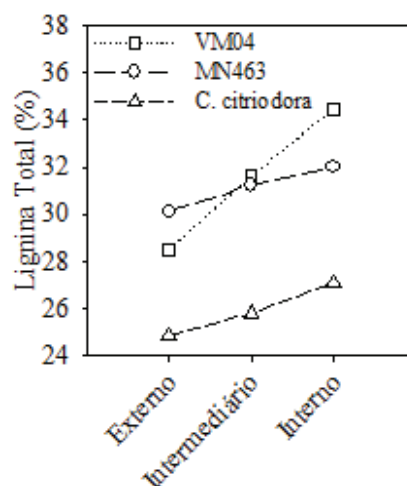


Figura 9 Padrão de variação radial do teor de lignina para os três materiais genéticos avaliados

Tabela 6 Valores médios do teor de lignina total dos materiais genéticos em cada posição radial e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Material Genético	Posição Radial	Lignina Total (%)	
<i>C. citriodora</i>	Externo	24,87	A
	Intermediário	25,82	A
	Interno	27,08	A
MN463	Externo	30,11	A
	Intermediário	31,22	A
	Interno	32,01	A
VM04	Externo	28,51	A
	Intermediário	31,61	B
	Interno	34,45	C

Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

Tal comportamento é possivelmente devido à fisiologia da célula vegetal. Madeira juvenil tende a apresentar maior teor de lignina comparada à madeira adulta. Portanto a madeira formada há mais tempo, ou nos primeiros

momentos do crescimento, detém maior concentração em lignina (TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996).

Sousa et al. (2011) trabalhando com 3639 amostras de madeira de *Eucalyptus* spp. aos sete anos de idade, observou valores teor de lignina total variando de 21,4 a 33,8%. Os teores de lignina total observados neste estudo estão dentro do intervalo observado por Sousa et al. (2011), com exceção apenas para o teor médio encontrado para a posição mais interna do clone VM04 (34,45%).

A Figura 10 apresenta o padrão de variação radial do teor de materiais inorgânicos para os três materiais genéticos considerados. Observa-se que não há um padrão comportamental definido no sentido medula-câmbio para estes compostos químicos. Enquanto o clone *C. citriodora* apresentou uma tendência de incremento do teor de minerais no sentido câmbio-medula, o clone VM04 apresentou um comportamento contrário considerando o mesmo sentido. O material MN463 apresentou menor teor na posição intermediária entre a medula e o câmbio vascular. A Tabela 7 apresenta os valores médios da concentração de minerais dos clones para as três posições radiais consideradas, juntamente com a classificação segundo teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

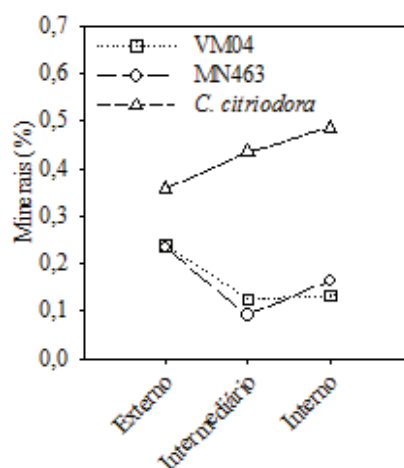


Figura 10 Variação radial do teor de minerais para os três materiais genéticos

Tabela 7 Valores médios do teor de minerais dos materiais genéticos em cada posição radial e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Material Genético	Posição Radial	Minerais (%)	
<i>C. citriodora</i>	Externo	0,36	A
	Intermediário	0,43	A
	Interno	0,49	A
MN463	Externo	0,23	B
	Intermediário	0,09	A
	Interno	0,16	B
VM04	Externo	0,24	B
	Intermediário	0,13	A
	Interno	0,13	A

Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

Os componentes inorgânicos presentes na madeira são, em sua maioria, compostos por oxalatos, carbonatos e sílica. Suas concentrações são consequência das condições ambientais, edáficas e tratos silviculturais a que o

vegetal foi exposto durante seu crescimento (BUCHANAM, 1981). Tal fato pode explicar a diferença comportamental dos clones, pois o material *C. citriodora* é oriundo de uma microrregião distinta dos demais materiais.

Neves et al. (2011) avaliando o potencial de três clones, de localidades distintas, para produção de carvão vegetal encontraram valores do teor de materiais inorgânicos variando de 0,15 a 0,25%. Couto et al. (2013) utilizando estatística multivariada para seleção de materiais superiores objetivando a produção de carvão vegetal, encontraram valores relativos ao teor de minerais variando de 0,18 a 0,33%. Os teores de compostos minerais observados na madeira de *C. citriodora* deste estudo mostraram-se superiores às concentrações observadas pelos autores anteriormente citados. A madeira oriunda dos clones VM04 e MN463 apresentaram concentração de inorgânicos variando de 0,09 a 0,24%, concentrações semelhantes às observadas por Couto et al. (2013) e Neves et al. (2011).

A Figura 11 apresenta o padrão de variação radial do teor de holocelulose dos três materiais genéticos. Observa-se uma clara tendência de acréscimo do teor deste componente no sentido medula-câmbio. A Tabela 8 apresenta as médias do teor de holocelulose para as posições radiais para cada material genético juntamente com a classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

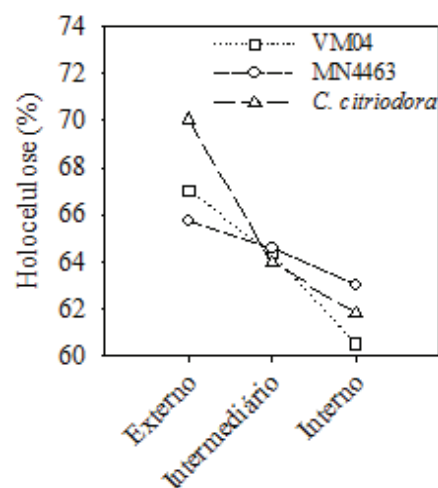


Figura 11 Padrão de variação radial do teor de holocelulose para os três materiais genéticos

Tabela 8 Valores médios da concentração em holocelulose dos materiais genéticos em cada posição radial e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Material Genético	Posição Radial	Holo (%)	
<i>C. citriodora</i>	Externo	70,04	C
	Intermediário	63,97	B
	Interno	61,83	A
MN463	Externo	65,73	B
	Intermediário	64,59	B
	Interno	63,00	A
VM04	Externo	67,02	C
	Intermediário	64,35	B
	Interno	60,54	A

Holo: Holocelulose. Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

A variação radial do teor de holocelulose é possivelmente explicado pelo pensamento semelhante, porém oposto ao comportamento da variação radial da

concentração de lignina total. Madeira juvenil apresenta maior concentração em lignina, em decorrência disto o teor de holocelulose tende a ser menor. Assim sendo madeira mais próxima à medula tende a apresentar menor teor de holocelulose.

Santos et al. (2011), avaliando as correlações entre as características do carvão vegetal e as propriedades da madeira de quatro clones de *Eucalyptus*, observaram um valor médio de 65% de holocelulose na madeira. Andrade et al. (2011), avaliando uma técnica não destrutiva para estimativa do teor dos componentes químicos presentes na madeira, encontraram um valor médio de 66,60% de holocelulose na madeira oriunda de híbridos naturais de *Eucalyptus urophylla* aos sete anos de idade. As concentrações de holocelulose observadas neste estudo encontram-se próximas aos valores referenciados pelos autores supracitados.

A Tabela 9 apresenta o resumo da análise de variância para a composição química elementar da madeira. Observa-se que para o teor de carbono e oxigênio elementar houve diferença estatística significativa para a fonte de variação posição radial, enquanto que para o teor de hidrogênio houve diferença estatística significativa para a fonte de variação material genético. Nenhuma das características elementares apresentou efeito significativo da interação.

Tabela 9 Resumo da análise de variância dos dados para os principais componentes químicos elementares da madeira

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio					
		C		H		O	
Material genético (MG)	2	0,84	^{ns}	0,14	*	1,19	^{ns}
Posição radial (PR)	2	10,35	*	0,01	^{ns}	12,59	*
MG x PR	4	0,03	^{ns}	0,02	^{ns}	0,03	^{ns}
Erro	45	0,44		0,01		0,77	
CV_{exp} (%)		1,34		1,87		2,05	

GL: Graus de liberdade; CV_{exp} (%): Coeficiente de variação experimental; C: Teor de carbono elementar; H: Teor de hidrogênio elementar; O: Teor de oxigênio elementar; ^{ns}: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

As Figuras 12 e 13 apresentam o padrão de variação radial do teor de carbono e oxigênio, respectivamente. Há uma clara tendência de decréscimo do teor de carbono no sentido medula-câmbio, comportamento oposto foi observado para o teor de oxigênio. Tal padrão de variação é possivelmente devido ao padrão de variação radial observado para o teor de lignina. Na madeira próxima à medula há a ocorrência de um maior teor de lignina, que por sua vez detém uma maior quantidade de átomos de carbono e menor de oxigênio (VELOSO; NASCIMENTO; MORAIS, 1993). Portanto, madeira mais próxima à medula apresentará maior teor de lignina e conseqüentemente maior teor de carbono e menor de oxigênio.

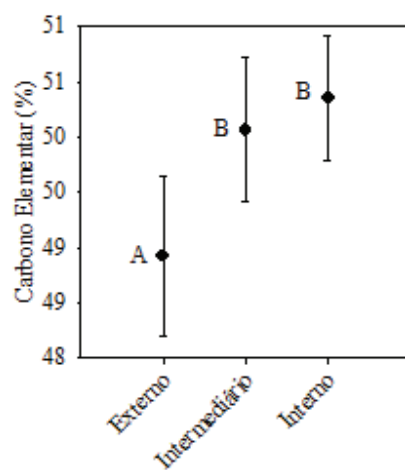


Figura 12 Valores médios de concentração em carbono elementar para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

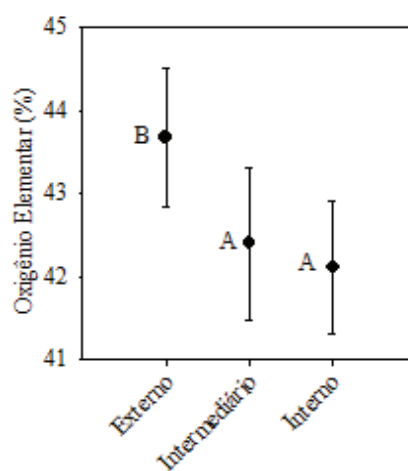


Figura 13 Valores médios de concentração em oxigênio elementar para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

A Figura 14 apresenta os valores médios do teor de hidrogênio dos materiais genéticos juntamente com a classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$). Observa-se que o material MN463 apresentou menor teor de hidrogênio elementar comparado aos demais materiais genéticos.

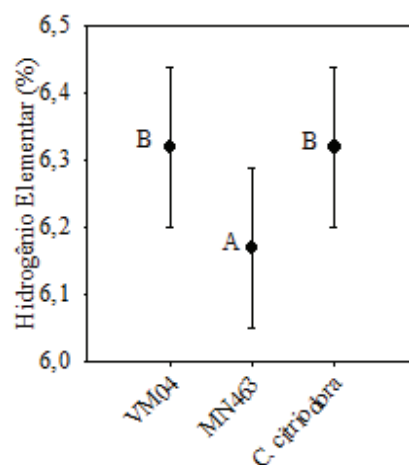


Figura 14 Valores médios da concentração em hidrogênio elementar para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Santos et al. (2012), em estudo objetivando estimar a massa de carbono e energia contida em clones de *Eucalyptus*, encontraram teor de carbono elementar variando de 45,81 a 48,59%. Couto et al. (3013), avaliando técnicas estatísticas multivadas para seleção de materiais genéticos, observaram teor de carbono variando de 47,65 a 50,30%. Este mesmo autor ainda observou teores elementares de hidrogênio e oxigênio variando de 6,16 a 6,44% e 43,16 a 45,84%, respectivamente. As concentrações elementares de carbono, hidrogênio

e oxigênio observadas neste estudo estão de acordo com as concentrações elementares observadas em outros estudos.

A Tabela 10 apresenta o resumo da análise de variância para o poder calorífico superior e densidade energética dos materiais de estudo. Observa-se que as duas variáveis apresentaram diferença estatística significativa para as fontes de variação Material genético e Posição radial. Observa-se ainda que o efeito da interação foi não significativo.

Tabela 10 Resumo da análise de variância dos dados para o poder calorífico superior e densidade energética da madeira

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	
		PCS	DE
Material genético (MG)	2	34889 *	2110574 *
Posição radial (PR)	2	31110 *	531275 *
MG x PR	4	4598 ^{ns}	83604 ^{ns}
Erro	45	2238	36938
CV _{exp} (%)		1,03	7,95

GL: Graus de liberdade; CV_{exp} (%): Coeficiente de variação experimental; PCS: Poder calorífico superior; DE: Densidade energética; ^{ns}: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

As Figuras 15 e 16 apresentam os valores médios de poder calorífico superior, juntamente com a classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$) para material genético e posição radial, respectivamente. Observa-se que o material MN463 apresentou menor valor calórico comparado aos demais materiais genéticos. Observa-se ainda que há uma tendência de decréscimo do valor calórico no sentido medula-câmbio.

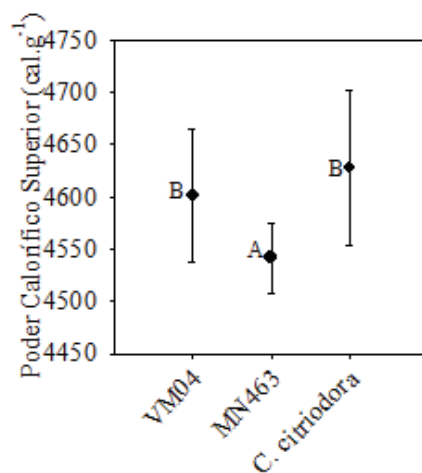


Figura 15 Valores médios de poder calorífico superior para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

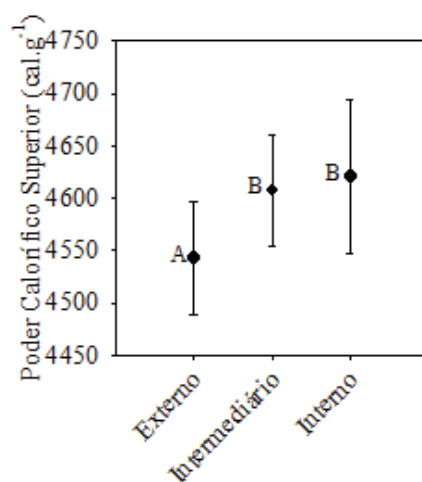


Figura 16 Valores médios de poder calorífico superior para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

O menor valor calórico apresentado pelo clone MN463 possivelmente é devido ao menor teor de hidrogênio elementar presente neste material. O hidrogênio é um elemento químico que libera altas quantidades de energia quando passa pelo processo de combustão. Logo, materiais com menor teor deste elemento tendem a apresentar menor valor calórico.

O padrão de variação radial do poder calorífico superior pode ser explicado pelo teor de carbono elementar presente nas amostras. Como o hidrogênio, o carbono também é considerado um elemento de caráter combustível. Logo, maiores teores deste elemento tendem a contribuir com o incremento do valor calórico da amostra, desde que não haja alteração no teor de hidrogênio. Há uma tendência de redução do teor de carbono no sentido medula-câmbio, comportamento semelhante ao poder calorífico superior. Portanto, materiais com maior teor de carbono apresentam maiores valores em poder calorífico superior.

Oliveira et al. (2012), avaliando o efeito de desbaste sobre as propriedades da madeira e carvão vegetal, observaram valores calóricos variando de 4767 a 4913 cal.g⁻¹ na madeira de um híbrido de *Eucalyptus* aos 55 meses. Os valores calóricos encontrados na madeira utilizada deste estudo foram inferiores aos observados pelos autores citados. Tal discordância nos valores observados é possivelmente devido à menor idade do material referente ao trabalho utilizado na comparação com este estudo. Madeira juvenil apresenta maiores concentrações em carbono, logo tende a apresentar maior valor calórico.

As Figuras 17 e 18 apresentam os valores médios de densidade energética juntamente com a classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$) para os materiais genéticos e posição radial respectivamente. O material *C. citriodora* apresentou maior densidade energética seguida do material VM04 e MN463. Há uma clara tendência de incremento desta propriedade no sentido medula-câmbio.

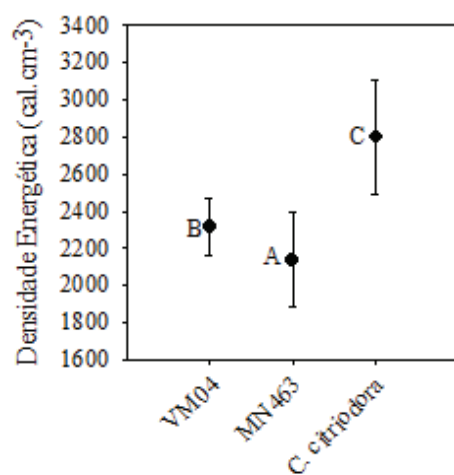


Figura 17 Valores médios da densidade energética para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

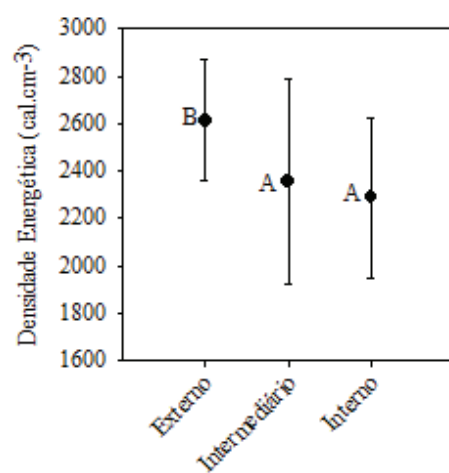


Figura 18 Valores médios de densidade energética para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

A densidade energética é o produto da multiplicação do poder calorífico superior e densidade básica do material. Sabe-se que o valor calórico apresenta baixa variação, ao contrário, a densidade básica apresenta uma maior variabilidade. Portanto, a densidade básica exerce maior influência sobre esta propriedade comparado ao poder calorífico superior.

Assim sendo, tanto o padrão de variação radial da densidade energética, quanto a variação desta entre os materiais genéticos, assemelham-se ao comportamento da densidade básica.

Protásio et al. (2013), em trabalhos com clones de *Eucalyptus* aos 42 meses observaram valores de densidade energética variando de 2162 a 2574 cal.cm⁻³. Os valores observados neste estudo encontram-se dentro do intervalo encontrado pelo autor citado, com exceção apenas do material *C. citriodora*, que apresentou maiores valores em densidade energética. O fato explicativo para o material *C. citriodora* apresentar valores comparativamente superiores em densidade energética, está conexo ao fato de este material apresentar densidade básica elevada.

A Tabela 11 apresenta o resumo da análise de variância para as propriedades anatômicas: comprimento da fibra, largura da fibra e diâmetro do lume da fibra. Para todas as características houve diferença estatística significativa para as fontes de variação Material genético e Posição radial. Entretanto, apenas a variável largura da fibra apresentou efeito significativo da interação.

Tabela 11 Resumo da análise de variância para comprimento da fibra, largura da fibra e diâmetro do lume da fibra presentes na madeira

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio					
		C. fibra		L. fibra		D. lume	
Material genético (MG)	2	38202	*	29,89	*	52,96	*
Posição radial (PR)	2	358116	*	11,53	*	20,49	*
MG x PR	4	8417	ns	2,63	*	2,40	ns
Erro	45	4822		0,99		1,44	
CV _{exp} (%)		7,81		5,78		15,70	

GL: Graus de liberdade; CV_{exp} (%): Coeficiente de variação experimental; C. fibra: Comprimento de fibra; L. fibra: Largura de fibra; D. lume: Diâmetro do lume da fibra; e^{ns}: Diferença não significativa a 0,95 de probabilidade; e*: Diferença significativa a 0,95 de probabilidade.

As Figuras 19 e 20 apresentam os valores médios de comprimento de fibra bem como a classificação segundo teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$) para os materiais genéticos e variação radial respectivamente. Observa-se que o material *C. citriodora* apresentou maiores valores em comprimento da fibra. Há uma tendência de incremento desta variável no sentido medula-câmbio.

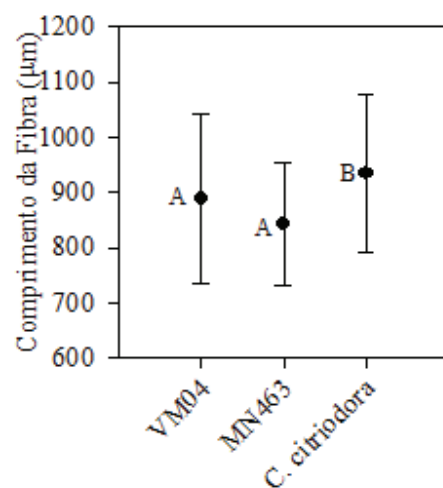


Figura 19 Valores médios de comprimento de fibra para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

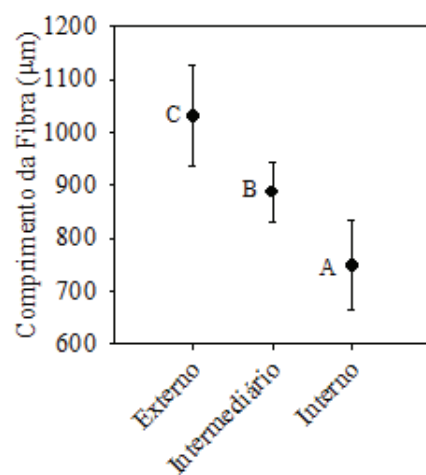


Figura 20 Valores médios de comprimento de fibra para as posição radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

O padrão de variação radial do comprimento da fibra é explicado pelo desenvolvimento das fibras durante o crescimento secundário do fuste. Madeira juvenil tende a apresentar fibras mais curtas comparadas à madeira adulta. Portanto, a madeira próxima à medula tende a apresentar fibras de menor comprimento.

Santos et al. (2011), em estudo visando correlacionar parâmetros físicos, químicos e anatômicos da madeira de *Eucalyptus* aos sete anos de idade com as propriedades do carvão vegetal, encontraram valores de comprimento de fibra variando de 1020 a 1120 μm . Lima et al. (2011) observaram valores da mesma propriedade anatômica variando de 800 a 1200 μm . Os valores de comprimento de fibra observados neste estudo estão próximos aos encontrados pelos autores citados.

A Figura 21 apresenta o padrão de variação do largura das fibras para os três materiais genéticos estudados. Não houve diferença estatística significativa para as posições radiais dos materiais *C. citriodora* e MN463. Já o material VM04 apresentou um incremento do diâmetro da fibra no sentido medula-câmbio.

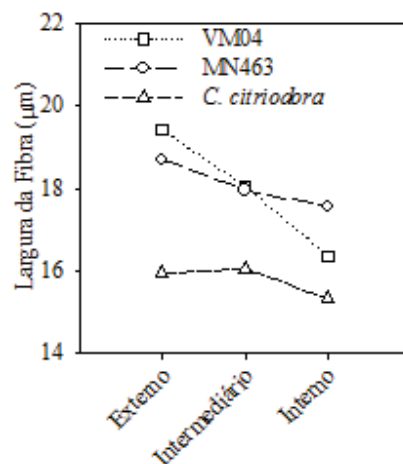


Figura 21 Padrão de variação radial da largura da fibra para os três materiais genéticos estudados

Tabela 12 Valores médios de largura da fibra dos materiais genéticos em cada posição radial e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Material Genético	Posição Radial	L. Fibras (µm)	
<i>C. citriodora</i>	Externo	15,94	A
	Intermediário	16,04	A
	Interno	15,32	A
MN463	Externo	18,68	A
	Intermediário	17,94	A
	Interno	17,56	A
VM04	Externo	19,40	C
	Intermediário	18,04	B
	Interno	16,36	A

L. fibras: Largura da fibra. Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

O padrão de variação radial da largura da fibra pode ser explicado de forma análoga à variável comprimento de fibra. À medida que o vegetal se desenvolve, há alterações dimensionais nas células iniciais fusiformes do câmbio

vascular. Estas por sua vez transferem as alterações adquiridas às suas células filhas. Assim sendo, há uma tendência de as fibras mais distantes da medula apresentarem maior diâmetro. Comportamento semelhante foi observado por Tomazello Filho (1987) ao estudar *E. globulus*, *E. pellita* e *E. acmenioides* aos 10 anos de idade. Vidaurre (2010), caracterizando anatomicamente a madeira de paricá, também observou o mesmo padrão de variação radial da largura das fibras.

Santos et al. (2011), avaliando o efeito das propriedades anatômicas da madeira sobre as propriedades do carvão vegetal, observaram valores em largura de fibra variando de 16,82 a 20,02 μ m. Valores semelhantes foram observados neste ensaio para a propriedade anatômica em questão.

As Figuras 22 e 23 apresentam os valores médios do diâmetro do lume da fibra juntamente com a classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$) para os materiais genéticos e posição radial respectivamente.

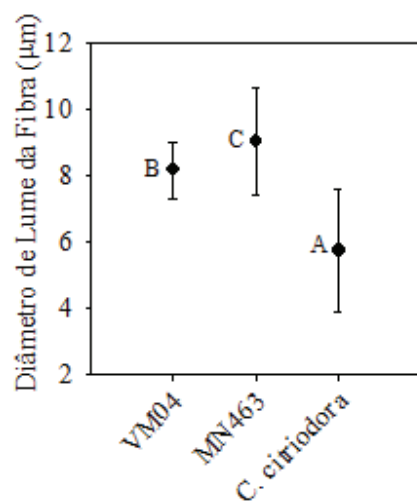


Figura 22 Valores médios de diâmetro do lume da fibra para os arterial genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

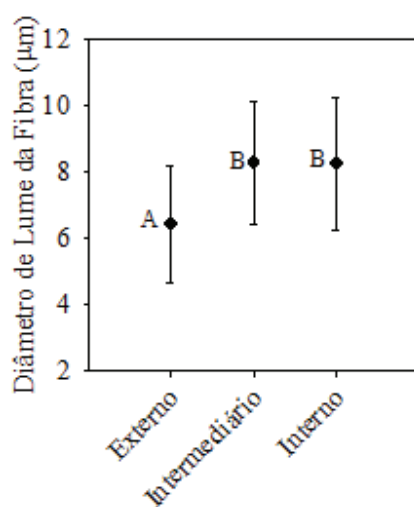


Figura 23 Valores médios de diâmetro de lume da fibra para s posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

O material MN463 apresentou o maior valor médio de diâmetro do lume da fibra, seguido pelo material VM04 e *C. citriodora*. Observa-se que os menores valores do diâmetro do lume da fibra ocorreram na madeira retirada da região mais afastada da medula.

Lemos et al. (2012), avaliando as propriedades físicas e anatômicas da madeira de *C. citriodora* aos 15 anos de idade, observaram valores de diâmetro de lume variando de 7,31 a 9,16 μ m. Santos et al. (2011), avaliando madeira de *Eucalyptus* aos sete anos, encontraram uma variação de 8,93 a 9,38 μ m para a mesma variável anatômica.

A Tabela 13 apresenta o resumo da análise de variância para a espessura da parede e fração parede da fibra. Ambas as variáveis apresentaram diferença estatística significativa para as fontes de variação Material genético e Posição radial.

Tabela 13 Resumo da análise de variância dos dados para espessura da parede da fibra e fração parede da fibra presentes na madeira

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio			
		E. Parede		F. Parede	
Material genético (MG)	2	1,23	*	622,43	*
Posição radial (PR)	2	14,22	*	828,14	*
MG x PR	4	0,18	ns	31,33	ns
Erro	45	0,25		25,13	
CV _{exp} (%)		10,43		6,31	

GL: Graus de liberdade; CV_{exp} (%): Coeficiente de variação experimental; E. Parede: Espessura da parede da fibra; F. Parede: Fração parede da fibra; ns: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

As Figuras 24 e 25 apresentam os valores médios da espessura da parede da fibra juntamente com a classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$), para os materiais genéticos e variação radial, respectivamente.

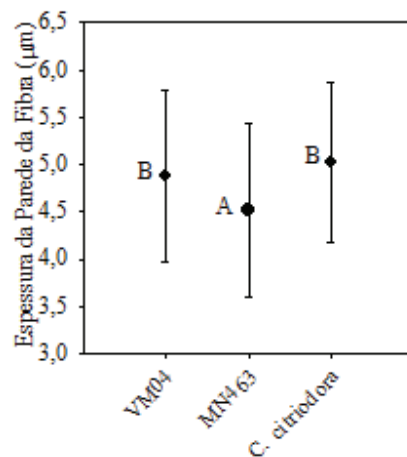


Figura 24 Valores médios de espessura da parede da fibra para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

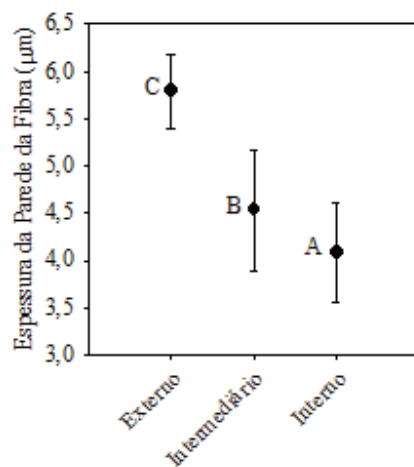


Figura 25 Valores médios de espessura da parede da fibra para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Dentre os materiais genéticos estudados o clone MN463 apresentou menor valor para a variável espessura da parede da fibra. Observa-se na Figura

25 que há um incremento da espessura da parede da fibra no sentido medula-câmbio.

Tomazello Filho (1987), estudando a madeira de *E. globulus*, *E. pellita* e *E. acmenioides* aos 10 anos de idade, observou valores em espessura de parede variando de 3,2 a 5,7 μ m. Valores próximos aos observados na literatura citada foram encontrados neste estudo.

Comportamento semelhante pode ser observado para a variável fração parede da fibra em que o clone MN463 apresentou o menor valor comparado aos demais materiais (Figura 26). Observe-se ainda uma redução da fração parede da fibra no sentido câmbio-medula (Figura 27).

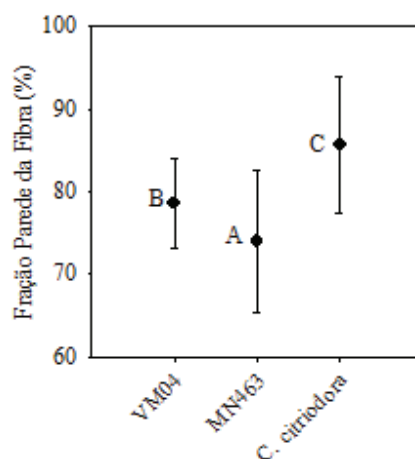


Figura 26 Valores médios de fração parede da fibra para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

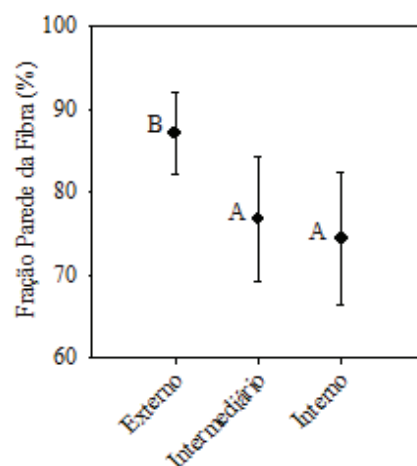


Figura 27 Valores médios de fração parede da fibra para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

O padrão de variação das variáveis diâmetro do lume da fibra, espessura da parede da fibra e fração parede da fibra pode ser possivelmente explicado com base na atividade cambial durante o crescimento e desenvolvimento do vegetal. À medida que o vegetal envelhece o câmbio vascular apresenta uma redução em sua atividade, tal comportamento fisiológico reflete na necessidade de um maior período para a finalização da divisão celular. O maior tempo necessário para que haja a formação de uma nova célula permite que ocorra uma maior deposição de microfibrilas de celulose na parede celular, refletindo assim no incremento da espessura da parede e fração parede da fibra e redução do diâmetro do lume de fibra. Portanto, há uma tendência de que as fibras mais afastadas da medula apresentem maior espessura de parede e fração parede da fibra e menores valores em diâmetro do lume da fibra.

A Tabela 14 apresenta o resumo da análise de variância para a frequência e diâmetro de vaso. Observa-se que houve diferença estatística

significativa da frequência de vaso para as fontes de variação Material genético e Posição radial. Para o diâmetro do vaso houve diferença estatística apenas para material genético.

Tabela 14 Resumo da análise de variância para frequência e diâmetro de vaso na madeira

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio		F. vaso	D. vaso	
		F. vaso	D. vaso			
Material genético (MG)	2	39,84	*	1675,9	*	
Posição radial (PR)	2	31,34	*	450,00	ns	
MG x PR	4	4,60	ns	59,02	ns	
Erro	45	3,95		167,2		
CV _{exp} (%)			14,71		11,33	

GL: Graus de liberdade; CV_{exp} (%): Coeficiente de variação experimental; F. vaso: Frequência de vaso; D. vaso: Diâmetro de vaso; ns: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

As Figuras 28 e 29 mostram o comportamento da frequência de vaso entre materiais genéticos e posições radiais de amostragem juntamente com a classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$). O clone VM04 apresentou uma menor quantidade de vaso por unidade de área comparado aos demais materiais. A madeira retirada na posição mais interna do fuste apresentou menor valor médio em frequência de vaso comparado à madeira retirada das posições mais externas.

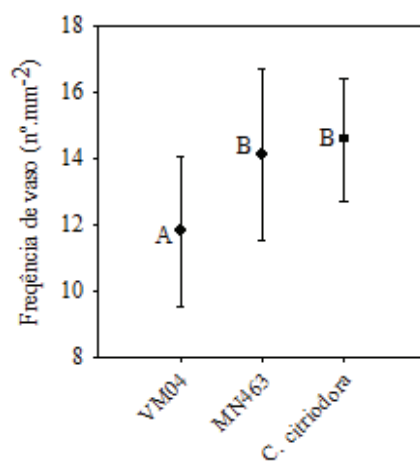


Figura 28 Valores médios de frequência de vaso para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

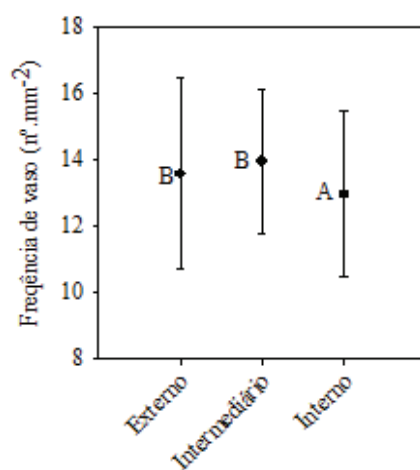


Figura 29 Valores médios de frequência de vaso para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

O padrão de variação radial da frequência de vaso observado neste estudo discorda da maioria dos comportamentos descritos na literatura. O comportamento mais frequentemente observado é de decréscimo do número de vasos por unidade de área no sentido medula-câmbio. Tal comportamento foi observado por Urbinate et al. (2003) em estudos com *Terminalia ivorensis* aos 35 anos de idade. Silva (1992) estudando a madeira de *Saccoglottis guianensis* e *Andira paviflora* não observou um padrão de variação radial definido para frequência de vaso, entretanto observou que o número de vasos por milímetro quadrado foi maior na madeira próxima ao câmbio de *Saccoglottis guianensis*.

O clone VM04 apresentou menor frequência de vasos em relação ao clone MN463 e *C. citriodora*. Entretanto, como pode ser visualizado na Figura 30, apresenta vasos com maior diâmetro.

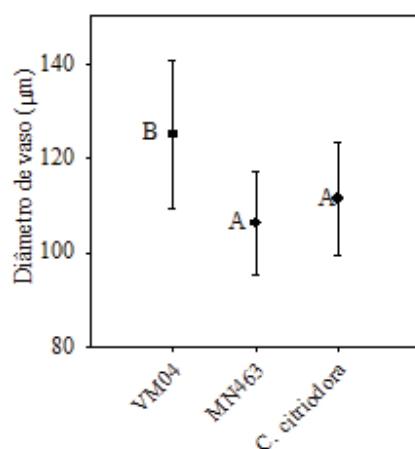


Figura 30 Valores médios de diâmetro de vaso para o material genético e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Apesar da não diferença estatística significativa para diâmetro de vaso nas posições radiais dos materiais analisados, Urbinate et al. (2003) estudando

Terminalia ivorensis aos 35 anos e Longui et al. (2011) estudando *Pittosporum undulatum* observaram um acréscimo diâmetral dos elementos de vaso no sentido medula-câmbio.

Lima et al. (2011), avaliando o padrão de variação radial das propriedades anatômicas da madeira de *Eucalyptus umbra* aos 25 anos de idade, observaram que a frequência e diâmetro de vasos variaram de 9 a 19 n°.mm⁻¹ e 75 a 134µm, respectivamente. Os valores encontrados neste estudo, para estas duas propriedades anatômicas, encontram-se dentro do intervalo apresentado pelos autores citados.

5.2 Caracterização física, química e mecânica do carvão vegetal

Os valores médios juntamente com o coeficiente de variação do rendimento gravimétrico da carbonização e das variáveis químicas, físicas e mecânicas do carvão vegetal de cada tratamento podem ser visualizados no Anexo B.

A Tabela 15 apresenta o resumo da análise de variâncias para o rendimento gravimétrico da carbonização e densidade relativa aparente do carvão vegetal. Observa-se que a variável rendimento gravimétrico apresentou diferença estatística significativa entre as posições radiais, apresentou ainda efeito significativo entre Material genético e Temperatura final de carbonização. Para densidade relativa aparente houve um efeito significativo da interação entre Material genético e Posição radial. Interação significativa indica que existe dependência entre os fatores e deve-se proceder ao seu desdobramento e avaliação de um efeito dentro do outro.

Tabela 15 Resumo da análise de variância para rendimento gravimétrico da carbonização e densidade relativa aparente do carvão vegetal

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio			
		RG		DRA	
Material genético (MG)	2	67,10	*	0,25	*
Posição radial (PR)	2	166,05	*	0,21	*
Temperatura de Carbonização (TC)	2	1714,20	*	0,00	ns
MG x PR	4	1,40	ns	0,01	*
MG x TC	4	6,14	*	0,00	ns
PR x TC	4	2,01	ns	0,00	ns
MG x PR x TC	8	0,14	ns	0,00	ns
Erro	135	2,07		0,00	
$CV_{exp} (\%)$		3,92		14,74	

GL: Graus de liberdade; $CV_{exp} (\%)$: Coeficiente de variação experimental; RG: Rendimento gravimétrico da carbonização; DRA: Densidade reativa aparente do carvão vegetal; ns: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância..

A Figura 31 apresenta o padrão de variação radial do rendimento gravimétrico da carbonização. Há uma clara tendência de decréscimo do rendimento gravimétrico da carbonização no sentido medula-câmbio.

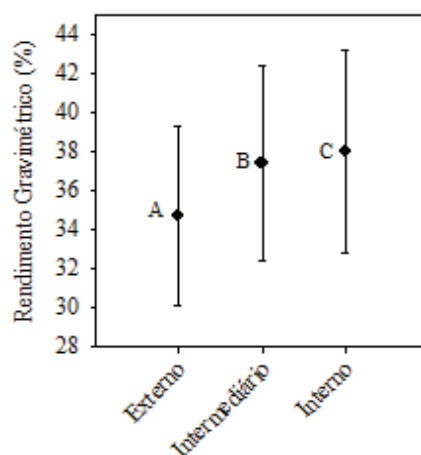


Figura 31 Valores médios de rendimento gravimétrico da carbonização das posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

A variação radial do rendimento gravimétrico da carbonização é explicado pelo teor de lignina presente na madeira. A lignina é o composto orgânico com maior termorresistência presente nos materiais lenhosos, ou seja, a degradação desta macromolécula pelo incremento da temperatura é mais lenta e dificultosa comparada aos demais compostos orgânicos que compõem a madeira (SARKANEN; LUDWIG, 1971). Portanto, o processo de carbonização, quando se utiliza madeiras com maior teor em lignina, tende a apresentar um maior rendimento (GOLDSTEIN, 1977). Como abordado no item 5.1, foi observado uma maior concentração de lignina na madeira mais próxima à medula.

A Figura 32 apresenta o desdobramento da interação dos materiais genéticos dentro de cada temperatura final de carbonização. A Tabela 16 apresenta os valores médios juntamente com a classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$), para o rendimento gravimétrico da carbonização dos materiais genéticos em cada temperatura final

de pirólise. Observa-se que a carbonização do clone MN463 e *C. citriodora* apresentou maior rendimento em massa comparado à carbonização do clone VM04 para todas as temperaturas finais de carbonização. Observa-se ainda que a carbonização da madeira oriunda do clone MN463 apresentou maior rendimento gravimétrico comparado aos demais materiais quando a temperatura final de pirólise foi de 450°C.

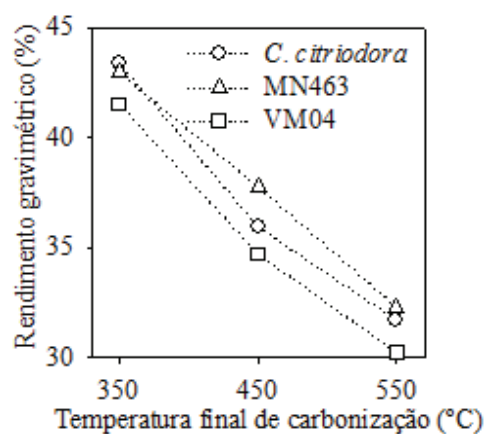


Figura 32 Desdobramento da interação entre as fontes de variação Material genético e Temperatura Final de Carbonização para o rendimento gravimétrico da carbonização

Tabela 16 Valores médios de rendimento gravimétrico da carbonização dos materiais genéticos em cada temperatura final de carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Material genético	TC (°C)	RG (%)	
<i>C. citriodora</i>	350	43,39	A
	450	35,95	B
	550	31,7	C
MN463	350	42,95	A
	450	37,77	B
	550	32,28	C
VM04	350	41,53	A
	450	34,72	B
	550	30,22	C

TC: Temperatura final de carbonização; RG: Rendimento gravimétrico da carbonização. Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

Estudos relacionando o teor de lignina com o rendimento gravimétrico da carbonização são mais comuns. Há um consenso de que há uma correlação positiva entre o teor de lignina com o rendimento do processo de carbonização. Entretanto, tal comportamento não foi observado quando a fonte de variação foi o material genético. No item 5.1 foram encontrados menores concentrações em lignina para o material *C.citriodora* (25,92%) em comparação aos demais materiais (MN463: 31,11% e VM04: 31,52%). Logo, esperava-se que o rendimento da carbonização deste material fosse menor. A lignina é composto orgânico com maior termorresistência presente na madeira, assim sendo é esperado que madeira com maior teor deste composto apresente a mesma característica.

Observando a Figura 32 observa-se que o rendimento da carbonização do *C. citriodora* é semelhante ao rendimento da carbonização do clone MN463

nas temperaturas finais de carbonização de 350 e 550°C. A carbonização da madeira advinda do clone VM04, que detém o maior teor de lignina, apresentou o menor rendimento gravimétrico comparado à carbonização dos demais materiais genéticos.

Tal comportamento pode estar associado não à quantificação da concentração de lignina apenas, mas sim à qualificação da mesma. Na madeira a lignina é formada pela plimerização desidrogenativa enzimática de três álcoois precursores, álcool trans-p-coumarílico, álcool trans-coniferílico (guaiacil) e o álcool trans-sinapílico (siringil). Barbosa et al. (2008) em trabalho avaliando diferentes modos de determinação da relação siringil/guaiacil, menciona que a lignina siringil apresenta uma estrutura mais reativa comparada à lignina guaiacil. Logo, madeiras com maior concentração de lignina siringila tendem a ser química e termicamente menos resistentes, ou seja, se carbonizada, o processo tende a apresentar um menor rendimento.

Vieira et al. (2013), avaliando o rendimento dos produtos da carbonização da madeira de *Eucalyptus* em diferentes temperaturas de carbonização (500-900°C), encontraram valores de rendimento gravimétrico de carvão vegetal variando de 29 a 34%. Vieira (2009), avaliando as propriedades do carvão produzido em temperaturas finais de carbonização de 350 a 900°C, observou valores de rendimento em massa de carvão vegetal variando de 53,4 a 23,5.

A Figura 33 apresenta o padrão de variação radial da densidade relativa aparente do carvão vegetal para os três materiais genéticos. Observa-se que a densidade do carvão vegetal de *C. citriodora* foi maior comparado aos demais materiais. Observa-se ainda que há uma tendência da madeira mais próxima à medula dar origem a um carvão com menor densidade relativa aparente.

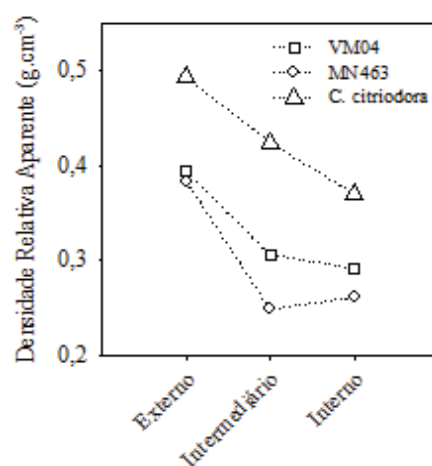


Figura 33 Desdobramento da interação entre as fontes de variação Material genético e Posição radial para a variável densidade relativa aparente

Tabela 17 Valores médios da densidade relativa aparente do carvão oriundo dos materiais genéticos em cada posição radial e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Material Genético	Posição Radial	DRA (g.cm ⁻³)	
<i>C. citriodora</i>	Externo	0,494	C
	Intermediário	0,424	B
	Interno	0,370	A
MN463	Externo	0,383	B
	Intermediário	0,248	A
	Interno	0,262	A
VM04	Externo	0,394	B
	Intermediário	0,306	A
	Interno	0,291	A

DRA: Densidade relativa aparente. Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

O comportamento observado na Figura 33 pode ser explicado com base na densidade básica dos materiais genéticos. Vital, Jesus e Valente (1986)

mencionam que há uma correlação positiva entre a densidade relativa aparente do carvão vegetal e a densidade básica da madeira que lhe deu origem. Logo, a variação radial da densidade relativa aparente do carvão vegetal deve assemelhar-se ao padrão de variação radial da densidade básica.

O padrão de variação radial da densidade relativa aparente do carvão vegetal observado neste estudo assemelha-se aos encontrados por Trugilho et al. (2005) em trabalho com híbridos naturais de *Eucalyptus* aos sete anos de idade e Arantes et al. (2013) em estudo com *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake aos 6 anos de idade.

A Tabela 18 apresenta o resumo da análise de variância para a composição química elementar do carvão vegetal. Verifica-se que para o teor de carbono e oxigênio somente o efeito da temperatura final de carbonização foi significativo. Para o teor de hidrogênio os efeitos do material genético, posição radial e temperatura final de carbonização foram significativos a 0,05 de significância.

Tabela 18 Resumo da análise de variância para composição química elementar do carvão vegetal

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio		
		Carbono	Hidrogênio	Oxigênio
Material genético (MG)	2	6,78 ^{ns}	0,13 [*]	6,21 ^{ns}
Posição radial (PR)	2	7,15 ^{ns}	0,11 [*]	8,23 ^{ns}
Temperatura de Carbonização (TC)	2	3256,56 [*]	25,56 [*]	2702,66 [*]
MG x PR	4	4,49 ^{ns}	0,01 ^{ns}	4,31 ^{ns}
MG x TC	4	8,23 ^{ns}	0,03 ^{ns}	8,08 ^{ns}
PR x TC	4	0,47 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,56 ^{ns}
MG x PR x TC	8	2,53 ^{ns}	0,01 ^{ns}	2,75 ^{ns}
Erro	135	3,34	0,02	3,21
CV _{exp} (%)		2,19	3,64	15,53

GL: Graus de liberdade; CV_{exp} (%): Coeficiente de variação experimental; ^{ns}: Não significativo a 0,05 de significância; ^{*}: Significativo a 0,05 de significância.

As Figuras 34 e 35 apresentam o comportamento dos teores de carbono e oxigênio em função da temperatura final de carbonização, respectivamente, com o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

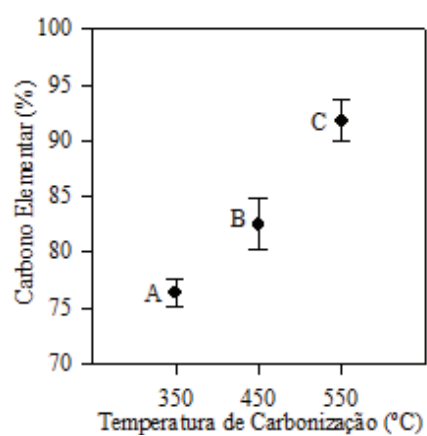


Figura 34 Valores médios do teor de carbono elementar para Temperatura Final de Carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

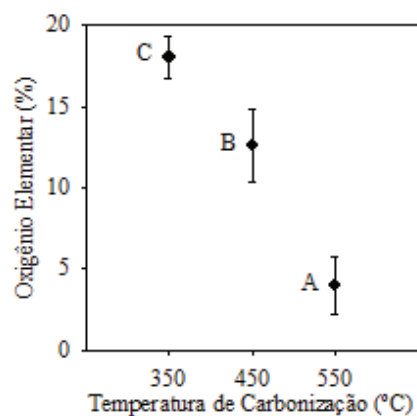


Figura 35 Valores médios do teor de oxigênio elementar para Temperatura Final de Carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Pelas Figuras 34 e 35 é possível observar uma clara tendência de incremento do teor de carbono com o aumento da temperatura final de carbonização. Comportamento inverso é observado para o teor de oxigênio. Com o incremento da temperatura, compostos ricos em oxigênio e hidrogênio são volatilizados, deixando assim a fração sólida com um maior teor de carbono (BRITO, 1992b). Portanto, quanto maior for a temperatura final de carbonização, maior tende a ser a concentração de carbono e menor a concentração de oxigênio no carvão vegetal. Apesar de a lignina ser o composto estrutural com maior teor de carbono elementar, aparentemente o efeito da temperatura final de carbonização apresenta maior influência sobre o teor de carbono no carvão vegetal comparado ao efeito do material genético.

A Figuras 36, 37 e 38 apresentam o comportamento do teor de hidrogênio elementar do carvão vegetal em função da variação do Material genético, Posição radial e Temperatura final de carbonização, respectivamente.

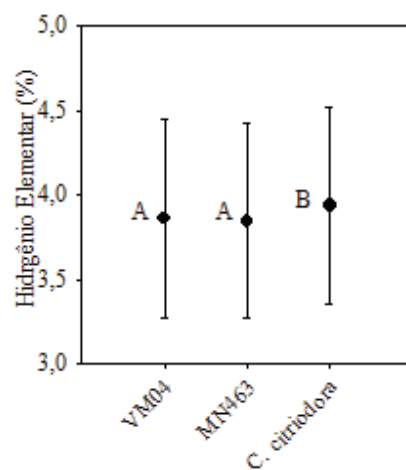


Figura 36 Valores médios de concentração em hidrogênio elementar do carvão vegetal para os materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

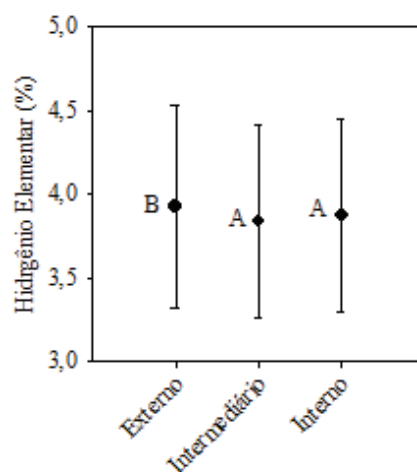


Figura 37 Valores médios de concentração em hidrogênio elementar do carvão vegetal para as posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

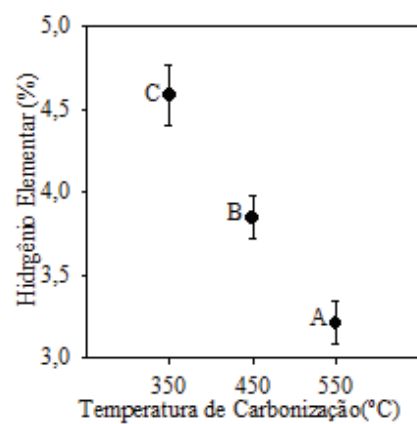


Figura 38 Valores médios de concentração em hidrogênio elementar para as Temperaturas Finais de Carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

O carvão produzido com madeira oriunda *C. citriodora* apresentou uma sensível superioridade da concentração em hidrogênio comparado ao carvão produzido com os demais materiais. Observa-se ainda que o carvão produzido com a madeira mais próxima ao câmbio vascular apresentou maior teor deste elemento comparado ao carvão produzido com madeira amostrada de regiões mais internas do fuste. Há um claro decréscimo do teor de hidrogênio no carvão vegetal com o aumento da temperatura final de carbonização. O efeito da temperatura final de carbonização foi mais influente sobre o teor de hidrogênio comparado ao efeito dos materiais genéticos e posições radiais.

A Tabela 19 apresenta o resumo da análise de variância para a análise química imediata do carvão vegetal. Observa-se que o teor de materiais voláteis e carbono fixo apresentou efeito significativo da interação entre o Material genético e Temperatura final de carbonização. O teor de minerais do carvão vegetal apresentou diferença estatística significativa para o efeito de Temperatura final de carbonização e para a interação entre as fontes de variação Material genético e Posição radial.

Tabela 19 Resumo da análise de variância para composição química imediata do carvão vegetal

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio		
		Voláteis	Carbono Fixo	Minerais
Material genético (MG)	2	6,85 ^{ns}	11,41 [*]	4,42 [*]
Posição radial (PR)	2	1,32 ^{ns}	6,46 ^{ns}	1,97 [*]
Temperatura de Carbonização (TC)	2	7699,46 [*]	7579,71 [*]	0,76 [*]
MG x PR	4	0,54 ^{ns}	1,55 ^{ns}	0,59 [*]
MG x TC	4	20,49 [*]	23,17 [*]	0,24 ^{ns}
PR x TC	4	0,93 ^{ns}	1,27 ^{ns}	0,04 ^{ns}
MG x PR x TC	8	0,42 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,02 ^{ns}
Erro	135	3,65	3,64	0,13
CV _{exp} (%)		6,98	2,65	47,00

GL: Graus de liberdade; CV_{exp} (%): Coeficiente de variação experimental; ^{ns}: Não significativo a 0,05 de significância; ^{*}: Significativo a 0,05 de significância.

A Figura 39 apresenta o comportamento do teor de materiais voláteis do carvão produzido com os três materiais genéticos para cada temperatura final de carbonização. A Tabela 20 apresenta as médias da mesma variável juntamente com classificação segundo teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

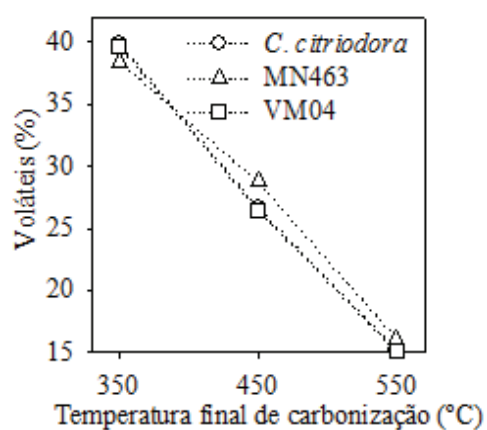


Figura 39 Desdobramento da interação entre as fontes de variação Material genético e Temperatura Final de Carbonização para a variável teor de materiais voláteis

Tabela 20 Valores médios da concentração em materiais voláteis do carvão oriundo dos materiais genéticos em cada temperatura final de carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Material Genético	TC (°C)	Voláteis(%)	
<i>C. citriodora</i>	350	39,94	A
	450	26,65	B
	550	15,22	C
MN463	350	38,41	A
	450	28,75	B
	550	16,12	C
VM04	350	39,71	A
	450	26,42	B
	550	15,07	C

TC: Temperatura final de carbonização. Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

Não houve diferença no teor de materiais voláteis do carvão dos materiais genéticos quando a temperatura de carbonização foi de 550°C. O carvão oriundo do clone MN463 apresentou menor teor de compostos voláteis, comparado aos demais materiais, quando a temperatura final de carbonização foi de 350°C. Comportamento inverso foi observado quando os materiais foram carbonizados a 450°C. Há a tendência de que quanto maior a temperatura final de carbonização menor será a concentração de materiais voláteis presente no carvão vegetal.

Trugilho e Silva (2001), avaliando o efeito da temperatura final de carbonização sobre o carvão oriundo da madeira de *Hymenaea courbaril* (jatobá), observaram valores no teor de materiais voláteis no carvão vegetal variando de 40,13 a 23,24% para as temperaturas finais de carbonização de 400 e 600°C, respectivamente. Os valores no teor de materiais voláteis observados neste estudo estão dentro do intervalo apresentado pela literatura citada.

A Figura 40 apresenta o comportamento do teor de carbono fixo de carvão vegetal oriundo dos três materiais genéticos em cada temperatura final de carbonização. A Tabela 21 apresenta o desdobramento da interação entre as fontes de variação Material genético e Temperatura final de carbonização para a variável em questão e a classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

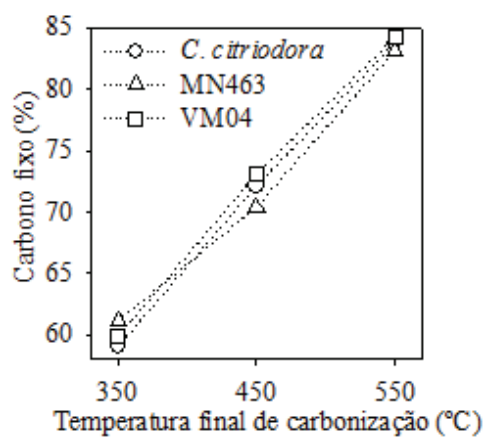


Figura 40 Desdobramento da interação entre as fontes de variação Material genético e Temperatura Final de Carbonização para a variável teor de carbono fixo

Tabela 21 Valores médios do teor de carbono fixo do carvão oriundo dos materiais genéticos em cada temperatura final de carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Material Genético	TC (°C)	CF (%)	
<i>C. citriodora</i>	350	59,04	A
	450	72,13	B
	550	83,75	C
MN463	350	61,12	A
	450	70,42	B
	550	83,15	C
VM04	350	59,88	A
	450	73,08	B
	550	84,23	C

TC: Temperatura final de carbonização; CF: Teor de carbono fixo. Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

Analisando a Figura 40 nota-se que com o incremento da temperatura final de carbonização há um aumento do teor de carbono fixo do material. Observa-se que não houve diferença no teor de carbono fixo para os clones quando a temperatura de carbonização foi de 550°C. O carvão oriundo do clone MN463 apresentou o maior e o menor teor em carbono fixo comparado aos demais materiais quando a temperatura de carbonização foi de 350°C e 450°C, respectivamente.

Trugilho e Silva (2001), avaliando o carvão da madeira de *Hymenaea courbaril* (jatobá), observaram teor de carbono fixo variando de 58,91 a 75,72% para os carvões produzidos nas temperaturas finais de carbonização de 400 e 600°C, respectivamente. Valores semelhantes aos observados neste estudo.

A Figura 41 apresenta o comportamento da concentração de compostos inorgânicos no carvão vegetal em função temperatura final de carbonização. O

teor de minerais no carvão vegetal foi menor quando a temperatura final de carbonização foi de 350°C.

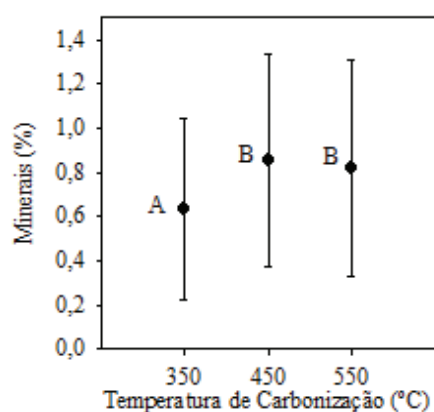


Figura 41 Valores médios de concentração em minerais para fonte de variação Temperatura Final de Carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Quanto maior a temperatura final de carbonização mais intensa será a saída de compostos voláteis. Tal fato reflete no incremento do teor dos compostos inorgânicos e carbono fixo na fase sólida durante o processo de carbonização. Portanto, processos de carbonização que utilizam maiores temperaturas finais de carbonização darão origem a um carvão com menor teor de compostos voláteis e maior em carbono fixo e minerais.

A Figura 42 apresenta o padrão de variação radial do teor de minerais do carvão vegetal oriundo dos três materiais genéticos estudados. A Tabela 22 apresenta os valores médios do teor de minerais do carvão vegetal, juntamente com a classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$), para as posições radiais em cada um dos materiais genéticos.

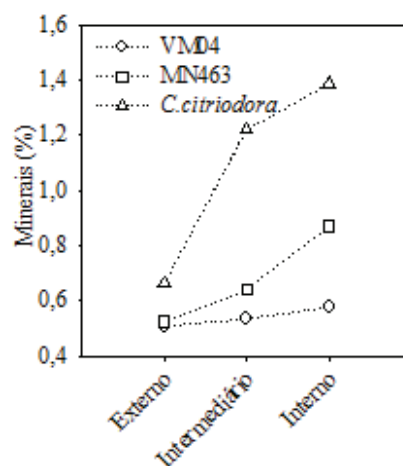


Figura 42 Padrão de variação radial da concentração de minerais do carvão vegetal oriundo dos três materiais genéticos estudados

Tabela 22 Valores médios do teor de minerais do carvão oriundo dos materiais genéticos em cada posição radial e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Material Genético	Posição Radial	Minerais (%)	
<i>C. citriodora</i>	Externo	0,66	A
	Intermediário	1,22	B
	Interno	1,39	B
MN463	Externo	0,52	A
	Intermediário	0,64	A
	Interno	0,87	B
VM04	Externo	0,51	A
	Intermediário	0,53	A
	Interno	0,58	A

Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

Não houve diferença estatística significativa do teor de minerais do carvão nas posições radiais do clone VM04. Para os demais materiais, o carvão produzido com a madeira mais próxima à medula apresentou maior teor de minerais comparado ao carvão produzido com madeira mais próxima ao câmbio vascular. Não foi possível observar um padrão de variação radial característico do teor de minerais no carvão vegetal dos três materiais genéticos avaliados. Porém, há uma tendência de o carvão produzido com a madeira mais próxima da medula apresentar maior teor de minerais.

O carvão produzido com a madeira de *C. citriodora* apresentou maior teor de minerais comparado ao carvão produzido com os demais materiais. Isso foi devido ao maior teor de minerais presente na madeira deste material genético.

A Tabela 23 apresenta o resumo da análise de variância para as variáveis mecânicas do carvão vegetal. Nota-se que houve efeito significativo de Material genético, Posição radial, Temperatura final de carbonização e interação entre o Material genético e Posição radial para a tensão máxima suportada. Para a resistência à penetração da semi esfera houve efeito significativo de Material genético, Posição radial e Temperatura final de carbonização.

Tabela 23 Resumo da análise de variância para as propriedades mecânicas de módulo de elasticidade e módulo de ruptura do carvão vegetal

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio			
		TMS		RP	
Material genético (MG)	2	782,29	*	3596,22	*
Posição radial (PR)	2	1214,74	*	4464,02	*
Temperatura de Carbonização (TC)	2	146,54	*	794,36	*
MG x PR	4	61,59	*	80,39	ns
MG x TC	4	19,34	ns	100,26	ns
PR x TC	4	26,47	ns	172,22	ns
MG x PR x TC	8	13,02	ns	98,27	ns
Erro	135	21,65		120,24	
		$CV_{exp} (%)$		22,40	42,39

GL: Graus de liberdade; $CV_{exp} (%)$: Coeficiente de variação experimental; RP: Resistência à penetração da semi esfera; TMS: Tensão máxima suportada; ns: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

A Figura 43 apresenta o comportamento da tensão máxima suportada em função da temperatura final de carbonização juntamente com a classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$) para as três temperaturas finais de carbonização. Observa-se que há uma tendência de o carvão vegetal ser mais resistente com o aumento da temperatura final do processo de carbonização.

Tal comportamento é devido à alteração química estrutural ou rearranjo molecular que a biomassa sofre na presença de altas temperaturas. Com o aumento da temperatura há um aumento da cristalinidade das cadeias carbônicas e das ligações entre as mesmas. Portanto, há uma tendência de que as propriedades mecânicas do carvão do carvão vegetal sejam melhoradas quanto maior for a temperatura final de carbonização (BLANKENHORN; JENKINS; KLINE, 1972; VIEIRA, 2009).

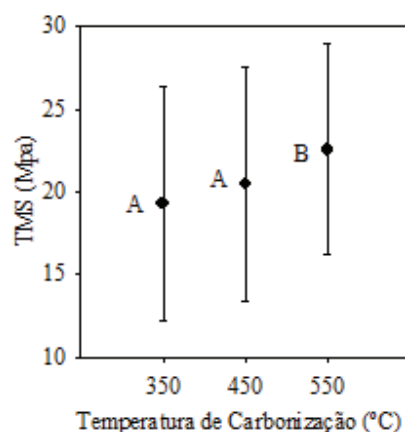


Figura 43 Valores médios de tensão máxima suportada para fonte de variação Temperatura Final de Carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Blankenhorn, Jenkins e Kline (1972) e Vieira (2009), mencionam que a degradação térmica da lignina é semelhante à formação do carbono vítreo a partir de resinas fenólicas. Os autores dizem que com o aumento da temperatura, há uma reestruturação das cadeias de carbono fazendo com que as mesmas se tornem semelhantes a estruturas gráficas. Relatam ainda que em temperaturas extremas há uma maior organização das cadeias de carbono já reestruturado, isso associado ainda a um maior número de ligações entre as cadeias carbônicas. Fenômeno semelhante foi descrito por Mendes, Gomez e Oliveira (1982). Portanto, para as temperaturas finais de carbonização empregadas, foi observado um aumento da resistência mecânica do carvão vegetal com o incremento da temperatura de carbonização.

Vieira (2009), avaliando a influência da temperatura final de carbonização sobre as propriedades mecânicas do carvão vegetal, observou valores de resistência à compressão paralela às fibras variando de 7 a 142MPa para as temperaturas finais de carbonização 350 e 550°C, respectivamente. Os

valores observados neste estudo encontram-se dentro intervalo da literatura citada. Entretanto, os parâmetros e o tipo de ensaio mecânico utilizado por Vieira (2009) foram distintos ao ensaio utilizado nesta pesquisa.

A Figura 44 apresenta o padrão de variação radial da tensão máxima suportada pelo carvão vegetal para os três materiais genéticos. Observa-se que o carvão produzido com a madeira retirada na posição mais externa do fuste suportou maior tensão comparado ao carvão produzido com a madeira mais próxima à medula em todos os materiais. A Tabela 24 apresenta os valores médios de tensão máxima suportada do carvão vegetal juntamente com a classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

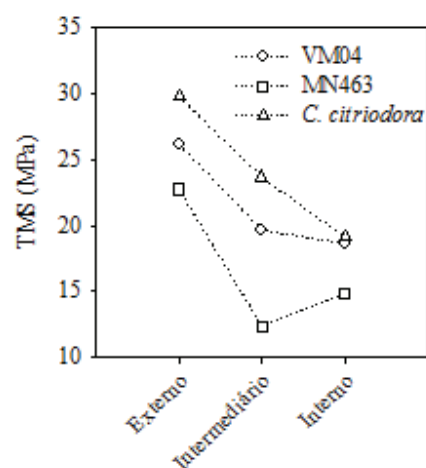


Figura 44 Padrão de variação radial tensão máxima suportada do carvão vegetal para cada material genético

Tabela 24 Valores médios de tensão máxima suportada pelo carvão oriundo dos materiais genéticos em cada posição radial e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Material Genético	Posição Radial	TMS (MPa)	
<i>C. citriodora</i>	Externo	29,75	C
	Intermediário	23,64	B
	Interno	19,13	A
MN463	Externo	22,74	B
	Intermediário	12,38	A
	Interno	14,85	A
VM04	Externo	26,14	B
	Intermediário	19,65	A
	Interno	18,61	A

TMS:Tensão máxima suportada. Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

O incremento da tensão máxima suportada pelo carvão vegetal no sentido medula-casca pode ser explicado com base na densidade relativa aparente do carvão vegetal. Um carvão vegetal de maior densidade tende a suportar maior tensão. A maior resistência à compressão por parte de carvões de maior densidade aparente ocorre, possivelmente, devido a um maior número de cadeias carbônicas por unidade de volume presente em um carvão com maior densidade relativa aparente. Outro fator explicativo pode estar relacionado com a presença de trincas. Um carvão mais denso, visualmente, apresenta menor quantidade de fissuras, o que possivelmente contribui com a melhoria das propriedades mecânicas do carvão vegetal.

Vieira (2009), avaliando as propriedades mecânicas do carvão vegetal produzido com madeira de *Eucalyptus* amostrada em diferentes posições radiais, encontrou o mesmo comportamento da variação radial da tensão máxima

suportada observado neste estudo. O autor ainda encontrou valores de resistência à compressão de 128 e 159MPa para o carvão produzido com madeira amostrada próxima à medula e albúrnio, respectivamente. Os valores de resistência observados pelo autor foram superiores aos observados neste estudo, ressaltando que os ensaios foram diferentes entre si.

Moutinho (2013), avaliando as propriedades mecânicas do carvão vegetal produzido com diferentes espécies de *Eucalyptus*, observou valores de tensão máxima suportada variando de 7,32 a 15,69MPa em compressão.

As Figuras 45, 46 e 47 apresentam o comportamento da resistência à penetração da semiesfera em função do material genético, posição radial e temperatura final de carbonização, respectivamente, juntamente com a classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

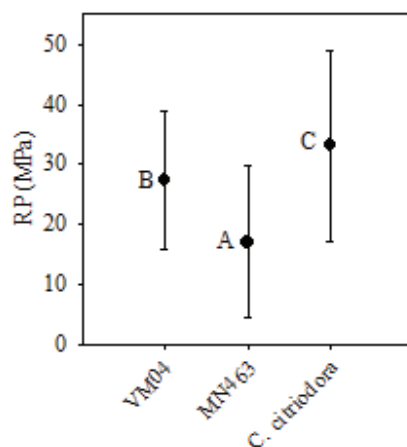


Figura 45 Valores médios de resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal para os Materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

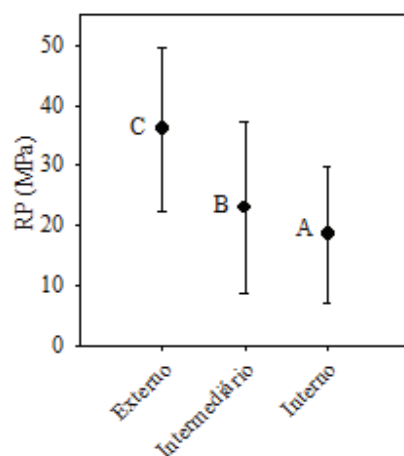


Figura 46 Valores médios de resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal para as Posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

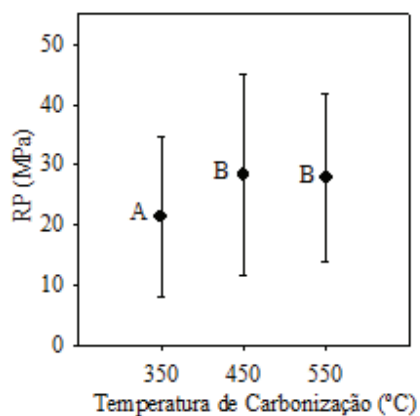


Figura 47 Valores médios de resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal para as Temperaturas Finais de Carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Observa-se que resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal produzido com a madeira do material *C. citriodora* foi maior comparada ao carvão produzido com a madeira dos demais materiais. Há uma clara tendência

de incremento da resistência à penetração da semi esfera no carvão vegetal oriundo da madeira amostrada próxima ao câmbio. Observa-se ainda que o carvão produzido a 450 e 550°C é mais rígido comparado ao carvão produzido com a temperatura de 350°C.

A forma através da qual foi discutido o comportamento da tensão máxima suportada do carvão vegetal em função do material genético, posição radial e temperatura final de carbonização pode ser utilizada para elucidar os fenômenos observados para a variável resistência à penetração da semi esfera do mesmo. Materiais genéticos que apresentam maior densidade básica produzem carvão vegetal mais rígido quando carbonizados. Devido à madeira mais próxima ao câmbio apresentar maior densidade básica, há uma tendência de a rigidez do carvão vegetal ser maior nesta posição radial. Quanto maior a temperatura final de carbonização maior será o rearranjo e organização das cadeias carbônicas conferindo ao carvão maior rigidez.

Moutinho (2013) observou valores em módulo de elasticidade do carvão vegetal variando de 316 a 736MPa. Vieira (2009), por sua vez, observou valores da mesma variável variando de 332 a 762MPa. Valores muito superiores aos observados neste estudo. Tal discrepância nos valores observados é, provavelmente, devido às diferenças nos ensaios empregados.

A Tabela 25 apresenta o resumo da análise variância para o poder calorífico superior e densidade energética do carvão vegetal. Observa-se que para o poder calorífico superior o efeito de material genético, temperatura final de carbonização e interação entre ambos foram significativos. Para a densidade energética os efeitos de material genético, posição radial e temperatura final de carbonização foram significativos.

Tabela 25 Resumo da análise de variância para poder calorífico superior e densidade energética do carvão vegetal

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	
		PCS	DE
Material genético (MG)	2	193247,7 *	12841658 *
Posição radial (PR)	2	30611,75 ^{ns}	10718495 *
Temperatura de Carbonização (TC)	2	25342247 *	2035759 *
MG x PR	4	6707,756 ^{ns}	329804,7 ^{ns}
MG x TC	4	216993,6 *	76002,45 ^{ns}
PR x TC	4	34433,01 ^{ns}	84511,83 ^{ns}
MG x PR x TC	8	3634,557 ^{ns}	28128,59 ^{ns}
Erro	135	27990,97	145235,1
CV _{exp} (%)		2,88	15,11

GL: Graus de liberdade; CV_{exp} (%): Coeficiente de variação experimental; PCS: Poder calorífico superior do carvão vegetal; DE: Densidade energética do carvão vegetal; ^{ns}: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

A Figura 48 mostra o comportamento do poder calorífico superior do carvão para os materiais genéticos estudados em função das temperaturas finais de carbonização. A Tabela 26 apresenta os valores médios de poder calorífico superior juntamente com a classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$) do carvão oriundo dos três materiais genéticos carbonizados a 350°, 450° e 550°C.

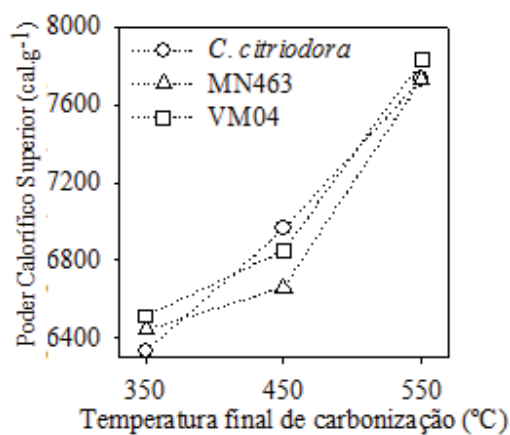


Figura 48 Desdobramento da interação entre as fontes de variação Material genético e Temperatura Final de Carbonização para a variável poder calorífico superior

Tabela 26 Valores médios do poder calorífico superior do carvão dos oriundo materiais genéticos em cada temperatura final de carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

Material Genético	TC (°C)	PCS (cal.g ⁻¹)	
<i>C. citriodora</i>	350	6331	A
	450	6962	B
	550	7732	C
MN463	350	6443	A
	450	6661	B
	550	7729	C
VM04	350	6514	A
	450	6850	B
	550	7828	C

PCS: Poder calorífico superior. Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

À medida que se aumenta a temperatura final do processo de carbonização há um incremento do valor calórico do carvão vegetal produzido. Tal fenômeno ocorre devido ao aumento da concentração de carbono na fração sólida do processo de carbonização.

A variação do valor calórico do carvão vegetal sofre influência não apenas dos parâmetros do processo de carbonização, mas também do material a ser carbonizado. Tal afirmação pode ser comprovada quando se analisa o valor calórico do carvão oriundo dos materiais genéticos carbonizados nas temperaturas de 350° e 450°C. O carvão oriundo de *C. citriodora* carbonizado a 350°C apresentou menor valor calórico comparado ao carvão dos demais materiais produzidos na mesma condição. Quando a temperatura de carbonização foi de 450°C o carvão de *C. citriodora* apresentou superioridade energética comparado ao carvão oriundo dos clones VM04 e MN463.

Neves et al. (2011), avaliando o potencial de produção de carvão com madeira oriunda de localidades distintas, observaram um valor calórico médio de 7650cal.g⁻¹ para o carvão produzido a uma temperatura final de 450°C. Trugilho e Silva (2001), avaliando o efeito da temperatura final de carbonização sobre a qualidade do carvão vegetal de *Hymenaea courbaril* (jatobá), observaram valores calóricos do carvão vegetal de 4833, 5097 e 5496 cal.g⁻¹ produzidos nas temperaturas finais de 300, 400 e 600°C, respectivamente.

As Figuras 49, 50 e 51 apresentam o comportamento da densidade energética em função dos materiais genéticos, posições radiais e temperaturas finais de carbonização, respectivamente, juntamente com a classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

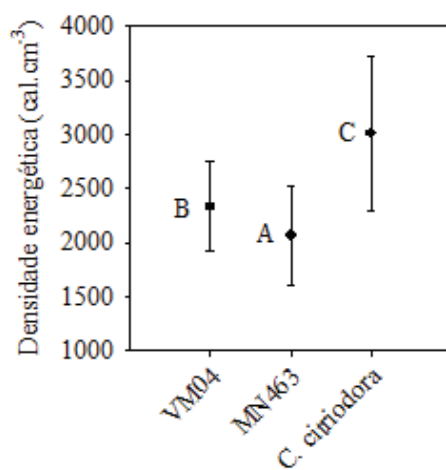


Figura 49 Valores médios de densidade energética para os Materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

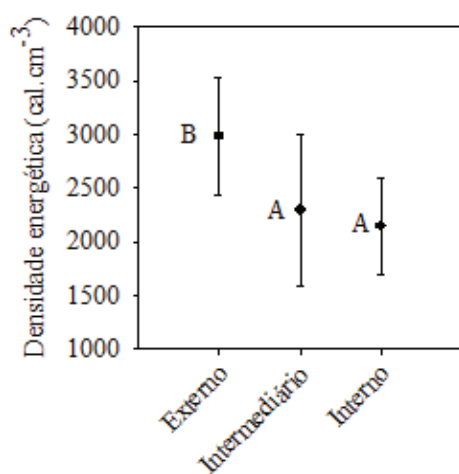


Figura 50 Valores médios de densidade energética para as Posições radiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

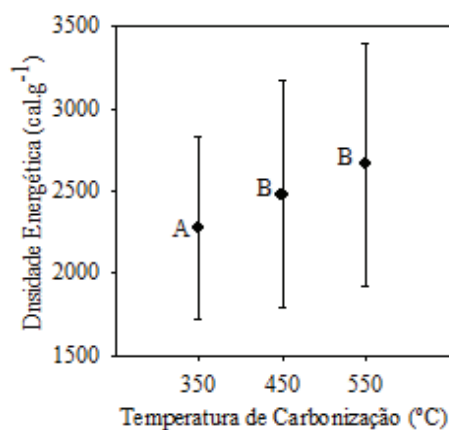


Figura 51 Valores médios de densidade energética para as temperaturas finais de carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

A densidade energética do carvão vegetal é o produto entre o valor calórico e a densidade relativa aparente do mesmo. Como a variação do poder calorífico superior foi baixa comparada à variação da densidade relativa aparente do carvão considerando o efeito do material genético e a posição radial, o comportamento deste parâmetro energético deve acompanhar a densidade relativa aparente do carvão vegetal.

Madeiras mais densas dão origem a carvão com maior densidade relativa aparente. Assim sendo o carvão oriundo da madeira de *C. citriodora* e da posição mais externa do fuste tendem a ser mais densos e apresentar maior densidade energética.

Quando a fonte de variação considerada é a temperatura final de carbonização há uma inversão da importância dos fatores utilizados no cálculo da densidade energética. O valor calórico do carvão vegetal é altamente afetado pela temperatura final de carbonização. Logo, a variação do valor calórico foi maior comparada à variação da densidade relativa aparente do carvão. Assim, maiores temperaturas de carbonização, em que há produção de carvão com

maior valor calórico, contribuem para o incremento da densidade energética do mesmo.

5.3 Influência dos parâmetros anatômicos sobre a densidade básica

A Tabela 27 apresenta a influência dos parâmetros anatômicos avaliados neste estudo sobre a densidade básica da madeira por meio da magnitude das correlações lineares de Pearson. Observa-se que o comprimento de fibra, diâmetro do lume da fibra, espessura da parede da fibra, fração parede da fibra apresentaram correlações estatisticamente significativas ($\alpha=0,01$) pelo teste t. Entretanto, a variável comprimento de fibra apresentou menor coeficiente de correlação linear de Pearson.

Tabela 27 Correlações entre as propriedades anatômicas e densidade básica

Variáveis anatômicas da madeira	Correlações lineares de Pearson
	Densidade básica
Comprimento de fibra	0,49*
Largura da fibra	-0,33 ^{ns}
Diâmetro do lume da fibra	-0,85*
Espessura da parede da fibra	0,68*
Fração parede da fibra	0,85*
Frequência de elemento de vaso	0,25 ^{ns}
Diâmetro de elemento de vaso	-0,12 ^{ns}

^{ns}: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

A Tabela 28 apresenta a estatística inerente às relações funcionais entre a densidade básica (DB) da madeira e as propriedades anatômicas, ou seja, o diâmetro do lume da fibra (DLF), espessura da parede da fibra (EPF) e fração parede da fibra (FP). Para as demais variáveis anatômicas foram observadas

correlações lineares de menor magnitude e devido a isto não foram realizados ajustes entre estas e a densidade básica da madeira.

Tabela 28 Ajustes da densidade básica em função das propriedades anatômicas da madeira

Modelo	Coeficientes		R ²	Análise dos Desvios		
				S _{xy} (g.cm ⁻³)	W	GQ
DB=β ₀ +β ₁ .DLF	β ₀	0,7850*	0,72*	0,0424	ns	ns
	β ₁	-0,0337*				
DB=β ₀ +β ₁ .EPF	β ₀	0,2353*	0,46*	0,0600	ns	ns
	β ₁	0,0607*				
DB=β ₀ +β ₁ .FP	β ₀	-0,0881*	0,72*	0,0430	ns	ns
	β ₁	0,0077*				

R: Coeficiente de correlação; R²: Coeficiente de determinação; S_{xy}: Desvio padrão residual; W: Teste de normalidade residual Shapiro-Wilks; GQ: Teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; β₀: Coeficiente linear da equação; β₁: coeficiente angular da equação; DB: Densidade básica; DLF: Diâmetro do lume da fibra; EPF: Espessura da parede da fibra; FP: Fração parede da fibra; ns: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

Pela Tabela 28 pode-se observar que, nos ajustes realizados, os coeficientes foram significativos pelo teste t ($\alpha=0,05$), as relações funcionais foram significativas pelo teste F ($\alpha=0,05$) e houve adequação dos pressupostos de normalidade e homocedasticidade residual. Tais testes inferem que os modelos ajustados podem ser utilizados na estimativa da densidade básica utilizando os parâmetros anatômicos diâmetro do lume da fibra, espessura da parede da fibra e fração parede de fibra.

As Figuras 52, 53 e 54 apresentam graficamente a dispersão dos dados e as curvas médias originadas pela regressão linear entre a densidade básica e diâmetro do lume da fibra, espessura da parede da fibra e fração parede da fibra, respectivamente.

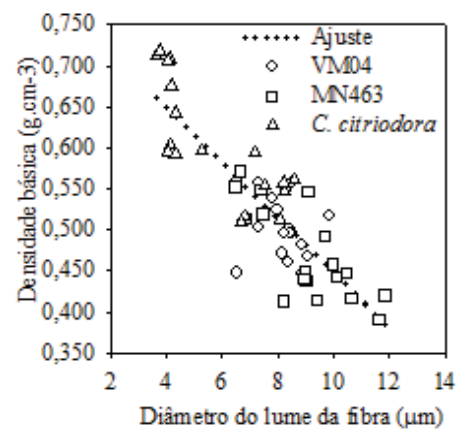


Figura 52 Relação funcional entre densidade básica e diâmetro do lume da fibra

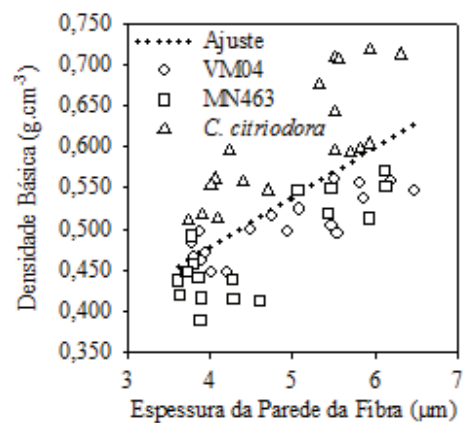


Figura 53 Relação funcional entre densidade básica e espessura da parede da fibra

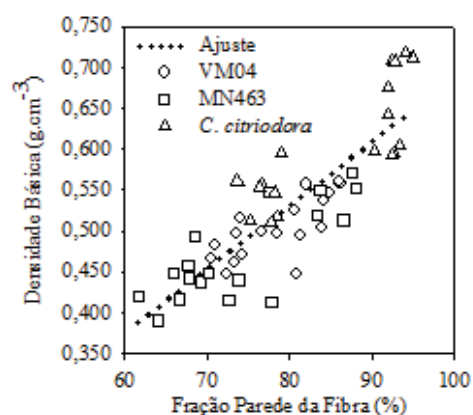


Figura 54 Relação funcional entre densidade básica e fração parede da fibra

Observa-se pela Figura 52 que há uma relação inversa entre densidade básica e diâmetro do lume da fibra. Este comportamento era esperado, pois a maior dimensão do diâmetro do lume da fibra infere que exista mais espaços vazios no lenho, tendo em vista que o diâmetro da fibra mantenha-se constante. Logo, espera-se que madeiras menos densas apresentem fibras com lume de maiores dimensões diamétrais.

Comportamento oposto foi observado para a espessura da parede da fibra e fração parede da fibra nas Figuras 53 e 54, respectivamente. Estas variáveis correlacionam-se positivamente com a densidade básica da madeira, pois fazem referência à quantidade de material lenhoso na madeira por unidade de volume. Portanto, madeiras mais densas tendem a apresentar fibras com paredes mais espessas e com maiores valores em fração parede da fibra.

5.4 Influência da composição química elementar da madeira sobre as propriedades do carvão vegetal

A Tabela 29 apresenta as correlações lineares de Pearson entre a composição química elementar da madeira e as variáveis inerentes ao carvão vegetal produzido nas três diferentes temperaturas de carbonização. Pela tabela pode-se observar que, apesar de algumas serem estatisticamente significativas, não há correlações com magnitude relevante. Este resultado infere que a composição elementar da madeira apresenta pouca influência sobre a qualidade do carvão vegetal.

A pouca influência da composição química elementar da madeira sobre as propriedades do carvão vegetal se dá pelo fato de a mesma não apresentar muito pouca ou nenhuma variação. Entretanto pode-se observar a influência da composição elementar sobre o rendimento do processo de carbonização. Segundo a Tabela pode-se observar a correlação mediana, positiva e significativa entre o teor de carbono elementar da madeira e o rendimento gravimétrico da carbonização.

Uma madeira com maior teor de carbono tende a apresentar uma maior quantidade de ligação entre átomos de carbono. Essas ligações são consideradas resistentes, ou seja, é necessário uma maior quantidade de energia para romper a referida ligação química. Logo, há uma tendência de que madeiras com maior teor em carbono sejam termicamente mais resistentes, refletindo assim em um maior rendimento gravimétrico do processo de carbonização. Madeiras com maior teor de carbono tendem a apresentar menor teor de oxigênio, logo, madeira mais rica em oxigênio tende a apresentar menor termorresistência.

Tabela 29 Correlações entre a composição química elementar da madeira e as propriedades do carvão vegetal

Propriedades do carvão vegetal	Composição Elementar da Madeira													
	350 °C						450 °C						550 °C	
	C	H	O	C	O	H	C	O	H	C	O	H	C	O
RG	0,54*	0,07 ^{ns}	-0,51*	0,50*	-0,08 ^{ns}	-0,48*	0,54*	-0,05 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,54*	-0,05 ^{ns}	-0,52*
DRA	-0,18 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,12 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,18 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,27 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,17 ^{ns}
TMS	-0,20 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,15 ^{ns}	-0,37*	0,19 ^{ns}	0,30 ^{ns}	-0,35*	0,12 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,29 ^{ns}	-0,35*	0,12 ^{ns}	0,34 ^{ns}
RP	-0,18 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,13 ^{ns}	-0,28 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,20 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,27 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,06 ^{ns}
Carbono elementar	-0,45*	-0,24 ^{ns}	0,46*	-0,22 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	0,24 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,27 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,29 ^{ns}
Hidrogênio elementar	-0,16 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,21 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,26 ^{ns}	-0,27 ^{ns}
Oxigênio elementar	0,47*	0,24 ^{ns}	-0,48*	0,23 ^{ns}	0,10 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	0,24 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,24 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	-0,27 ^{ns}
Voláteis	0,13 ^{ns}	0,15 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,11 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	0,10 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,10 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,14 ^{ns}
Carbono fixo	-0,22 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	0,18 ^{ns}	-0,19 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,18 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,27 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,26 ^{ns}
Minerais	0,44*	0,32 ^{ns}	-0,46*	0,44*	0,23 ^{ns}	-0,45*	0,41*	0,27 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,41*	0,27 ^{ns}	-0,43*
PCS	-0,27 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,29 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,27 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	0,18 ^{ns}
DE	-0,22 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,16 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,15 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,27 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,19 ^{ns}

RG: Rendimento gravimétrico da carbonização; DRA: Densidade relativa aparente; TMS: Tensão máxima suportada; RP: Resistência à penetração da semi esfera; PCS: Poder calorífico superior; DE: Densidade energética; C: Carbono elementar; O: Oxigênio elementar; H: Hidrogênio elementar; ^{ns}: Não significativo a 0,01 de significância; *: Significativo a 0,01 de significância.

5.5 Influência dos principais componentes químicos da madeira sobre as propriedades do carvão vegetal

As Tabelas 30, 31 e 32 apresentam as correlações entre a composição química da madeira e as propriedades inerentes ao carvão vegetal produzido a 350°C, 450°C e 550°C, respectivamente.

Nas tabelas supracitadas é possível observar que há uma forte correlação positiva e estatisticamente significativa entre o teor de minerais da madeira e do carvão vegetal. Este resultado é explicado pelo fato de os compostos minerais não volatilizarem nas temperaturas de carbonização utilizadas neste estudo. Assim sendo, durante o processo de carbonização, parte dos compostos orgânicos são volatilizados e os compostos inorgânicos permanecem na matriz sólida, ou seja, no carvão vegetal. Portanto, madeira com maior teor de minerais tende a gerar carvão com a mesma característica.

Outro resultado observado é a correlação mediana, negativa e estatisticamente significativa entre o teor de holocelulose da madeira e o rendimento gravimétrico do processo de carbonização observado para as três condições de carbonização.

O teor de holocelulose é a somatória dos teores de celulose e hemicelulose presentes nos materiais lignocelulósicos. As hemiceluloses são compostos lineares, ramificados e que apresentam menor massa molecular comparadas às demais macromoléculas que compõem a madeira. A celulose por sua vez é um polímero linear não ramificado de alta massa molecular. Devido a estas características, as hemiceluloses apresentam menor termorresistência sendo volatilizadas em sua quase totalidade nas temperaturas comumente utilizadas pelos processos de carbonização. A celulose por apresentar um único tipo de ligação entre moléculas de glicose (β 14) é totalmente degradada em temperaturas próximas a 350°C. Devido às características químicas apresentadas

pela celulose e hemiceluloses, um maior teor de holocelulose colabora com uma menor termorresistência da madeira em temperaturas comumente utilizadas para produção de carvão vegetal.

Pelas tabelas é possível inferir que uma maior densidade relativa aparente, densidade energética, tensão máxima suportada e resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal estejam correlacionadas com uma madeira com menor teor de lignina, e maior teor de minerais e holocelulose. Entretanto, acredita-se que seja uma correlação indireta.

Os materiais com maior teor de lignina total e menor teor de holocelulose e minerais, VM04 e MN463, apresentaram menor densidade básica. Espera-se que uma madeira de menor densidade básica dê origem a um carvão de menor densidade relativa aparente, menor densidade energética e que apresente propriedades mecânicas inferiores, como será confirmado no item 5.6.

Outro ponto a ser observado é com relação à influência do teor de lignina sobre o rendimento gravimétrico do processo de carbonização. Segundo alguma literaturas era esperado uma correlação forte e positiva entre as variáveis supracitadas (GOLDSTEIN, 1977; SARKANEN; LUDWIG, 1971). Este comportamento não foi evidenciado em nenhuma das três condições de carbonização. Uma possível explicação seria que não apenas a quantidade de lignina seria importante para a produtividade do processo de carbonização, mas também a qualificação seria um outro fator de relevância, como anteriormente discutido no item 5.2.

Tabela 30 Correlações entre a composição química da madeira e as propriedades do carvão vegetal produzido a uma temperatura final de 350°C

Propriedades do carvão	Principais Componentes Químicos da Madeira			
	Extrativos Totais	Lignina Total	Minerais	Holocelulose
Rendimento gravimétrico	0,37*	0,09 ^{ns}	0,09 ^{ns}	-0,42*
Densidade relativa aparente	0,17 ^{ns}	-0,73*	0,74*	0,61*
Tensão máxima suportada	0,06 ^{ns}	-0,52*	0,54*	0,49*
Resistência a penetração da semiesfera	0,03 ^{ns}	-0,52*	0,47*	0,52*
Carbono elementar	-0,40*	0,11 ^{ns}	-0,45*	0,24 ^{ns}
Hidrogênio elementar	0,09 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,15 ^{ns}
Oxigênio elementar	0,38*	-0,09 ^{ns}	0,42*	-0,25 ^{ns}
Teor de materiais voláteis	0,20 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,21 ^{ns}	-0,14 ^{ns}
Teor de carbono fixo	-0,32 ^{ns}	0,13 ^{ns}	-0,38*	0,15 ^{ns}
Teor de minerais	0,61*	-0,45*	0,80*	-0,07 ^{ns}
Poder calorífico superior	-0,52*	0,41*	-0,70*	0,04 ^{ns}
Densidade energética	0,14 ^{ns}	-0,72*	0,71*	0,64*

^{ns}: Não significativo a 0,01 de significância; *: Significativo a 0,01 de significância.

Tabela 31 Correlações entre a composição química da madeira e as propriedades do carvão vegetal produzido a uma temperatura final de 450°C

Propriedades do carvão	Principais Componentes Químicos da Madeira			
	Extrativos Totais	Lignina Total	Minerais	Holocelulose
Rendimento gravimétrico	0,16 ^{ns}	0,21 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,36*
Densidade relativa aparente	0,15 ^{ns}	-0,72*	0,71*	0,62*
Tensão máxima suportada	-0,09 ^{ns}	-0,47*	0,40*	0,58*
Resistência a penetração da semiesfera	-0,11 ^{ns}	-0,41*	0,46*	0,52*
Carbono elementar	-0,18 ^{ns}	0,10 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	0,05 ^{ns}
Hidrogênio elementar	0,19 ^{ns}	-0,43*	0,28 ^{ns}	0,29 ^{ns}
Oxigênio elementar	0,18 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	0,21 ^{ns}	-0,07 ^{ns}
Teor de materiais voláteis	-0,10 ^{ns}	0,15 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	-0,07 ^{ns}
Teor de carbono fixo	-0,02 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,09 ^{ns}
Teor de minerais	0,55*	-0,36*	0,70*	-0,12 ^{ns}
Poder calorífico superior	0,49*	-0,46*	0,36*	0,06 ^{ns}
Densidade energética	0,21 ^{ns}	-0,75*	0,72*	0,60*

^{ns}: Não significativo a 0,01 de significância; *: Significativo a 0,01 de significância.

Tabela 32 Correlações entre a composição química da madeira e as propriedades do carvão vegetal produzido a uma temperatura final de 550°C

Propriedades do carvão	Principais Componentes Químicos da Madeira			
	Extrativos Totais	Lignina Total	Minerais	Holocelulose
Rendimento gravimétrico	0,28 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,11 ^{ns}	-0,36*
Densidade relativa aparente	0,18 ^{ns}	-0,74*	0,72*	0,62*
Tensão máxima suportada	0,07 ^{ns}	-0,50*	0,42*	0,46*
Resistência a penetração da semiesfera	0,12 ^{ns}	-0,53*	0,53*	0,44*
Carbono elementar	0,17 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	0,06 ^{ns}	-0,02 ^{ns}
Hidrogênio elementar	0,03 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	0,2 ^{ns}	0,19 ^{ns}
Oxigênio elementar	-0,19 ^{ns}	0,15 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,00 ^{ns}
Teor de materiais voláteis	-0,13 ^{ns}	0,10 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Teor de carbono fixo	0,03 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Teor de minerais	0,38*	-0,27 ^{ns}	0,68*	-0,07 ^{ns}
Poder calorífico superior	-0,18 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	0,14 ^{ns}
Densidade energética	0,13 ^{ns}	-0,69*	0,66*	0,61*

^{ns}: Não significativo a 0,01 de significância; *: Significativo a 0,01 de significância.

5.6 Influência das propriedades anatômicas e densidade básica da madeira sobre as propriedades do carvão vegetal

As Tabelas 33, 34 e 35 apresentam as correlações lineares de Pearson entre as propriedades anatômicas e densidade básica da madeira com as propriedades do carvão vegetal produzido nas temperaturas de 350°C, 450°C e 550°C, respectivamente.

Pelas tabelas supracitadas é possível observar que as variáveis anatômicas largura de fibra, frequência e diâmetro de vaso não apresentaram grande influência sobre as propriedades do carvão vegetal. Entretanto, a densidade básica, espessura de parede, diâmetro de lume e fração parede da fibra apresentaram maior influência sobre a densidade relativa aparente, densidade energética, tensão máxima suportada e resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal.

O resultado infere que o comportamento físico e mecânico do carvão vegetal está intimamente relacionado com algumas propriedades anatômicas da madeira. Como observado no item 5.3, as variáveis anatômicas espessura de parede da fibra, diâmetro de lume e fração parede da fibra são fortemente correlacionadas à densidade básica da madeira. Logo, por consequência, a densidade básica tende a apresentar forte correlação com as propriedades físicas e mecânicas do carvão vegetal.

Pode-se observar que a densidade relativa aparente do carvão é diretamente proporcional à espessura de parede da fibra, fração parede da fibra e densidade básica da madeira. Madeiras com menor proporção de espaços vazios tendem a dar origem a um carvão com a mesma característica quando carbonizada. Logo, madeiras mais densas, com maior espessura de parede e fração parede tendem a produzir carvão com maior massa por unidade de volume.

Tabela 33 Correlações entre as propriedades anatômicas da madeira e densidade básica com as propriedades do carvão vegetal produzido a uma temperatura final de 350°C

Propriedades do carvão	DB	Propriedades Anatômicas da Madeira							
		C. fibra	L. fibra	D. lume	E. parede	F. parede	F. vaso	D. vaso	
Rendimento gravimétrico	-0,21 ^{ns}	-0,51*	-0,41*	0,14 ^{ns}	-0,53*	-0,33 ^{ns}	0,45*	-0,39*	
Densidade relativa aparente	0,95*	0,55*	-0,28 ^{ns}	-0,87*	0,74*	0,88*	-0,04 ^{ns}	0,10 ^{ns}	
Tensão máxima suportada	0,73*	0,55*	-0,12 ^{ns}	-0,72*	0,72*	0,79*	-0,15 ^{ns}	0,27 ^{ns}	
Resistência a penetração da semiesfera	0,68*	0,54*	-0,13 ^{ns}	-0,65*	0,63*	0,70*	-0,04 ^{ns}	0,19 ^{ns}	
Carbono elementar	-0,27 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,49*	0,30 ^{ns}	0,10 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	0,13 ^{ns}	
Hidrogênio elementar	0,25 ^{ns}	0,31 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	-0,26 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,27 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	0,05 ^{ns}	
Oxigênio elementar	0,25 ^{ns}	-0,2 ^{ns}	-0,47*	-0,26 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,19 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	
Teor de materiais voláteis	0,09 ^{ns}	0,16 ^{ns}	-0,38*	-0,24 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,13 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	0,17 ^{ns}	
Teor de carbono fixo	-0,21 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0,50*	0,34 ^{ns}	0,07 ^{ns}	-0,2 ^{ns}	0,07 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	
Teor de minerais	0,55*	-0,18 ^{ns}	-0,60*	-0,49*	0,01 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,44*	-0,29 ^{ns}	
Poder calorífico superior	-0,44*	0,05 ^{ns}	0,59*	0,42*	0,05 ^{ns}	-0,24 ^{ns}	-0,39*	0,29 ^{ns}	
Densidade energética	0,94*	0,57*	-0,24 ^{ns}	-0,86*	0,77*	0,89*	-0,08 ^{ns}	0,13 ^{ns}	

DB: Densidade básica; C. fibra: Comprimento da fibra; L. fibra: Largura da fibra; D. lume: Diâmetro do lume da fibra; E. parede: Espessura da parede da fibra; F. parede: Fração parede da fibra; F. vaso: Frequência de vaso; D. vaso: Diâmetro de vaso; ^{ns}: Não significativo a 0,01 de significância; *: Significativo a 0,01 de significância.

Tabela 34 Correlações entre as propriedades anatômicas da madeira e densidade básica com as propriedades do carvão vegetal produzido a uma temperatura final de 450°C

Propriedades do carvão	DB	Propriedades Anatômicas da Madeira							
		C. fibra	L. fibra	D. lume	E. parede	F. parede	F. vaso	D. vaso	
Rendimento gravimétrico	-0,37*	-0,51*	-0,16 ^{ns}	0,36*	-0,55*	-0,48*	0,46*	-0,34 ^{ns}	
Densidade relativa aparente	0,94*	0,59*	-0,21 ^{ns}	-0,86*	0,79*	0,90*	-0,09 ^{ns}	0,15 ^{ns}	
Tensão máxima suportada	0,68*	0,58*	0,09 ^{ns}	-0,63*	0,80*	0,75*	-0,23 ^{ns}	0,23 ^{ns}	
Resistência a penetração da semiesfera	0,71*	0,51*	0,08 ^{ns}	-0,67*	0,83*	0,80*	-0,19 ^{ns}	0,28 ^{ns}	
Carbono elementar	-0,14 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	0,04 ^{ns}	
Hidrogênio elementar	0,28 ^{ns}	0,33 ^{ns}	-0,19 ^{ns}	-0,26 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,09 ^{ns}	
Oxigênio elementar	0,13 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,08 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	
Teor de materiais voláteis	-0,30 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,25 ^{ns}	-0,20 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	0,12 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	
Teor de carbono fixo	0,20 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,21 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	0,15 ^{ns}	
Teor de minerais	0,43*	-0,28 ^{ns}	-0,55*	-0,32 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,55*	-0,41*	
Poder calorífico superior	0,37*	0,13 ^{ns}	-0,34 ^{ns}	-0,31 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,27 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	
Densidade energética	0,95*	0,58*	-0,26 ^{ns}	-0,86*	0,75*	0,89*	-0,04 ^{ns}	0,11 ^{ns}	

DB: Densidade básica; C. fibra: Comprimento da fibra; L. fibra: Largura da fibra; D. lume: Diâmetro do lume da fibra; E. parede: Espessura da parede da fibra; F. parede: Fração parede da fibra; F. vaso: Frequência de vaso; D. vaso: Diâmetro de vaso; ^{ns}: Não significativo a 0,01 de significância; *: Significativo a 0,01 de significância.

Tabela 35 Correlações entre as propriedades anatômicas da madeira e densidade básica com as propriedades do carvão vegetal produzido a uma temperatura final de 550°C

Propriedades do carvão	DB	Propriedades Anatômicas da Madeira							
		C. fibra	L. fibra	D. lume	E. parede	F. parede	F. vaso	D. vaso	
Rendimento gravimétrico	-0,18 ^{ns}	-0,57*	-0,28 ^{ns}	0,2 ^{ns}	-0,49*	-0,36*	0,48*	-0,38*	
Densidade relativa aparente	0,94*	0,58*	-0,23 ^{ns}	-0,85*	0,76*	0,88*	-0,06 ^{ns}	0,12 ^{ns}	
Tensão máxima suportada	0,67*	0,52*	-0,08 ^{ns}	-0,58*	0,59*	0,63*	-0,19 ^{ns}	0,14 ^{ns}	
Resistência a penetração da semiesfera	0,72*	0,45*	-0,22 ^{ns}	-0,74*	0,64*	0,76*	-0,2 ^{ns}	0,12 ^{ns}	
Carbono elementar	0,13 ^{ns}	0,24 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,09 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	0,00 ^{ns}	
Hidrogênio elementar	0,37*	0,15 ^{ns}	-0,15 ^{ns}	-0,35*	0,27 ^{ns}	0,34 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	0,11 ^{ns}	
Oxigênio elementar	-0,16 ^{ns}	-0,26 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,14 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	0,13 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	
Teor de materiais voláteis	-0,04 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,11 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	
Teor de carbono fixo	-0,09 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	-0,2 ^{ns}	0,07 ^{ns}	
Teor de minerais	0,46*	-0,21 ^{ns}	-0,41*	-0,37*	0,06 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,32 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	
Poder calorífico superior	0,06 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,06 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,14 ^{ns}	-0,27 ^{ns}	0,23 ^{ns}	
Densidade energética	0,90*	0,59*	-0,21 ^{ns}	-0,82*	0,75*	0,86*	-0,11 ^{ns}	0,16 ^{ns}	

DB: Densidade básica; C. fibra: Comprimento da fibra; L. fibra: Largura da fibra; D. lume: Diâmetro do lume da fibra; E. parede: Espessura da parede da fibra; F. parede: Fração parede da fibra; F. vaso: Frequência de vaso; D. vaso: Diâmetro de vaso; ^{ns}: Não significativo a 0,01 de significância; *: Significativo a 0,01 de significância.

Há uma relação forte, porém inversa, entre as propriedades mecânicas tensão máxima suportada, resistência à penetração da semi esfera e densidade relativa aparente do carvão vegetal com a dimensão do diâmetro do lume da fibra. Esta variável anatômica, como discutido no item 5.3, apresenta influência direta sobre o volume de espaço vazio na madeira, o que afeta negativamente a densidade básica da mesma. A densidade do carvão é altamente correlacionada com a densidade da madeira (VITAL; JESUS; VALENTE, 1986). Logo, madeiras compostas por fibras com maior diâmetro de lume tendem a produzir carvão com menor densidade relativa aparente, menor rigidez e resistência mecânica.

A densidade energética do carvão é o resultado do produto entre a densidade relativa aparente e o poder calorífico superior do carvão vegetal. O poder calorífico superior é função da composição elementar do material. Logo, se os parâmetros de carbonização forem constantes, a composição elementar tende a apresentar pouca ou nenhuma variação. A densidade relativa aparente por sua vez é altamente influenciada pelas variáveis anatômicas e, conseqüentemente, densidade básica da madeira, apresentando portanto uma maior magnitude de variação. Pelo dito, a densidade energética sofre maior influência da densidade do carvão vegetal, que por sua vez é altamente influenciada pelos parâmetros anatômicos e físicos da madeira.

A Tabela 36 apresenta as análises estatísticas dos ajustes entre a densidade básica e variáveis anatômicas da madeira com a densidade relativa aparente do carvão vegetal para as três condições de carbonização. Observa-se que as equações ajustadas foram significativas pelo teste F ($\alpha=0,01$), apresentaram altos coeficientes de determinação ajustados, atenderam aos pressupostos residuais de normalidade e homogeneidade de variância. Tais resultados inferem que pode-se estimar com segurança a densidade do carvão vegetal em função da densidade básica e variáveis anatômicas da madeira, com

exceção apenas da espessura da parede da fibra, cujos coeficientes lineares não foram significativos ($\alpha=0,01$).

Tabela 36 Estatística dos ajustes entre a densidade básica e variáveis anatômicas da madeira e a densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização

Modelo	Temperatura (°C)	Coeficientes	R ²	Análise dos Desvios			
				S _{xy} (g.cm ⁻³)	W	GQ	
DRA= β_0 + β_1 .DB	350	β_0	-0,19617*	0,90*	0,027	ns	ns
		β_1	1,04613*				
	450	β_0	-0,21652*	0,88*	0,032	ns	ns
		β_1	1,09351*				
	550	β_0	-0,21870*	0,89*	0,030	ns	ns
		β_1	1,06620*				
DRA= β_0 + β_1 .DLF	350	β_0	0,643197*	0,75*	0,044	ns	ns
		β_1	-0,037660*				
	450	β_0	0,663010*	0,73*	0,048	ns	ns
		β_1	-0,039645*				
	550	β_0	0,634818*	0,72*	0,047	ns	ns
		β_1	-0,038118*				
DRA= β_0 + β_1 .EPF	350	β_0	0,006219 ^{ns}	0,53*	0,060	ns	ns
		β_1	0,072614*				
	450	β_0	-0,038145 ^{ns}	0,62*	0,057	ns	ns
		β_1	0,082814*				
	550	β_0	-0,027608 ^{ns}	0,57*	0,059	ns	ns
		β_1	0,077183*				
DRA= β_0 + β_1 .FP	350	β_0	-0,3450402*	0,77*	0,042	ns	ns
		β_1	0,0088106*				
	450	β_0	-0,4031193*	0,81*	0,040	ns	ns
		β_1	0,0095997*				
	550	β_0	-0,3790358*	0,77*	0,042	ns	ns
		β_1	0,0090889*				

R: Coeficiente de correlação; R²: Coeficiente de determinação; S_{xy}: Desvio padrão residual; W: Teste de normalidade residual Shapiro-Wilks; GQ: Teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; β_0 : Coeficiente linear da equação; β_1 : coeficiente angular da equação; DRA: Densidade relativa aparente do carvão vegetal; DB: Densidade básica; DLF: Diâmetro do lume da fibra; EPF: Espessura da parede da fibra; FP: Fração parede da fibra; ^{ns}: Não significativo a 0,01 de significância; *: Significativo a 0,01 de significância.

As Figuras 55, 56, 57 e 58 mostram o comportamento dos modelos lineares simples ajustados entre a densidade relativa aparente do carvão vegetal com densidade básica da madeira, diâmetro do lume da fibra, espessura da parede e fração parede da fibra, respectivamente, para as três condições de carbonização.

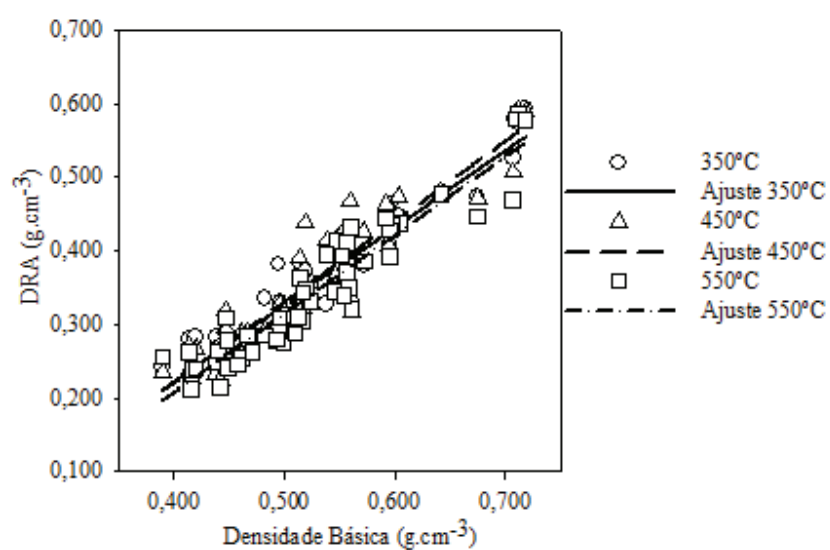


Figura 55 Relação funcional entre densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e densidade básica da madeira

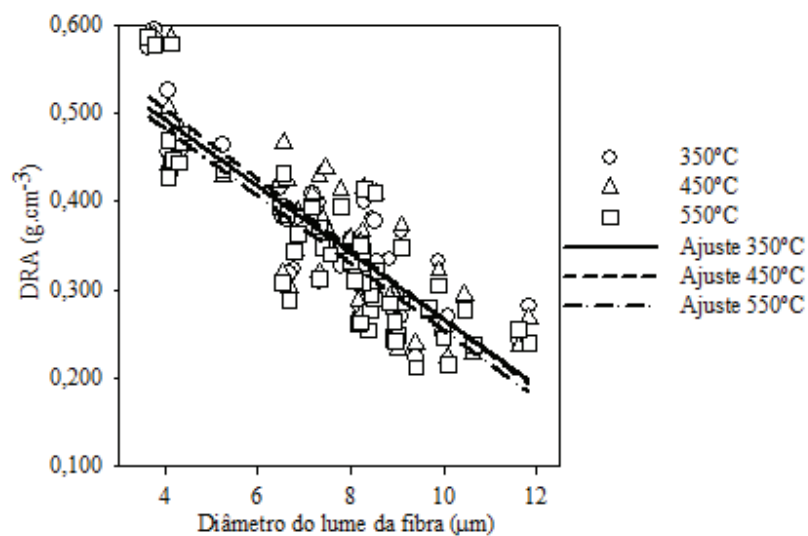


Figura 56 Relação funcional entre densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e diâmetro do lume da fibra

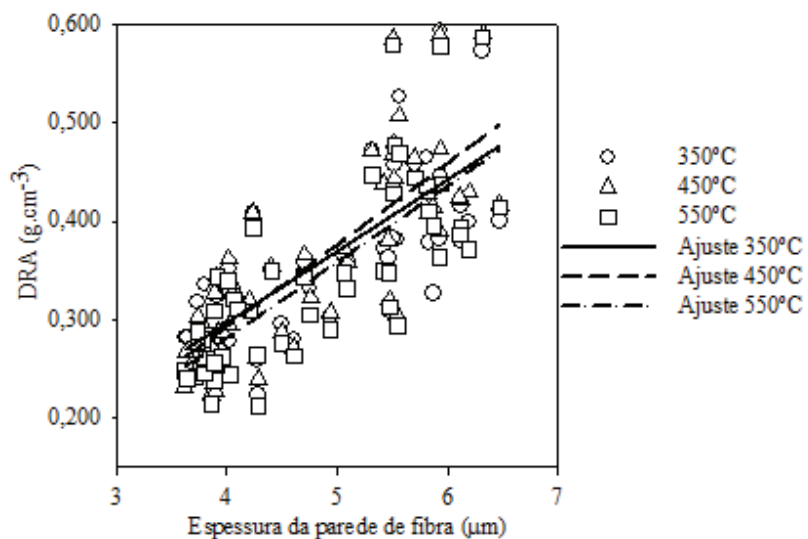


Figura 57 Relação funcional entre densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e espessura da parede da fibra

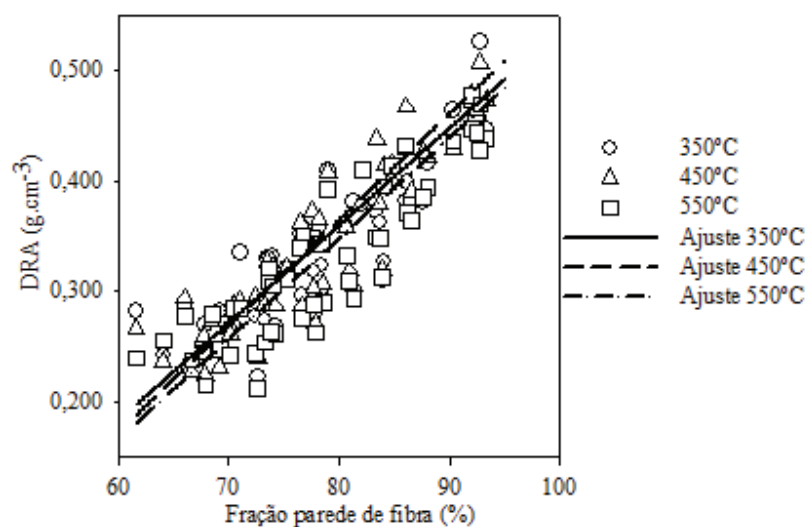


Figura 58 Relação funcional entre densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e fração parede da fibra.

A Tabela 37 apresenta as análises estatísticas dos ajustes entre a densidade básica e variáveis anatômicas da madeira com a densidade energética do carvão vegetal para as três condições de carbonização. Observa-se que as equações ajustadas foram significativas pelo teste F ($\alpha=0,01$), apresentaram altos coeficientes de determinação ajustados, atenderam aos pressupostos residuais de normalidade e homogeneidade de variância.

Tabela 37 Estatística dos ajustes entre a densidade básica e variáveis anatômicas da madeira e a densidade energética do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização

Modelo	Temperatura (°C)	Coeficientes	R ²	Análise dos Desvios			
				S _{xy} (cal.cm ⁻³)	W	GQ	
DE=β ₀ +β ₁ .DB	350	β ₀	-1103,9*	0,89*	181,0	ns	ns
		β ₁	6419,3*				
	450	β ₀	-1767,2*	0,89*	224,6	ns	ns
		β ₁	8063,9*				
	550	β ₀	-1774,9*	0,81*	329,4	ns	ns
		β ₁	8473,4*				
DE=β ₀ +β ₁ .DLF	350	β ₀	4044,78*	0,73*	280,7	ns	ns
		β ₁	-230,84*				
	450	β ₀	224,6392*	0,74*	346,9	ns	ns
		β ₁	-291,11*				
	550	β ₀	5018,83*	0,66*	435,3	ns	ns
		β ₁	-304,38*				
DE=β ₀ +β ₁ .EPF	350	β ₀	34,29 ^{ns}	0,58*	353,2	ns	ns
		β ₁	467,18*				
	450	β ₀	-285,43 ^{ns}	0,55*	453,7	ns	ns
		β ₁	576,05*				
	550	β ₀	-330,98 ^{ns}	0,54*	506,5	ns	ns
		β ₁	628,86*				
DE=β ₀ +β ₁ .FP	350	β ₀	-2093,320*	0,78*	253,0	ns	ns
		β ₁	55,020*				
	450	β ₀	-3003,855*	0,78*	317,2	ns	ns
		β ₁	69,037*				
	550	β ₀	-3141,38*	0,72*	392,7	ns	ns
		β ₁	73,39*				

R: Coeficiente de correlação; R²: Coeficiente de determinação; S_{xy}: Desvio padrão residual; W: Teste de normalidade residual Shapiro-Wilks; GQ: Teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; β₀: Coeficiente linear da equação; β₁: coeficiente angular da equação; DE: Densidade energética do carvão vegetal; DB: Densidade básica; DLF: Diâmetro do lume da fibra; EPF: Espessura da parede da fibra; FP: Fração parede da fibra; ^{ns}: Não significativo a 0,01 de significância; *: Significativo a 0,01 de significância.

As Figuras 59, 60, 61 e 62 mostram o comportamento do modelo linear simples ajustado entre a densidade energética do carvão vegetal com densidade básica da madeira, diâmetro do lume da fibra, espessura da parede da fibra e fração parede da fibra, respectivamente, para as três condições de carbonização.

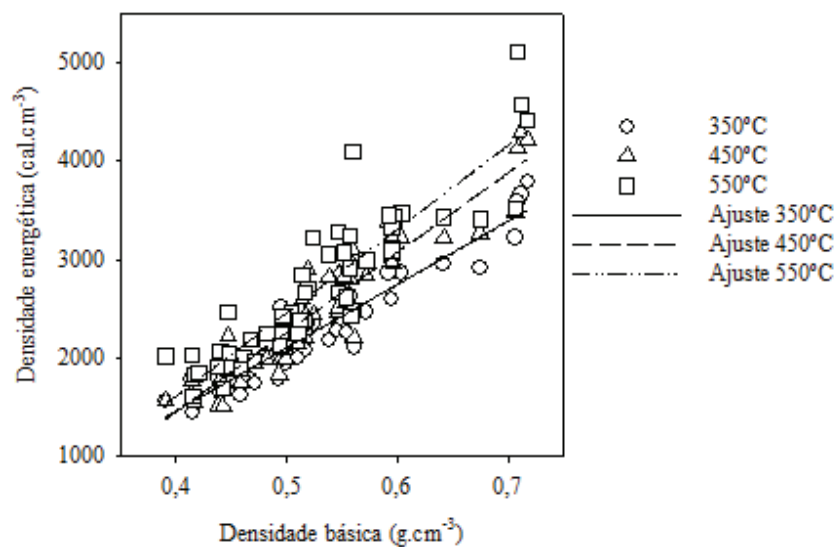


Figura 59 Relação funcional entre densidade energética do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e densidade básica da madeira

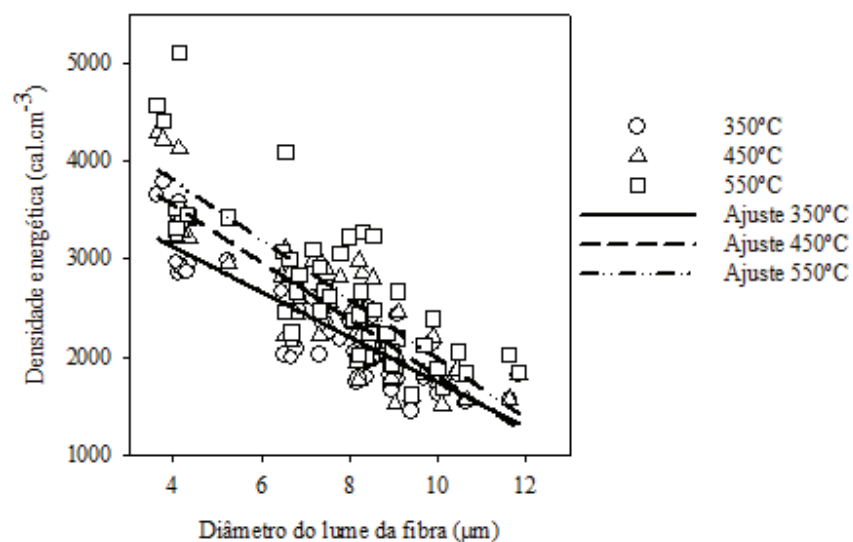


Figura 60 Relação funcional entre densidade energética do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e diâmetro do lume da fibra

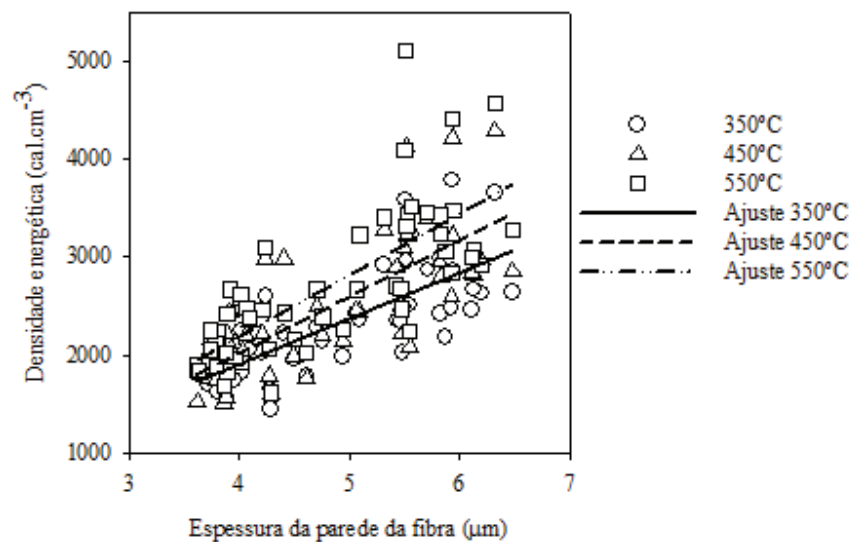


Figura 61 Relação funcional entre densidade energética do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e espessura da parede da fibra

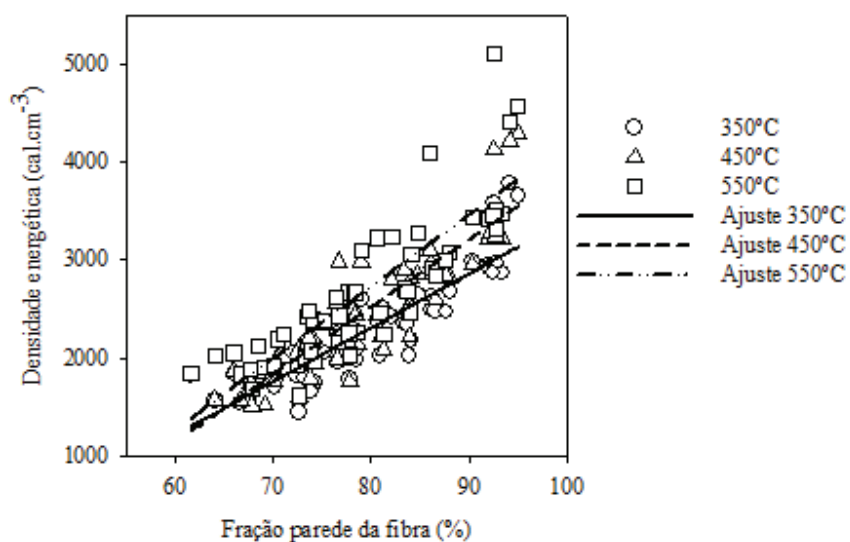


Figura 62 Relação funcional entre densidade energética do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e fração parede da fibra

Como previamente discutido, as variáveis densidade básica, diâmetro do lume, espessura da parede e fração parede da fibra apresentam alta correlação com a densidade relativa aparente do carvão. Consequentemente, estas variáveis madeiras devem apresentar alta correlação com a densidade energética do carvão vegetal. Portanto, madeiras com maior densidade básica, maior espessura de parede e fração parede e menor diâmetro do lume das fibras tendem a produzir carvão com maior densidade energética.

A Tabela 38 apresenta as análises estatísticas dos ajustes entre a densidade básica e variáveis anatômicas da madeira com a resistência à penetração da semi esfera pelo carvão vegetal para as três condições de carbonização. Observa-se que as equações ajustadas foram significativas pelo teste F ($\alpha=0,01$), apresentaram altos coeficientes de determinação ajustados, atenderam aos pressupostos residuais de normalidade e homogeneidade de variância.

Tabela 38 Estatística dos ajustes entre a densidade básica e variáveis anatômicas da madeira e a resistência à penetração da semiesfera do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização

Modelo	Temperatura (°C)	Coeficientes	R ²	Análise dos Desvios		
				S _{xy} (MPa.mm ⁻¹)	W	GQ
RP=β ₀ +β ₁ .DB	350	β ₀ -38,051*	0,45*	9,81	ns	ns
		β ₁ 112,953*				
	450	β ₀ -48,91*	0,49*	11,80	ns	ns
		β ₁ 146,61*				
	550	β ₀ -37,465*	0,51*	9,63	ns	ns
		β ₁ 123,953*				
RP=β ₀ +β ₁ .DLF	350	β ₀ 54,1555*	0,41*	10,15	ns	ns
		β ₁ -4,2724*				
	450	β ₀ 70,2284*	0,43*	12,42	ns	ns
		β ₁ -5,4736*				
	550	β ₀ 66,1023*	0,53*	9,40	ns	ns
		β ₁ -4,9995*				
RP=β ₀ +β ₁ .EPF	350	β ₀ -23,429*	0,38*	10,42	ns	ns
		β ₁ 9,346*				
	450	β ₀ -45,984*	0,68*	9,25	ns	ns
		β ₁ 15,475*				
	550	β ₀ -19,477*	0,39*	10,69	ns	ns
		β ₁ 9,852*				
RP=β ₀ +β ₁ .FP	350	β ₀ -62,9221*	0,48*	9,53	ns	ns
		β ₁ 1,0620*				
	450	β ₀ -91,3424*	0,63*	10,07	ns	ns
		β ₁ 1,5063*				
	550	β ₀ -67,3393*	0,57*	8,96	ns	ns
		β ₁ 1,1980*				

R: Coeficiente de correlação; R²: Coeficiente de determinação; S_{xy}: Desvio padrão residual; W: Teste de normalidade residual Shapiro-Wilks; GQ: Teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; β₀: Coeficiente linear da equação; β₁: coeficiente angular da equação; RP: Resistência a penetração da semi esfera; Densidade energética do carvão vegetal; DB: Densidade básica; DLF: Diâmetro do lume da fibra; EPF: Espessura da parede da fibra; FP: Fração parede da fibra; ns: Não significativo a 0,01 de significância; *: Significativo a 0,01 de significância.

As Figuras 63, 64, 65 e 66 mostram o comportamento dos modelos lineares simples ajustados entre a resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal com densidade básica da madeira, diâmetro do lume da fibra, espessura da parede da fibra e fração parede da fibra, respectivamente, para as três condições de carbonização.

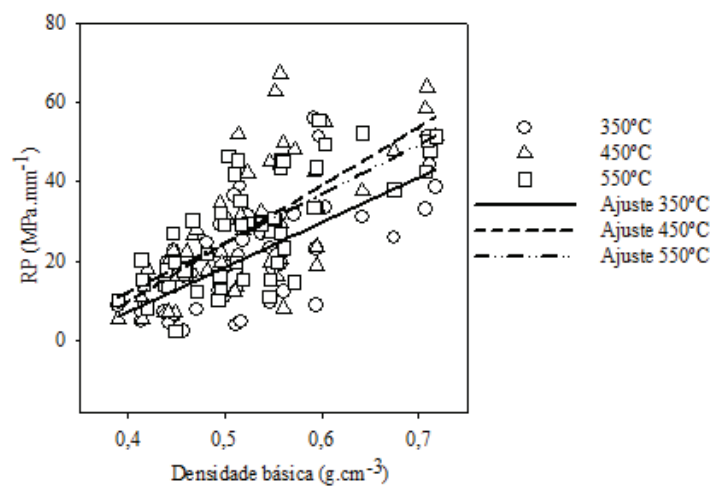


Figura 63 Relação funcional entre a resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e densidade básica da madeira

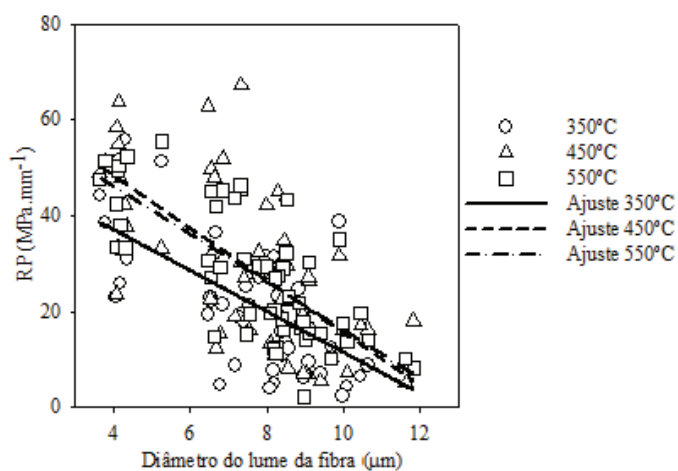


Figura 64 Relação funcional entre a resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e diâmetro do lume das fibras

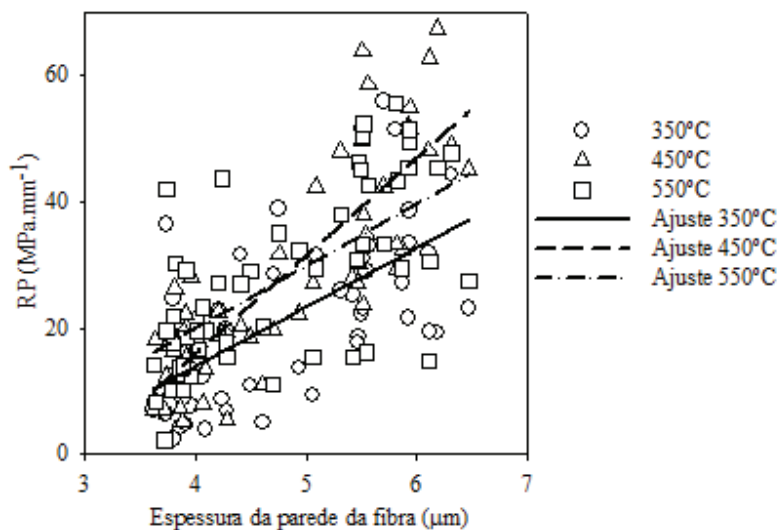


Figura 65 Relação funcional entre a resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e espessura da parede das fibras

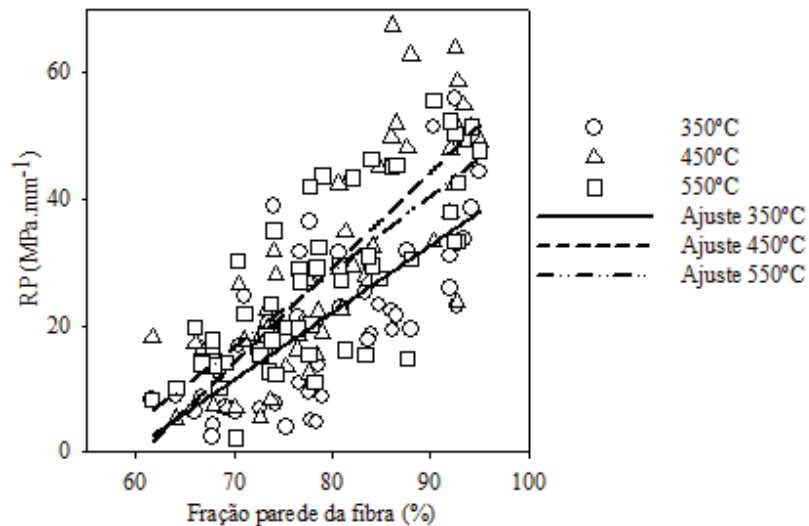


Figura 66 Relação funcional entre a resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e fração parede das fibras

Pelas figuras supracitadas, é possível perceber que a resistência à penetração da semi esfera pelo carvão vegetal correlaciona-se positivamente com a densidade básica, espessura da parede e fração parede das fibras da madeira. O oposto ocorre quando observamos o comportamento da propriedade mecânica em questão, em função da dimensão do diâmetro do lume da fibra.

As variáveis anatômicas e densidade básica da madeira se mostraram altamente influentes sobre a resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal. Tal afirmação pode estar ligada ao fato de estas propriedades se correlacionarem fortemente com a densidade relativa aparente do carvão vegetal. Maiores quantidades de massa por unidade de volume no carvão possivelmente contribuem com uma maior rigidez do mesmo. Portanto, madeiras com menores valores em diâmetro do lume da fibra, maiores valores em densidade básica, espessura da parede e fração parede da fibra tendem a originar um carvão mais rígido quando carbonizadas.

A Tabela 39 apresenta as análises estatísticas dos ajustes entre a densidade básica e variáveis anatômicas da madeira com a tensão máxima suportada pelo carvão vegetal para as três condições de carbonização. Observa-se que as equações ajustadas foram significativas pelo teste F ($\alpha=0,01$), apresentaram altos coeficientes de determinação ajustados, atenderam aos pressupostos residuais de normalidade e homogeneidade de variância.

Tabela 39 Estatística dos ajustes entre a densidade básica e variáveis anatômicas da madeira e a tensão máxima suportada pelo carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização

Modelo	Temperatura (°C)	Coeficientes	R ²	Análise dos Desvios			
				S _{xy} (MPa)	W	GQ	
TMS=β ₀ +β ₁ .DB	350	β ₀	-14,351*	0,53*	4,79	ns	ns
		β ₁	63,879*				
	450	β ₀	-10,955*	0,45*	5,21	ns	ns
		β ₁	59,624*				
	550	β ₀	-67,3393*	0,57*	8,96	ns	ns
		β ₁	1,1980*				
TMS=β ₀ +β ₁ .DLF	350	β ₀	38,4053*	0,51*	4,85	ns	ns
		β ₁	-2,4959*				
	450	β ₀	37,2913*	0,39*	5,49	ns	ns
		β ₁	-2,1996*				
	550	β ₀	36,4985*	0,33*	5,16	ns	ns
		β ₁	-1,8223*				
TMS=β ₀ +β ₁ .EPF	350	β ₀	-30,89448*	0,62*	4,27	ns	ns
		β ₁	0,63181*				
	450	β ₀	-9,7653*	0,63*	4,28	ns	ns
		β ₁	6,2930*				
	550	β ₀	2,4828 ^{ns}	0,33*	5,15	ns	ns
		β ₁	4,1787*				
TMS=β ₀ +β ₁ .FP	350	β ₀	-30,89448*	0,62*	4,27	ns	ns
		β ₁	0,63181*				
	450	β ₀	-27,46310*	0,55*	4,67	ns	ns
		β ₁	0,60315*				
	550	β ₀	-13,48145*	0,38*	4,94	ns	ns
		β ₁	0,45353*				

R: Coeficiente de correlação; R²: Coeficiente de determinação; S_{xy}: Desvio padrão residual; W: Teste de normalidade residual Shapiro-Wilks; GQ: Teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; β₀: Coeficiente linear da equação; β₁: coeficiente angular da equação; TMS: Tensão máxima suportada; Densidade energética do carvão vegetal; DB: Densidade básica; DLF: Diâmetro do lume da fibra; EPF: Espessura da parede da fibra; FP: Fração parede da fibra; ^{ns}: Não significativo a 0,01 de significância; *: Significativo a 0,01 de significância.

As Figuras 67, 68, 69 e 70 mostram o comportamento dos modelos lineares simples ajustados entre a tensão máxima suportada do carvão vegetal com a densidade básica da madeira, diâmetro do lume da fibra, espessura da parede da fibra e fração parede da fibra, respectivamente, para as três condições de carbonização.

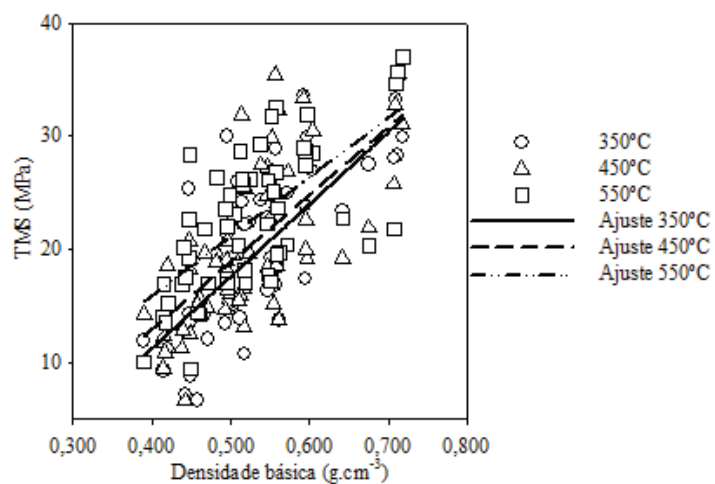


Figura 67 Relação funcional entre a tensão máxima suportada pelo carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e densidade básica da madeira

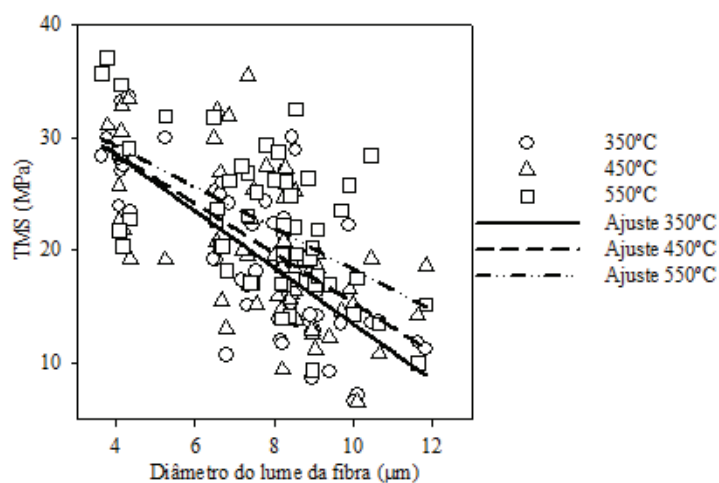


Figura 68 Relação funcional entre a tensão máxima suportada pelo carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e diâmetro do lume das fibras

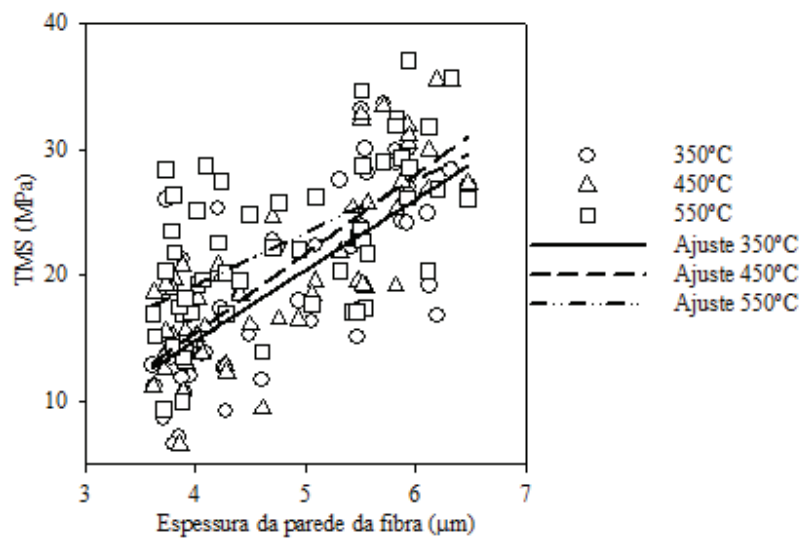


Figura 69 Relação funcional entre a tensão máxima suportada pelo carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e espessura da parede das fibras

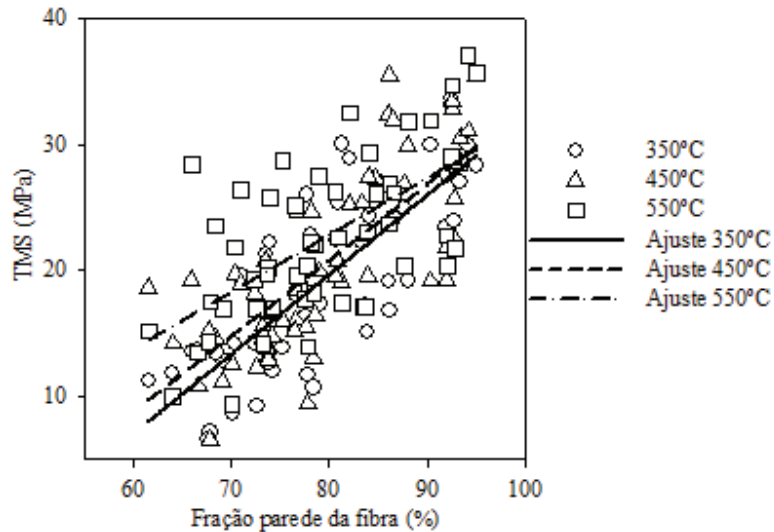


Figura 70 Relação funcional entre a tensão máxima suportada pelo carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização e fração parede das fibras

As figuras apresentam a dispersão dos dados de tensão máxima suportada pelo carvão vegetal em função das variáveis densidade básica, diâmetro do lume, espessura da parede e fração parede da fibra, respectivamente. Observa-se que há uma relação direta entre a resistência do carvão vegetal e as variáveis densidade básica, espessura de parede e fração parede das fibras. Comportamento oposto ocorre entre a propriedade mecânica do carvão vegetal e a dimensão do diâmetro do lume da fibra.

O comportamento observado para a tensão máxima suportada pelo carvão vegetal em função das propriedades físicas e anatômicas da madeira foi semelhante ao comportamento da outra variável mecânica, resistência à penetração da semi esfera. Os argumentos utilizados na explicação e discussão do comportamento da resistência à penetração da semi esfera em função das variáveis da madeira podem ser utilizados na explicação do comportamento da tensão máxima suportada pelo carvão vegetal.

Aparentemente, as variáveis da madeira que apresentam alta relação com a densidade relativa aparente do carvão vegetal influenciam também suas propriedades mecânicas. Logo, madeiras com propriedades físicas e anatômicas que favorecem a produção de um carvão mais denso também contribuem com o aumento da rigidez e resistência do mesmo.

5.7 Relação entre a densidade relativa aparente e as propriedades mecânicas do carvão vegetal

A Tabela 40 apresenta os ajustes entre as propriedades mecânicas módulo de elasticidade e ruptura do carvão vegetal e a densidade relativa aparente do mesmo. Nesta ainda encontram-se as análises estatísticas e testes dos pressupostos residuais inerentes a cada ajuste

Tabela 40 Estatística dos ajustes entre a densidade relativa aparente do carvão vegetal e as propriedades mecânicas do mesmo, para as três condições de carbonização

Modelo	Temperatura (°C)	Coeficientes	R ²	Análise dos Desvios			
				S _{xy}	W	GQ	
RP= $\beta_0+\beta_1$.DRA	350	β_0	-17,656*	0,52*	9,14	ns	ns
		β_1	110,186*				
	450	β_0	-2,232 ^{ns}	0,69*	3,88	ns	ns
		β_1	63,100*				
	550	β_0	-11,540*	0,56*	9,12	ns	ns
		β_1	114,776*				
TMS= $\beta_0+\beta_1$.DRA	350	β_0	-3,381 ^{ns}	0,64*	4,16	ns	ns
		β_1	63,904*				
	450	β_0	-2,232 ^{ns}	0,69*	3,88	ns	ns
		β_1	63,100*				
	550	β_0	5,020*	0,52*	4,34	ns	ns
		β_1	51,100*				

R: Coeficiente de correlação; R²: Coeficiente de determinação; S_{xy}: Desvio padrão residual; W: Teste de normalidade residual Shapiro-Wilks; GQ: Teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; β_0 : Coeficiente linear da equação; β_1 : Coeficiente angular da equação; RP: Resistência a penetração da semi esfera do carvão vegetal; TMS: Tensão máxima suportada pelo carvão vegetal; DRA: Densidade relativa aparente do carvão vegetal; e^{ns}: ns: Não significativo a 0,01 de significância; *: Significativo a 0,01 de significância.

As Figuras 71 e 72 mostram a dispersão dos dados da resistência à penetração da semi esfera e tensão máxima suportada em função da densidade relativa aparente do carvão vegetal, repectivamente. Nestas ainda é possível observar as curvas médias estimadas entre as variáveis mecânicas e a variável física do carvão vegetal para as três condições de carbonização.

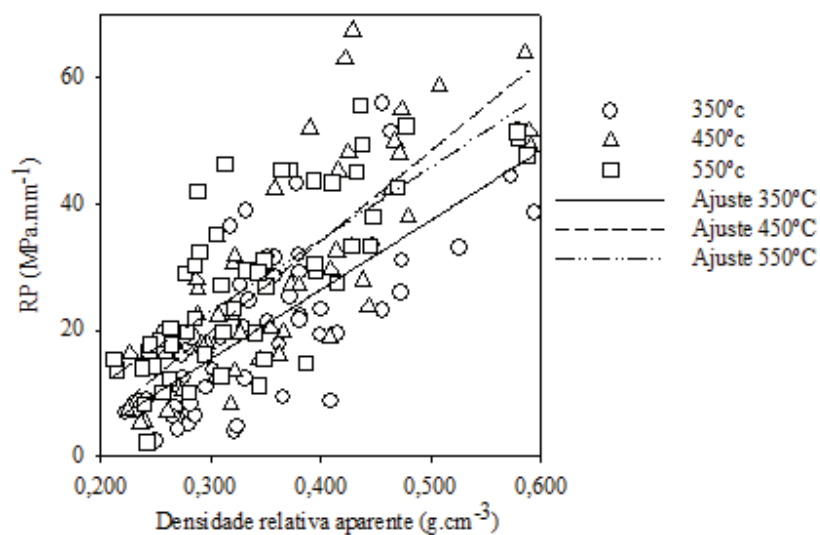


Figura 71 Relação funcional entre resistência à penetração da semi esfera e densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização

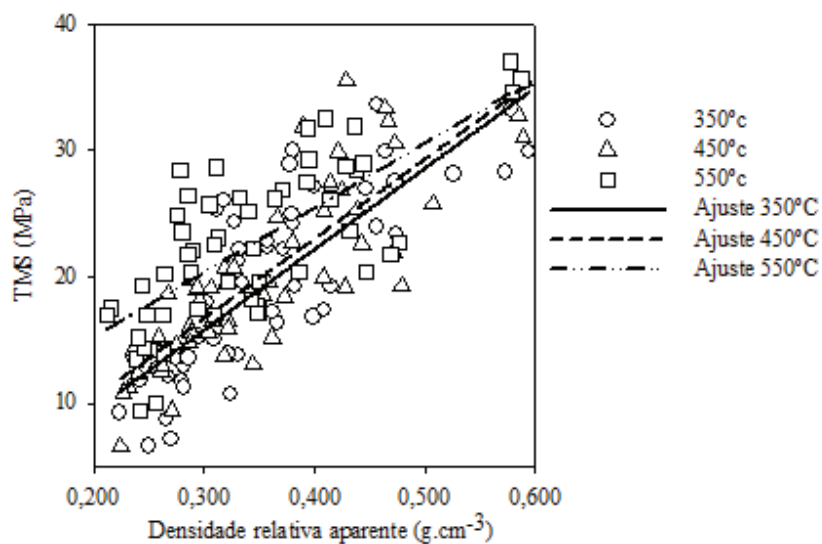


Figura 72 Relação funcional entre tensão máxima suportada e densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido nas três condições de carbonização

Nas Figuras 71 e 72 pode-se observar que as propriedades mecânicas apresentam direta relação com a propriedade física densidade relativa aparente do carvão vegetal. Como mencionado anteriormente, uma maior quantidade de massa por unidade volume no carvão vegetal tende a fazer com que o mesmo seja mais rígido e resistente.

6 CONCLUSÕES

6.1 Caracterização física, química e anatômica da madeira e determinação do padrão de variação radial das propriedades em questão

- a) A madeira oriunda do material *C. citriodora* apresentou maiores valores em densidade básica e energética, maior teor em minerais e extrativo totais, maior comprimento da fibra, espessura da parede e fração parede da fibra comparado aos demais materiais. Entretanto, apresentou menores valores em teor de lignina total, diâmetro da fibra e diâmetro do lume da fibra.
- b) O clone MN463 apresentou menores valores em densidade básica e energética, menor teor em hidrogênio elementar, menor poder calorífico superior, menor espessura da parede da fibra, fração parede da fibra e maior diâmetro de lume da fibra comparado aos demais materiais.
- c) O clone VM04 apresentou menor frequência e maior diâmetro de vaso.
- d) Há uma tendência de incremento, no sentido câmbio-medula, do teor de extrativos totais, lignina total, carbono elementar, poder calorífico superior e diâmetro do lume da fibra.
- e) Há uma tendência de decréscimo, no sentido câmbio-medula, da densidade básica e energética, teor em holocelulose e oxigênio elementar, comprimento da fibra, diâmetro da fibra, espessura da parede da fibra, fração parede da fibra e frequência de vaso.
- f) Não foi observado um padrão de variação radial característico para o teor de minerais.

6.2 Caracterização física, química e mecânica do carvão vegetal produzido em três distintas temperaturas de carbonização

- a) O carvão vegetal de *C. citriodora* apresentou valores superiores em densidade relativa aparente, teor de minerais e hidrogênio elementar, maiores valores em resistência à penetração da semi esfera e tensão máxima suportada;
- b) O carvão vegetal do clone MN463 apresentou maior rendimento gravimétrico e menor tensão máxima suportada;
- c) O carvão vegetal do clone VM04 apresentou menor teor de materiais inorgânicos;
- d) Aumentando a temperatura final de carbonização há um acréscimo do teor de carbono elementar, carbono fixo, minerais, tensão máxima suportada e resistência à penetração da semi esfera no carvão vegetal produzido, enquanto que reduz teor de oxigênio e hidrogênio elementar e compostos voláteis;
- e) Carvão produzido com madeira mais próxima da medula tende a apresentar maior rendimento gravimétrico e teor em minerais., além de menor densidade relativa aparente, menor concentração em hidrogênio elementar, menor resistência, rigidez e menor densidade energética.

6.3 Influência das variáveis anatômicas sobre a densidade básica da madeira

- a) O diâmetro do lume da fibra, espessura da parede da fibra e fração parede da fibra apresentam alta relação com a densidade básica da madeira;

- b) As demais variáveis anatômicas como comprimento da fibra, largura da fibra, frequência de elemento de vaso e diâmetro de elemento de vaso apresentaram baixas relações com a densidade básica da madeira.

6.4 Influência das propriedades anatômicas da madeira sobre as propriedades físicas e mecânicas do carvão vegetal

- a) A densidade relativa aparente, densidade energética, resistência e rigidez do carvão vegetal apresentaram altas relações com a densidade básica, diâmetro do lume da fibra, espessura da parede da fibra e fração parede da fibra;
- b) Quanto maior for a densidade básica, espessura da parede da fibra e fração parede da fibra, maior tende a ser a densidade relativa aparente, tensão máxima suportada e resistência à penetração da semi esfera do carvão vegetal;
- c) Quanto maior for o diâmetro do lume da fibra menor tende a ser a densidade relativa aparente, tensão máxima suportada e resistência a penetração da semi esfera do carvão vegetal.

6.5 Influência da densidade relativa aparente sobre as propriedades mecânicas do carvão vegetal

Carvão com maior densidade relativa aparente tende a apresentar maior resistência mecânica e rigidez.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, C. R. et al. Calibrações por meio da técnica da espectroscopia no infravermelho próximo para teor de extrativos totais, de lignina total e holocelulose usando espectros obtidos na madeira sólida. **Ambiência**, Guarapuava, v. 7, n. 1, p. 39-49, 2011.
- ANTAL, M. J.; MOK, W. S. L. Review of methods for improving the yield of charcoal from biomass. **Energy & Fuels**, Washington, v. 4, n. 3, p. 221-225, 1990.
- ARANTES, M. D. C. et al. Características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 423-431, 2013.
- ARANTES, M. D. C. et al. Gaseificação de materiais lignocelulósicos para geração de energia elétrica. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 4, p. 525-533, out./dez. 2008.
- ARAUJO, T. P. et al. Análise imediata do carvão vegetal produzido na região do alto-turi/ma e sua possível aplicação em alto-forno para produção de ferro-gusa. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 5., 2010, Maceió. **Anais...** Maceió: IFAL, 2010. Disponível em: <<http://connepi.ifal.edu.br/ocs/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/viewFile/1453/548>>. Acesso em: 10 mar. 2014.
- ASSIS, P. S.; ALMEIDA, L. Z.; PORTO, F. M. **Utilização do carvão vegetal na siderurgia**: produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte: CETEC, 1982. 318 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**: pastas celulósicas e madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1983. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1983. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941-02:** determinação da densidade básica em madeira. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999:** papel, cartão, pastas celulósicas e madeira: determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525° C. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853:** madeira: determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano. Rio de Janeiro, 2003. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF:** ano base 2010. Brasília, 2010. 150 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF:** ano base 2011. Brasília, 2011. 150 p.

BARBOSA, L. C. A. et al. Determinação da relação siringila/guaiacila da lignina em madeiras de eucalipto por pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas (PI CG/EM). **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 8, p. 2035-2041, 2008.

BLANKENHORN, 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.

BRITO, J. O. **Estudo das influências da temperatura, taxa de aquecimento e densidade da madeira de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus citriodora* sobre os resíduos sólidos da pirólise.** 1992. 81 f. Tese (Livre Docência em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura de “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1992a.

BRITO, J. O. **Estudos das influências da temperatura, taxa de aquecimento e densidade da madeira de *Eucalyptus citriodora* sobre os resíduos sólidos da pirólise.** 1992. 88 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1992b.

BRITO, J. O. **Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico.** Piracicaba: IPEF, 1993. 6 p. (Circular Técnica, 181).

BUCHANAN, M. A. **Extraneous components of wood: the chemistry of wood**. New York: R. Krieger, 1981. 689 p.

COUTINHO, A. R.; FERRAZ, E. S. B. Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização. **IPEF**, Piracicaba, n. 38, p. 33-37, abr. 1988.

COUTO, A. M. et al. Multivariate analysis applied to evaluation of *Eucalyptus* clones for bioenergy production. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 4, p. 525-533, 2013.

FRANKLIN, G. L. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood: resin composites, and a new macerating method for wood. **Nature**, London, v. 155, n. 3924, p. 51, 1945.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Produção mundial de carvão vegetal**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/626/DesktopDefault.aspx?PageID=626#ancor>>. Acesso em: 14 abr. 2014.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, 1980. 158 p. (Série de Publicações Técnicas, 001).

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 7-20, jan./abr. 2007.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. (Ed.). **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: J. Wiley, 1971. p. 241-298.

GOLDSTEIN, I. S. **Wood technology: chemical aspects**. Washington: America Chemical Society, 1977. 372 p.

GOMES, E. O.; OLIVEIRA, J. B. Teoria da carbonização da madeira. In: PENEDO, W. R. (Ed.). **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. v. 1, p. 27-42.

HIGUCHI, T. **Biochemistry and molecular biology of wood**. Berlin: Springer-Verlag, 1997. 362 p.

JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. New York: McGraw-Hill Book, 1940. 523 p.

LEMOS, A. L. F. et al. Madeira de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson sob aspectos físicos e anatômicos como fatores qualitativos. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 1, p. 1-8, 2012.

LIMA, I. L. et al. Propriedades da Madeira de *Eucalyptus umbra* R. T. Baker em função do diâmetro e da posição radial na tora. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 18, n. 3, p. 289-298, 2011.

LONGUI, E. L. et al. Caracterização do lenho e variação radial de *Pittosporum undulatum* Vent. (pau-incenso). **Hoehnea**, São Paulo, v. 38, n. 1, p. 37-50, Mar. 2011.

MALLAN, F. A. Eucalyptus improvement for lumber production. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1., 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IPEF/IPT, 1995. p. 1-19.

MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. In: PENEDO, W. R. (Ed.). **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. v. 1, p. 9-26.

MENDES, M. G.; GOMEZ, 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. 91-112.

MILAGRES, F. R. et al. Influência da idade na geração de modelos de espectroscopia nir, para predição de propriedades da madeira de *Eucalyptus* spp. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 37, n. 6, p. 1165-1173, 2013.

MOUTINHO, V. H. P. **Influência da variabilidade dimensional e da densidade a madeira de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp. na qualidade do carvão**. 2013. 164 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2013.

NEVES, T. A. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, out./dez. 2011.

NUMAZAWA, S. **Contribution a l'étude de la pyrolyse lente sous pression du bois**: détermination des paramètres optimaux du procédé et des caractéristiques des produits obtenus. 2000. 204 p. Thèse (Docteur de Génie de Procédés Industriels) - Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, 2000.

OLIVEIRA, A. C. et al. Avaliação de diferentes níveis de desbaste nas propriedades da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 1, p. 59-68, jan./mar. 2012.

OLIVEIRA, A. C. et al. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 37, n. 3, p. 557-566, 2013.

OLIVEIRA, E. de et al. Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 311-318, 2006.

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.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMMEISTER, J. C.; TOMAZELLO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica da madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 115-127, jan./fev. 2005.

PANSHIN, A. J. **Textbook of wood technology**. New York: MacGraw-Hill Book, 1964. v. 1, 643 p.

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C. **Curso de atualização e carvão vegetal**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 76 p.

PINHEIRO, P. C. da C.; FIGUEIREDO, F. J.; SEYE, O. Influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Biomassa & Energia**, Botucatu, v. 2, n. 2, p. 159-168, jul./dez. 2005.

PROTÁSIO, T. de P. et al. Seleção de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 97, p. 15-28, mar. 2013.

ROCHA, M. P.; KLITZKE, R. J. **Energia da madeira**. Curitiba: FUPEF, 1998. 86 p. (Série Didática).

SANTOS, L. C. et al. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 5, p. 971-980, 2012.

SANTOS, R. C. et al. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestal**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, jun. 2011.

SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. **Lignins**: occurrence, formation, structure and reation. New York: J. Wiley, 1971. 916 p.

SETTE JÚNIOR, C. R. et al. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, 2012, v. 36, n. 6, p. 1183-1190, 2012.

SILVA, C. A. Variação dimensional dos elementos xilemáticos em duas espécies madeireiras da Amazônia. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 22, p. 261-274, 1992.

SOUSA, L. C. et al. Desenvolvimento de modelos de calibração nirs para minimização das análises de madeiras de *Eucalyptus* spp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 591-599, jul./set. 2011.

SYRED, C. et al. A clean efficient system for producing charcoal, heat and power (CHaP). **Fuel**, London, v. 85, n. 10/11, p. 1566-1578, July/Aug. 2006.

TOMAZELLO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus saligna* e *E. grandis*. **IPEF**, Piracicaba, n. 29, p. 37-45, abr. 1985.

TOMAZELLO, M. Variação radial da densidade básica em estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus globulus*, *E. pellita* e *E. acmenioides*. **IPEF**, Piracicaba, n. 36, p. 35-42, ago. 1987.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica em estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus acmenioides*. **IPEF**, Piracicaba, n. 36, p. 35-42, 1987.

TREVISAN, R. et al. Variação radial da densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 553-559, 2008.

TRUGILHO, P. F. et al. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 21, n. 2, p. 259-267, 1997.

TRUGILHO, P. F. et al. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial da amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, jan./jun. 2005.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características Físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 2, p. 94-11, 1996.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril*). **Scientia Agraria**, Piracicaba, v. 2, n. 1/2, p. 45-53, 2001.

URBINATI, C. V. et al. Variação estrutural quantitativa no lenho de *Terminalia ivorensis* A. Chev., Combretaceae. **Acta Botânica Brasílica**, Porto Alegre, v. 17, n. 3, p. 421-437, set. 2003.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; MARTINS, I. S. Variação axial da densidade básica da madeira de *Acacia mangium* WILLD aos sete anos de idade. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 85-92, 1999.

VALE, A. T. et al. Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta do pinhão-manso (*Jatropha curcas*). **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 267-273, 2011.

VELOSO, D. P.; NASCIMENTO, E. A.; MORAIS, S. A. L. Isolamento e análise estrutural de ligninas. **Química Nova**, São Paulo, v. 5, n. 16, p. 435-448, 1993.

VIDAURRE, B. P. **Caracterização anatômica, química e físico-mecânica da madeira de paricá (*Schizolobium amazonicum*) para produção de energia e polpa celulósica**. 2010. 74 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

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

VIEIRA, R. da S. et al. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcorys*. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 59-64, jan./mar. 2013.

VITAL, B. R. et al. Características de crescimento das arvores e da qualidade da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* para a produção de carvão. **IPEF**, Piracicaba, n. 47, p. 22-28, 1994.

VITAL, B. R.; JESUS, R. M.; VALENTE, O. F. Efeito da constituição química e da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 10, n. 2, p. 151-160, 1986.

ZAMUDIO, F. et al. Genetic trends in wood density and radial growth with cambial age in a radiate pine progeny test. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 59, n. 5/6, p. 541-549, 2002.

ANEXOS

ANEXO A – Valores médios e coeficiente de variação de dados relativos aos parâmetros característicos da madeira por tratamento

Tabela A1: Valores médios de densidade básica e composição química da madeira para os três materiais genéticos e posições radiais.

Material	Posição radial	D.B. g.cm ⁻³				-----%			
		Extrativos totais	Lignina Total	Minerais	Holocelulose				
VM04	Externo	0,547 ^(2,56)	4,23 ^(10,03)	28,50 ^(4,23)	0,23 ^(21,44)	67,02 ^(1,82)			
	Intermediário	0,492 ^(3,84)	3,91 ^(12,15)	31,61 ^(3,51)	0,12 ^(23,14)	64,35 ^(1,08)			
	Interno	0,471 ^(4,86)	4,87 ^(8,29)	34,44 ^(2,90)	0,13 ^(33,68)	60,53 ^(1,87)			
MN463	Externo	0,542 ^(4,02)	3,92 ^(9,46)	30,11 ^(5,10)	0,23 ^(23,40)	65,73 ^(2,37)			
	Intermediário	0,426 ^(5,77)	4,09 ^(12,32)	31,22 ^(3,33)	0,09 ^(36,51)	64,59 ^(1,57)			
	Interno	0,444 ^(6,17)	4,82 ^(9,00)	32,00 ^(2,73)	0,16 ^(12,52)	62,99 ^(1,11)			
<i>C. citriodora</i>	Externo	0,636 ^(9,59)	4,73 ^(21,16)	24,86 ^(3,99)	0,35 ^(16,48)	70,04 ^(1,67)			
	Intermediário	0,611 ^(12,50)	9,77 ^(14,39)	25,82 ^(6,37)	0,43 ^(41,35)	63,97 ^(2,82)			
	Interno	0,569 ^(12,70)	10,60 ^(14,02)	27,08 ^(10,40)	0,48 ^(29,66)	61,82 ^(4,68)			

D.B.: Densidade básica; entre parentesis o coeficiente de variação de dados utilizados na determinação do valor médio.

Tabela A2: Valores médios da composição química elementar e propriedades energéticas da madeira para os três materiais genéticos e posições radiais.

Material	Posição radial	Carbono -----%-----	Hidrogênio -----%-----	Oxigênio -----%-----	PCS cal.g ⁻¹	D. energética cal.cm ⁻³
VM04	Externo	49,05 ^(1,05)	6,29 ^(2,16)	43,54 ^(1,58)	4558 ^(1,92)	2492 ^(1,18)
	Intermediário	50,21 ^(1,39)	6,36 ^(1,64)	42,21 ^(2,46)	4621 ^(0,56)	2276 ^(3,72)
	Interno	50,42 ^(1,18)	6,29 ^(1,86)	41,99 ^(2,17)	4624 ^(1,00)	2178 ^(4,36)
MN463	Externo	48,63 ^(2,16)	6,12 ^(1,83)	43,95 ^(2,60)	4523 ^(0,48)	2452 ^(3,94)
	Intermediário	49,75 ^(1,09)	6,13 ^(2,36)	42,78 ^(1,55)	4546 ^(0,46)	1939 ^(5,52)
	Interno	50,19 ^(1,18)	6,24 ^(1,00)	42,34 ^(1,45)	4555 ^(1,02)	2022 ^(6,02)
<i>C. citriodora</i>	Externo	49,05 ^(1,05)	6,29 ^(2,16)	43,54 ^(1,58)	4547 ^(0,66)	2892 ^(9,20)
	Intermediário	50,21 ^(1,39)	6,36 ^(1,64)	42,21 ^(2,46)	4654 ^(0,68)	2843 ^(11,89)
	Interno	50,42 ^(1,18)	6,29 ^(1,86)	41,99 ^(2,17)	4681 ^(1,43)	2663 ^(11,53)

PCS: Poder calorífico superior; D. energética: Densidade energética; entre parêntesis o coeficiente de variação dos dados utilizados na determinação do valor médio.

Tabela A3: Valores médios das variáveis anatómicas da madeira para os três materiais genéticos e posições radiais.

Material	Posição radial	-----µm-----			F. parede %	
		C. fibra	D. fibra	D. lume		E. parede
VM04	Externo	1039 ^(5,36)	19,40 ^(6,90)	7,74 ^(9,22)	5,82 ^(8,41)	83,98 ^(2,61)
	Intermediário	907 ^(8,09)	18,04 ^(7,90)	8,56 ^(9,67)	4,73 ^(15,78)	77,02 ^(6,55)
	Interno	718 ^(14,70)	16,36 ^(5,28)	8,22 ^(11,03)	4,06 ^(6,14)	74,68 ^(4,91)
MN463	Externo	955 ^(4,74)	18,68 ^(1,82)	7,32 ^(13,06)	5,68 ^(7,61)	84,48 ^(4,61)
	Intermediário	864 ^(3,65)	17,94 ^(4,11)	9,71 ^(12,04)	4,11 ^(7,81)	70,66 ^(7,07)
	Interno	708 ^(6,03)	17,56 ^(6,43)	10,10 ^(10,88)	3,73 ^(2,69)	67,01 ^(4,56)
<i>C. citriodora</i>	Externo	1096 ^(10,61)	15,94 ^(3,78)	4,20 ^(13,55)	5,87 ^(4,59)	93,00 ^(1,72)
	Intermediário	890 ^(6,30)	16,04 ^(6,48)	6,56 ^(29,62)	4,73 ^(13,84)	82,62 ^(9,47)
	Interno	818 ^(5,64)	15,32 ^(6,47)	6,44 ^(28,48)	4,44 ^(17,33)	81,51 ^(10,17)

C. fibra: Comprimento de fibra; D. fibra: Diâmetro da fibra; D. lume: Diâmetro do lume da fibra; E. parede: Espessura da parede da fibra; F. parede: Fração parede da fibra; entre parentesis o coeficiente de variação dos dados utilizados na determinação do valor médio.

Tabela A4: Valores médios da frequência de vaso e diâmetro de vaso da madeira para os três materiais genéticos e posições radiais.

Material	Posição radial	Frequência de vaso		Diâmetro de vaso	
		n° .mm ⁻¹		µm	
VM04	Externo	11,63 ^(21,69)		119,57 ^(14,99)	
	Intermediário	12,51 ^(12,39)		124,84 ^(14,14)	
	Interno	11,27 ^(24,84)		130,18 ^(9,03)	
MN463	Externo	14,98 ^(19,63)		103,38 ^(12,62)	
	Intermediário	14,33 ^(19,93)		104,00 ^(9,01)	
	Interno	13,09 ^(14,46)		111,16 ^(9,56)	
<i>C. citriodora</i>	Externo	14,12 ^(17,35)		114,14 ^(15,29)	
	Intermediário	15,06 ^(8,28)		111,10 ^(8,73)	
	Interno	14,54 ^(12,72)		108,82 ^(7,16)	

Entre parentesis o coeficiente de variação dos dados utilizados na determinação do valor médio.

ANEXO B - Valores médios e coeficiente de variação dos dados relativos aos parâmetros característicos do carvão vegetal por tratamento

Tabela B1: Valores médios das variáveis rendimento gravimétrico e densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido com os materiais genéticos em cada posição radial e três temperaturas finais de carbonização.

T (°C)	Material	Posição radial	RG %	DRA g.cm ⁻³	
350	VM04	Externo	39,50 ^(2,86)	0,374 ^(7,42)	
		Intermediário	42,26 ^(3,31)	0,322 ^(11,35)	
		Interno	42,82 ^(4,04)	0,292 ^(8,54)	
	MN463	Externo	40,11 ^(4,30)	0,379 ^(4,98)	
		Intermediário	43,99 ^(4,57)	0,253 ^(7,95)	
		Interno	44,74 ^(5,43)	0,271 ^(6,76)	
	<i>C. citriodora</i>	Externo	41,08 ^(3,36)	0,498 ^(13,36)	
		Intermediário	43,91 ^(1,88)	0,429 ^(23,12)	
		Interno	45,16 ^(3,17)	0,373 ^(20,80)	
	450	VM04	Externo	33,14 ^(3,26)	0,415 ^(8,47)
			Intermediário	35,31 ^(2,57)	0,305 ^(4,55)
			Interno	35,70 ^(4,34)	0,300 ^(6,00)
MN463		Externo	35,65 ^(4,55)	0,404 ^(6,67)	
		Intermediário	38,67 ^(4,53)	0,248 ^(7,26)	
		Interno	38,96 ^(5,95)	0,259 ^(9,84)	
<i>C. citriodora</i>		Externo	33,87 ^(3,94)	0,497 ^(14,65)	
		Intermediário	36,65 ^(4,45)	0,430 ^(22,04)	
		Interno	37,31 ^(2,80)	0,372 ^(21,48)	
550		VM04	Externo	28,77 ^(3,34)	0,392 ^(9,19)
			Intermediário	30,82 ^(2,77)	0,290 ^(7,02)
			Interno	31,06 ^(3,67)	0,281 ^(9,19)
	MN463	Externo	30,45 ^(4,50)	0,364 ^(5,67)	
		Intermediário	32,89 ^(2,30)	0,242 ^(9,65)	
		Interno	33,48 ^(2,62)	0,254 ^(7,68)	
	<i>C. citriodora</i>	Externo	29,95 ^(2,81)	0,484 ^(15,58)	
		Intermediário	32,21 ^(4,01)	0,412 ^(23,06)	
		Interno	32,92 ^(4,68)	0,364 ^(21,54)	

RG: rendimento gravimétrico; DRA: Densidade Relativa aparente; T: Temperatura final de carbonização; entre parentesis o coeficiente de variação dos dados utilizados na determinação do valor médio.

Tabela B2: Valores médios das variáveis módulo de ruptura e módulo de elasticidade do carvão vegetal produzido com os materiais genéticos em cada posição radial e três temperaturas finais de carbonização.

T (°C)	Material	Posição radial	MTS MPa	RP MPa.mm ⁻¹
350	VM04	Externo	23,11 ^(19,99)	27,72 ^(31,29)
		Intermediário	19,81 ^(29,12)	23,40 ^(40,42)
		Interno	17,04 ^(29,94)	15,85 ^(35,94)
	MN463	Externo	20,65 ^(17,50)	20,84 ^(36,08)
		Intermediário	9,88 ^(26,34)	7,83 ^(79,57)
		Interno	12,22 ^(16,02)	8,16 ^(28,29)
	<i>C. citriodora</i>	Externo	28,76 ^(11,35)	41,10 ^(29,21)
		Intermediário	22,97 ^(28,03)	29,09 ^(48,62)
		Interno	19,19 ^(37,76)	19,02 ^(73,36)
450	VM04	Externo	27,88 ^(19,88)	44,39 ^(30,67)
		Intermediário	17,66 ^(9,48)	26,50 ^(25,29)
		Interno	18,36 ^(13,58)	22,10 ^(19,20)
	MN463	Externo	25,85 ^(18,81)	40,79 ^(38,06)
		Intermediário	11,76 ^(27,33)	10,70 ^(55,49)
		Interno	14,49 ^(25,20)	12,64 ^(40,45)
	<i>C. citriodora</i>	Externo	28,69 ^(22,35)	42,42 ^(28,25)
		Intermediário	22,80 ^(27,48)	32,87 ^(67,04)
		Interno	16,55 ^(20,39)	22,50 ^(72,21)
550	VM04	Externo	27,43 ^(11,17)	36,67 ^(23,80)
		Intermediário	21,48 ^(22,24)	28,35 ^(40,92)
		Interno	20,41 ^(15,64)	21,32 ^(39,21)
	MN463	Externo	21,71 ^(27,65)	25,38 ^(48,89)
		Intermediário	15,49 ^(22,70)	15,79 ^(22,58)
		Interno	17,82 ^(38,97)	11,39 ^(52,44)
	<i>C. citriodora</i>	Externo	31,77 ^(11,76)	45,12 ^(21,02)
		Intermediário	25,13 ^(21,53)	32,36 ^(47,81)
		Interno	21,64 ^(17,25)	34,05 ^(36,19)

MTS: Máxima tensão suportada; RP: Resistência a penetração da semi esfera; T: Temperatura final de carbonização; entre parentesis o coeficiente de variação dos dados utilizados na determinação do valor médio.

Tabela B3: Valores médios da composição química elemental do carvão vegetal produzido com os materiais genéticos em cada posição radial e três temperaturas finais de carbonização.

T (°C)	Material	Posição radial	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	
			-----%-----			
350	VM04	Externo	76,91 ^(0,91)	4,64 ^(1,37)	17,39 ^(4,21)	
		Intermediário	76,39 ^(0,77)	4,60 ^(2,20)	17,93 ^(3,47)	
		Interno	76,21 ^(1,27)	4,54 ^(3,32)	18,17 ^(5,58)	
	MN463	Externo	76,76 ^(1,58)	4,64 ^(6,97)	17,50 ^(7,40)	
		Intermediário	76,92 ^(1,10)	4,39 ^(4,32)	17,59 ^(5,20)	
		Interno	76,52 ^(1,96)	4,51 ^(3,12)	17,87 ^(7,90)	
	<i>C. citriodora</i>	Externo	76,95 ^(1,45)	4,68 ^(2,61)	17,31 ^(6,82)	
		Intermediário	75,59 ^(1,11)	4,57 ^(2,65)	18,79 ^(4,51)	
		Interno	74,72 ^(2,70)	4,65 ^(4,08)	19,58 ^(10,80)	
	450	VM04	Externo	83,80 ^(1,28)	3,83 ^(1,78)	11,32 ^(9,32)
			Intermediário	82,56 ^(1,83)	3,72 ^(3,77)	12,67 ^(12,72)
			Interno	83,81 ^(2,19)	3,76 ^(3,23)	11,38 ^(15,28)
MN463		Externo	81,33 ^(2,83)	3,83 ^(3,55)	13,77 ^(16,22)	
		Intermediário	83,27 ^(4,33)	3,85 ^(2,05)	11,81 ^(30,44)	
		Interno	81,55 ^(4,52)	3,84 ^(3,97)	13,53 ^(26,42)	
<i>C. citriodora</i>		Externo	83,04 ^(1,91)	3,98 ^(2,98)	11,96 ^(12,75)	
		Intermediário	81,54 ^(2,25)	3,86 ^(2,32)	13,57 ^(13,64)	
		Interno	81,51 ^(1,41)	3,91 ^(2,43)	13,56 ^(8,15)	
550		VM04	Externo	91,77 ^(2,50)	3,23 ^(2,59)	3,97 ^(56,11)
			Intermediário	92,02 ^(1,48)	3,18 ^(4,13)	3,77 ^(33,77)
			Interno	91,92 ^(2,11)	3,19 ^(5,67)	3,86 ^(46,49)
	MN463	Externo	91,71 ^(0,99)	3,20 ^(3,63)	4,05 ^(25,09)	
		Intermediário	90,90 ^(1,71)	3,11 ^(2,32)	4,95 ^(30,03)	
		Interno	90,54 ^(2,60)	3,18 ^(4,41)	5,24 ^(42,67)	
	<i>C. citriodora</i>	Externo	92,74 ^(1,42)	3,28 ^(3,02)	2,92 ^(42,55)	
		Intermediário	92,55 ^(2,45)	3,22 ^(3,81)	3,16 ^(69,43)	
		Interno	91,68 ^(2,49)	3,25 ^(5,75)	4,00 ^(54,67)	

T: Temperatura final de carbonização; entre parentesis o coeficiente de variação dos dados utilizados na determinação do valor médio.

Tabela B4: Valores médios da composição química imediata do carvão vegetal produzido com os materiais genéticos em cada posição radial e três temperaturas finais de carbonização.

T (°C)	Material	Posição radial	Voláteis	Carbono fixo	Minerais
			-----%-----		
350	VM04	Externo	39,63 ^(2,20)	59,98 ^(1,34)	0,37 ^(25,86)
		Intermediário	39,42 ^(3,97)	60,18 ^(2,67)	0,39 ^(33,66)
		Interno	40,06 ^(5,25)	59,46 ^(3,41)	0,47 ^(26,39)
	MN463	Externo	38,46 ^(4,57)	61,20 ^(2,78)	0,33 ^(32,41)
		Intermediário	38,32 ^(4,55)	61,23 ^(2,74)	0,44 ^(20,74)
		Interno	38,42 ^(6,34)	60,93 ^(3,94)	0,63 ^(20,13)
	<i>C. citriodora</i>	Externo	39,57 ^(4,33)	59,73 ^(2,64)	0,66 ^(37,12)
		Intermediário	39,87 ^(4,23)	59,02 ^(2,76)	1,09 ^(53,31)
		Interno	40,34 ^(4,31)	58,36 ^(3,28)	1,28 ^(36,84)
450	VM04	Externo	26,07 ^(4,06)	73,49 ^(1,41)	0,43 ^(35,72)
		Intermediário	26,62 ^(3,66)	72,85 ^(1,41)	0,51 ^(18,14)
		Interno	26,54 ^(7,60)	72,88 ^(2,70)	0,57 ^(12,18)
	MN463	Externo	28,47 ^(7,48)	70,95 ^(3,01)	0,57 ^(10,41)
		Intermediário	29,13 ^(9,40)	70,03 ^(3,77)	0,82 ^(25,24)
		Interno	28,63 ^(12,27)	70,25 ^(4,85)	1,10 ^(34,28)
	<i>C. citriodora</i>	Externo	26,08 ^(8,03)	73,16 ^(2,93)	0,75 ^(37,35)
		Intermediário	26,83 ^(7,57)	71,70 ^(3,10)	1,40 ^(50,10)
		Interno	26,99 ^(6,07)	71,51 ^(2,62)	1,49 ^(27,30)
550	VM04	Externo	15,03 ^(13,30)	84,25 ^(2,09)	0,71 ^(40,28)
		Intermediário	14,85 ^(15,41)	84,45 ^(2,54)	0,69 ^(31,03)
		Interno	15,33 ^(16,09)	83,98 ^(2,72)	0,68 ^(35,38)
	MN463	Externo	16,18 ^(8,91)	83,14 ^(1,75)	0,66 ^(18,93)
		Intermediário	15,98 ^(6,49)	83,37 ^(1,32)	0,64 ^(43,11)
		Interno	16,20 ^(11,68)	82,92 ^(2,13)	0,87 ^(52,95)
	<i>C. citriodora</i>	Externo	15,14 ^(9,36)	84,27 ^(2,01)	0,57 ^(73,98)
		Intermediário	15,70 ^(10,71)	83,14 ^(2,69)	1,15 ^(76,41)
		Interno	14,80 ^(7,25)	83,82 ^(1,05)	1,37 ^(45,86)

T: Temperatura final de carbonização; entre parentesis o coeficiente de variação dos dados utilizados na determinação do valor médio.

Tabela B5: Valores médios das variáveis energéticas do carvão vegetal produzido com os materiais genéticos em cada posição radial e três temperaturas finais de carbonização.

T (°C)	Material	Posição radial	PCS cal.g ⁻¹	DE cal.cm ⁻³
350	VM04	Externo	6551 ^(1,39)	2449 ^(7,06)
		Intermediário	6502 ^(1,37)	2095 ^(11,28)
		Interno	6488 ^(1,54)	1896 ^(7,40)
	MN463	Externo	6469 ^(1,52)	2454 ^(4,95)
		Intermediário	6447 ^(0,91)	1635 ^(7,62)
		Interno	6411 ^(0,92)	1737 ^(6,37)
	<i>C. citriodora</i>	Externo	6395 ^(1,16)	3186 ^(13,14)
		Intermediário	6290 ^(1,75)	2691 ^(21,42)
		Interno	6307 ^(1,69)	2351 ^(19,18)
450	VM04	Externo	6816 ^(1,43)	2830 ^(7,80)
		Intermediário	6861 ^(0,98)	2096 ^(5,19)
		Interno	6871 ^(1,18)	2065 ^(5,93)
	MN463	Externo	6636 ^(0,75)	2685 ^(7,08)
		Intermediário	6689 ^(1,57)	1662 ^(7,10)
		Interno	6658 ^(2,79)	1724 ^(8,77)
	<i>C. citriodora</i>	Externo	6958 ^(2,97)	3476 ^(15,80)
		Intermediário	6922 ^(8,25)	2983 ^(19,76)
		Interno	7007 ^(2,63)	2603 ^(19,41)
550	VM04	Externo	7885 ^(1,33)	3093 ^(9,55)
		Intermediário	7820 ^(1,29)	2268 ^(6,99)
		Interno	7778 ^(2,15)	2187 ^(10,24)
	MN463	Externo	7749 ^(0,72)	2826 ^(6,11)
		Intermediário	7772 ^(1,30)	1884 ^(10,19)
		Interno	7664 ^(2,28)	1946 ^(6,08)
	<i>C. citriodora</i>	Externo	7789 ^(1,25)	3773 ^(14,84)
		Intermediário	7767 ^(7,84)	3239 ^(30,72)
		Interno	7639 ^(3,06)	2771 ^(18,81)

PCS: Poder calorífico superior; DE: Densidade energética; T: Temperatura final de carbonização; entre parentesis o coeficiente de variação dos dados utilizados na determinação do valor médio.