



LUCIANO JUNQUEIRA COSTA

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO CARVÃO
VEGETAL DE CLONES DE *Corymbia***

LAVRAS – MG

2016

LUCIANO JUNQUEIRA COSTA

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO CARVÃO VEGETAL DE
CLONES DE *Corymbia***

Dissertação 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 Mestre.

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho
Orientador

**LAVRAS – MG
2016**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Costa, Luciano Junqueira.

Mark Caracterização mecânica do carvão vegetal de clones de
Corymbia / Luciano Junqueira Costa. – Lavras : UFLA, 2016.
90 p. : il.

Dissertação(mestrado acadêmico)–Universidade Federal de
Lavras, 2016.

Orientador: Paulo Fernando Trugilho.

Bibliografia.

1. Compressão paralela e perpendicular. 2. Temperatura. 3.
Produção de carvão vegetal. I. Universidade Federal de Lavras. II.
Título.

LUCIANO JUNQUEIRA COSTA

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO CARVÃO VEGETAL DE
CLONES DE *Corymbia***

**MECHANIC CHARACTERIZATION OF VEGETAL COAL
OF *Corymbia* CLONES**

Dissertação 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 Mestre.

APROVADA em 25 de julho de 2016.

Prof. Dr. José Tarcísio Lima UFLA

Prof. Dr. Renato da Silva Vieira UFSJ

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho
Orientador

LAVRAS – MG

2016

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Lazaro e Cleusa.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Ciência e Tecnologia da Madeira pela disponibilização dos laboratórios, equipamentos e tempo de aprendizado.

Ao professor Paulo Fernando Trugilho pelos ensinamentos passados, paciência em minha orientação e confiança nos trabalhos.

Aos laboratoristas e funcionários Claret, Carlos e Heber, pelo auxílio nos momentos em que precisei.

Aos amigos de laboratório.

Às empresas Aperam Bioenergia pela disponibilização do material para a pesquisa.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Aos professores do Programa de Ciência e Tecnologia da Madeira pelo conhecimento transmitido.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, meu muito obrigado!

RESUMO

O setor siderúrgico é o maior consumidor de carvão vegetal no Brasil. No entanto, um dos principais problemas enfrentados pelo setor está relacionado com a heterogeneidade apresentada pelo carvão vegetal, sendo que suas propriedades físicas, químicas e mecânicas são diretamente influenciadas pela temperatura final de carbonização. Para as características físicas e químicas existem normas bem definidas para análise. Entretanto, para avaliação das propriedades mecânicas ainda não há uma norma específica e os testes utilizados atualmente pelas empresas não são eficientes para avaliar a qualidade do produto. O presente trabalho teve como objetivo avaliar mecanicamente a qualidade do carvão vegetal de clones de *Corymbia* produzidos nas temperaturas de carbonização de 350, 450, 550 e 700°C. A influência da temperatura nos rendimentos da carbonização, bem como nas propriedades físicas, químicas e energéticas do carvão também foram avaliadas. Para isso, foram utilizados sete clones do gênero *Corymbia* coletados na região norte do Estado de Minas Gerais. Foram retirados toretes de madeira à altura de 1,3 m do tronco (DAP), que foram processados, carbonizados e posteriormente confeccionaram-se corpos de prova de carvão utilizados nos ensaios de compressão paralela e perpendicular às fibras do carvão. Pelos resultados obtidos observou-se que a temperatura final de carbonização influenciou significativamente os rendimentos da carbonização, bem como as propriedades físicas, químicas, energéticas e mecânicas do carvão vegetal. Para os ensaios mecânicos observou-se aumento nas características de elasticidade e resistência do carvão vegetal para compressão paralela e perpendicular na temperatura de 700°C, sendo que os maiores valores foram observados para a compressão paralela às fibras.

Palavras-chave: Compressão paralela e perpendicular. Temperatura. Produção de carvão vegetal.

ABSTRACT

Steel industry is the largest consumer of charcoal in Brazil. However, one of the main issues faced by this sector is the heterogeneity presented by the charcoal, with physical, chemical and mechanic properties directly influenced by the final temperature of carbonization. For the physical and chemical properties, there are well-defined norms for analysis. However, there are no specific norms for evaluating the mechanical properties, and the tests currently used are not efficient to evaluate product quality. This work had the objective of mechanically evaluating the quality of charcoal of *Corymbia* clones produced at the carbonization temperatures of 350, 450, 550 and 700°C. The influence of temperature over carbonization yield, as well as physical, chemical and energetic properties of the charcoal, were also evaluated. For this, seven clones of the *Corymbia* genus were collected from northern Minas Gerais, Brazil. Wood logs were removed from the trunk at a height of 1.3m, processed and carbonized. Subsequently, we prepared samples of the coal used in the compression trials, parallel and perpendicular to the coal fibers. With the results obtained, we verified that the final carbonization temperature significantly influenced carbonization yields, as well as the physical, chemical, energetic and mechanical properties of the charcoal. For the mechanical trials, we verified an increase in the characteristics of elasticity and resistance of the charcoal for parallel and perpendicular compression at a temperature of 700°C, with the highest values verified for compression parallel to the fibers.

Keywords: Parallel and perpendicular compression. Temperature. Charcoal production.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVO	11
2.1	Objetivos específicos	11
3	REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1	Carvão vegetal	13
3.2	Carbonização	14
3.3	Decomposição térmica dos constituintes do lenho	15
3.4	Temperatura	17
3.5	Propriedades do carvão vegetal	18
3.5.1	Propriedades químicas do carvão vegetal	19
3.5.2	Propriedades físicas do carvão vegetal	20
3.5.3	Propriedades mecânicas do carvão vegetal	21
3.6	Caracterização do carvão vegetal	24
4	MATERIAL E MÉTODOS	27
4.1	Material de estudo	27
4.2	Amostragem	27
4.3	Confecção dos corpos de prova de madeira	28
4.4	Carbonização	29
4.5	Determinação das propriedades do carvão vegetal	30
4.5.1	Composição química imediata	30
4.5.2	Densidade aparente	30
4.5.3	Poder calorífico	31
4.6	Confecção dos corpos de prova de carvão vegetal	31
4.7	Ensaio mecânicos do carvão vegetal	32
4.8	Análise estatística	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1	Rendimentos da carbonização	35
5.2	Propriedades químicas e energéticas do carvão vegetal	42
5.2.1	Propriedades químicas do carvão vegetal	42
5.2.2	Propriedades energéticas do carvão vegetal	51
5.3	Propriedades mecânicas do carvão vegetal	60
5.3.1	Compressão paralela às fibras do carvão	60
5.3.2	Compressão perpendicular às fibras do carvão	67
6	CONCLUSÕES	75
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
	REFERÊNCIAS	79
	ANEXO A - Tendência das propriedades mecânicas do carvão vegetal com incremento da temperatura final de carbonização	87

1 INTRODUÇÃO

O carvão vegetal é um produto importante para a economia e para o setor industrial brasileiro, principalmente, para siderurgia que é uma das poucas no mundo que utiliza de forma expressiva o carvão como termorredutor do minério de ferro para a obtenção do ferro gusa, ferro liga e aço. Em 2014, o consumo de carvão vegetal no Brasil foi de cerca de 5,9 milhões de toneladas (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2015).

O Brasil apresenta uma área de 7,74 milhões de hectares de árvores plantadas, essa área corresponde a 0,9% do território brasileiro. Desse total 15,2% dos plantios pertencem às indústrias de siderurgia de carvão vegetal; além disso, as empresas do setor apoiam financeiramente plantios de terceiros em atividades de fomento à atividade de silvicultura (IBÁ, 2015).

Atualmente, aproximadamente 86% do carvão vegetal produzido no país são destinados ao setor siderúrgico. No decênio de 2005 a 2015 o setor siderúrgico nacional produziu, em média anual, aproximadamente 32 milhões de toneladas de ferro gusa, sendo que cerca de 30% da produção foram obtidas a partir da utilização desse insumo como agente termorredutor do minério (INSTITUTO DO AÇO BRASIL, 2015).

O carvão vegetal é produzido por meio da carbonização da madeira, é um produto rico em carbono, de natureza friável e que apresenta características físicas, químicas e mecânicas fortemente influenciadas pela temperatura final de carbonização, além da matéria-prima utilizada.

Com relação à matéria-prima novos materiais genéticos estão sendo avaliados para obtenção de genótipos superiores para produção de carvão vegetal. Neste contexto, o cruzamento do *Corymbia citriodora* com o *Corymbia torelliana* vem sendo realizado visando à obtenção de material genético que apresente características adequadas para produção de carvão.

Para uso siderúrgico é desejável que carvão vegetal apresente baixos teores de materiais voláteis e cinzas e elevados teores de carbono fixo, poder calórico, densidade além de apresentar alta resistência ao choque, à quebra e ao esmagamento. As propriedades mecânicas do carvão podem afetar as reações de redução do minério de ferro, prejudicando a permeabilidade do leito e gerando gradientes de temperatura no interior do alto forno. Atualmente, as propriedades mecânicas do carvão vegetal representam um dos principais problemas enfrentados pela indústria siderúrgica (ASSIS et al., 2016; CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2014).

Alto-forno que utiliza o carvão vegetal apresenta rendimento inferior em relação aos que utilizam o coque mineral, o que se deve principalmente à baixa resistência mecânica do carvão vegetal. A resistência à compressão do carvão vegetal é um fator que limita a altura dos altos-fornos; além disso a produção de finos está diretamente relacionada com essa propriedade. A natureza friável do carvão é intensificada pelas operações de carga, descarga e transporte. O carvão vegetal produz cerca de 20 a 30% de finos ao longo do processo de produção, considerando desde a sua produção até descarga dentro do alto-forno (ASSIS et al., 2016; FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS, 1982).

No entanto, apesar da importância da avaliação das características mecânicas do carvão em peças individualizadas, ainda não se tem disponível uma norma técnica específica que oriente a condução dos ensaios. Esse fato se deve, principalmente, à heterogeneidade do carvão vegetal associada à dificuldade de confecção de corpos de prova, para realização dos ensaios.

2 OBJETIVO

Caracterizar mecanicamente, por meio de ensaios de compressão paralela e perpendicular às fibras, o carvão vegetal de clones de *Corymbia* sp. produzidos em temperaturas de 350°C, 450°C, 550°C e 700°C.

2.1 Objetivos específicos

- a) Identificar a relação entre a temperatura final de carbonização e do material genético nos rendimentos e nas propriedades do carvão vegetal;
- b) Avaliar a qualidade dos carvões produzidos por diferentes materiais genéticos testados;
- c) Contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia para realização de ensaio de compressão.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Carvão vegetal

O carvão vegetal é um material rico em carbono, obtido a partir da decomposição térmica da madeira na ausência ou presença controlada de oxigênio. É um produto de origem renovável e a sua combustão produz menos gases poluentes em comparação com combustíveis fósseis (ANTAL; GRENDI, 2003; MONTEIRO, 2006).

Durante a produção, o carvão sofre influência tanto da matéria-prima (madeira), como dos processos utilizados na carbonização. Em relação à madeira, características como o teor de extrativos, teor de lignina e a densidade básica são algumas das propriedades que afetam sua qualidade e rendimento. Com relação ao processo de produção, a taxa de aquecimento e a temperatura final de carbonização são fatores importantes e que devem ser considerados (TRUGILHO et al., 2005).

A produção de carvão vegetal no país é destinada a diversos setores industriais, como siderurgia, metalurgia, empresas produtoras de cimento, geração de energia em termoelétricas, em áreas residenciais (urbanas ou rurais), setor comercial (CGEE, 2015). Atualmente no país existem aproximadamente 125 indústrias que utilizam o carvão vegetal como termorredutor do minério de ferro (IBÁ, 2015).

Desde os meados de 1980 até os dias atuais, aproximadamente 25 a 35% do ferro gusa total produzido são obtidos a partir da rota integrada da siderurgia a carvão vegetal, o que acarreta em vantagens ambientais e competitivas com o ferro gusa produzido a partir do coque mineral (CGEE, 2014; REZENDE; SANTOS, 2010).

3.2 Carbonização

A carbonização da madeira é um processo físico-químico, realizado na presença ou ausência de oxigênio, em que se obtém um produto sólido rico em carbono e uma fração gasosa, sendo que esses gases podem ser condensáveis ou não condensáveis (ANTAL; GRENDI, 2003; PEREIRA et al., 2013). No decorrer do processo de conversão da madeira para carvão vegetal ocorre uma série de fenômenos além da concentração de carbono. A ocorrência desses fenômenos está associada às diferentes temperaturas de exposição da madeira durante a carbonização (BRITO, 1990).

A carbonização é um processo complexo que gera diferentes produtos. A mesma pode ser dividida em quatro etapas em função da temperatura (BRITO, 1990; OLIVEIRA; GOMES; ALMEIDA, 1982; TRUGILHO et al., 2001).

- Etapa I: até 200°C, é uma fase endotérmica onde ocorre a secagem da madeira e o início da decomposição térmica dos constituintes do lenho; há, principalmente, a liberação de vapor de água e traços de outros gases como dióxido de carbono, ácido acético e ácido fórmico.

- Etapa II: entre 200 e 280°C, é uma fase endotérmica, com a liberação de vapor de água (em menor quantidade que na etapa I), ácido acético, ácido fórmico, metanol, dióxido de carbono, entre outros.

- Etapa III: entre 280 e 500°C, nesta etapa ocorre a predominância de reações exotérmicas, com a liberação de gases energéticos como monóxido de carbono, hidrogênio, metano, e outros produtos como alcatrões, formaldeídos, ácido fórmico. O produto sólido final dessa etapa é o carvão vegetal.

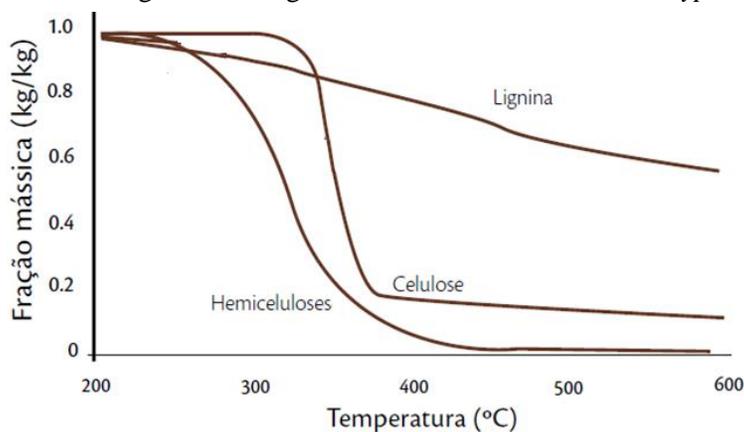
- Etapa IV: Acima de 500°C, o carvão vegetal é estável, há liberação de pouca quantidade de materiais voláteis, o principal gás liberado nessa fase é o hidrogênio.

3.3 Decomposição térmica dos constituintes do lenho

O processo de transformação da madeira em carvão vegetal pode ser compreendido ao se analisar o comportamento dos constituintes da madeira (celulose, hemiceluloses e lignina). As reações desses constituintes químicos variam consideravelmente ao longo do processo de aquecimento e influenciam a qualidade final do carvão vegetal (OLIVEIRA; GOMES; ALMEIDA, 1982; ROWEEL; LE VAN-GREEN, 2005; YANG et al., 2007).

A decomposição térmica dos componentes do lenho tem início significativo em temperaturas próximas de 250°C (FIGURA 1), quando as hemiceluloses passam a ser degradadas com maior intensidade, se comparadas à celulose e à lignina (MARTINS, 1980).

Figura 1 - Diagrama termogravimétrico da madeira de *Eucalyptus*.



Fonte: Raad (2004).

Dentre os constituintes químicos da parede celular da madeira, a lignina é o composto mais importante quando o objetivo é a produção de carvão vegetal, pois o rendimento gravimétrico do processo de conversão da madeira em carvão

é influenciado pela porcentagem da mesma na madeira (OLIVEIRA; GOMES; ALMEIDA, 1982).

A lignina apresenta alta resistência à degradação térmica, quando comparada com a celulose e as hemiceluloses. Isso ocorre devido a sua estrutura complexa, seu nível de aromaticidade e ao tamanho da molécula. Entretanto, o comportamento da lignina frente à degradação térmica ainda é pouco conhecido (HAYKIRI-ACMA; YAMAN; KUCUKBAYRAK, 2010; MOORE et al., 1974; ROWELL et al., 2005).

Segundo Yang et al. (2007) a faixa de degradação térmica da lignina ocorre de forma lenta desde 100 a 900°C. Acima dos 500°C, a perda de massa ocorre sem que ocorra grande variação no seu comportamento (OLIVEIRA; GOMES; ALMEIDA, 1982).

A lignina é responsável por produzir cerca de 55% de carvão vegetal, quando a carbonização é realizada em temperaturas de 450-500°C (OLIVEIRA; GOMES; ALMEIDA, 1982). Além disso, outras características do carvão vegetal, como teor de carbono fixo e poder calorífico, melhoram com o aumento dos teores de lignina (BRITO; BARRICHELLO; 1977; MOUTINHO, 2013; WHITE, 1987).

A celulose representa de 40 a 45% da massa seca da madeira, encontra-se principalmente na parede secundária, sendo constituída exclusivamente por unidade de β -D-anidroglicopirranose, unidas por ligações glicosídicas do tipo β (1-4) (ROWELL et al., 2005).

Durante o processo de carbonização, a celulose é degradada em temperaturas entre 260 e 370°C. Acima de 370°C, a celulose se decompõe quase que por completo em um intervalo de tempo curto (OLIVEIRA; GOMES; ALMEIDA, 1982; ROWELL; LE VAN-GREEN, 2005).

A temperatura de carbonização é um parâmetro que influencia consideravelmente o rendimento do resíduo carbonífero gerado a partir da

celulose. De acordo com Rowell e Le Van-Green (2005), quando a celulose é submetida à temperatura de 300°C gera rendimento de 20% de produto sólido, entretanto com o acréscimo da temperatura esse rendimento tende a reduzir consideravelmente. Estudo realizado por Oliveira, Gomes e Almeida (1982) cita que, quando submetida a temperaturas de 600°C, a celulose é responsável por produzir aproximadamente 5% de carvão vegetal.

As hemiceluloses são constituintes químicos do lenho e representam aproximadamente 20 a 30% da massa seca da madeira. As hemiceluloses são menos estáveis termicamente que a celulose, pois as mesmas são polímeros amorfos, constituídos de cadeias ramificadas e apresentam, geralmente, baixo peso molecular (ROWELL et al., 2005; SJÖTRÖM, 1992).

Devido a sua natureza amorfa, a degradação térmica das hemiceluloses ocorre geralmente entre 250 a 330°C. O rendimento das hemiceluloses durante o processo de carbonização é de aproximadamente 10%. No entanto, as hemiceluloses são responsáveis pela formação de diversos materiais voláteis (MARTINS, 1980; OLIVEIRA; GOMES; ALMEIDA, 1982; ROWELL et al., 2005).

3.4 Temperatura

A temperatura final de carbonização exerce grande influência nas propriedades físicas, químicas e mecânicas do carvão vegetal, afetando diretamente a sua utilização (TRUGILHO et al., 2005).

Estudos realizados pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC, 1982) mostraram que a resistência mecânica do carvão vegetal à compressão é afetada pela temperatura final de carbonização. Nesses estudos os autores constataram decréscimo da resistência à compressão quando a temperatura de carbonização aumenta de 300°C para temperaturas próximas a

500°C, entretanto em temperaturas superiores a 500°C foi observado aumento da resistência mecânica do carvão vegetal.

Segundo Mendes, Gomes e Oliveira (1982) a resistência do carvão à ruptura e conseqüentemente à geração de finos varia em função da temperatura final de carbonização. De acordo com os autores, quando a carbonização é realizada em temperaturas próximas a 500°C a geração de finos é máxima, sendo que a porcentagem de resíduos gerados tende a reduzir sistematicamente com o aumento da temperatura. Observou-se também que a quantidade de finos produzidos foi menor na temperatura de 700°C.

A baixa resistência mecânica desse insumo energético obtido em temperaturas próximas a 500°C é um grande problema, tendo em vista que na produção de carvão vegetal utiliza-se temperatura em torno desta.

Azevedo et al. (2013) citam a importância da temperatura de carbonização na qualidade do carvão vegetal. Segundo os autores, altas temperaturas de pirólise propiciam um menor rendimento gravimétrico em carvão vegetal, no entanto produzem um carvão com elevado teor de carbono fixo, além disso, há também redução nos teores de materiais voláteis, enquanto o teor de cinzas aumenta.

Dessa forma, durante o processo de carbonização deve haver um controle rigoroso da temperatura no interior forno, para que o carvão produzido seja o mais homogêneo possível e apresente características apropriadas para o mercado ao qual o mesmo será destinado (GÓMEZ; SEYE; CORTEZ, 2000; TRUGILHO et al., 2001).

3.5 Propriedades do carvão vegetal

A qualidade do carvão vegetal é obtida por meio da análise de suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Sendo que tais propriedades devem se adequar ao uso final do produto.

3.5.1 Propriedades químicas do carvão vegetal

Segundo Santos (2010), o carvão é constituído por três partes distintas: carbono fixo, materiais voláteis e cinzas.

O carbono é o principal elemento combustível presente na biomassa, no carvão vegetal a sua medida é fornecida indiretamente por meio do teor de carbono fixo. O carvão vegetal de uso siderúrgico deve apresentar teores de carbono fixo entre 70 e 80%. O consumo do termorreduzidor no processo de obtenção do ferro gusa é diretamente influenciado pelo teor de carbono fixo presente no carvão vegetal (FREDERICO, 2009; SÈYE, 1998).

Os materiais voláteis são produtos residuais, compostos principalmente de hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarbonetos. Para o uso siderúrgico é desejável que o carvão vegetal tenha porcentagens inferiores a 25% de materiais voláteis, pois altos teores de voláteis no carvão resultam na produção de fumaça acima dos limites desejáveis, além de reduzir a eficiência energética do carvão (CGEE, 2015; FREDERICO, 2009; OLIVEIRA; GOMES; ALMEIDA, 1982).

As cinzas são os resíduos de óxidos minerais resultantes da combustão completa do carvão vegetal. A presença de altos teores de minerais no carvão vegetal é indesejável quando o carvão é destinado à produção de ferro gusa, ferro ligas e de carbureto. Segundo Castro, Tavares e Assis (2003) altos teores de cinzas influenciam na formação da escória final do alto forno, o que prejudica o escoamento. Além disso, os elevados teores de minerais podem gerar o problema da segregação, que é o acúmulo de resíduos ou impurezas no interior da peça de metal solidificado, resultando em variações nas propriedades físicas, químicas e mecânicas, o que favorece a quebra e a ocorrência de fissuras no metal solidificado. O fósforo e o enxofre são os principais minerais responsáveis pela ocorrência desse fenômeno.

O teor de fósforo no carvão destinado ao setor siderúrgico deve ser inferior a 1,7%, já o teor de enxofre é desejável que esteja abaixo de 0,5%. Segundo o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE, 2015), o carvão destinado à produção de ferro gusa deve apresentar teor de cinzas inferior a 1%.

O poder calorífico do carvão vegetal é de aproximadamente 7100 kcal/kg, podendo variar para mais ou para menos dependendo do teor de carbono fixo, além disso o poder calorífico é fortemente afetado pela temperatura final de carbonização (SANTOS, 2010).

3.5.2 Propriedades físicas do carvão vegetal

A análise das propriedades físicas é fundamental para determinar a qualidade do carvão vegetal. Dentre as propriedades físicas, a umidade, a porosidade e a densidade são as usualmente avaliadas.

A umidade de equilíbrio higroscópico do carvão vegetal depende, basicamente, da temperatura de carbonização utilizada e da umidade relativa do local ao qual está exposto (SANTOS, 2010).

Altos teores de umidade afetam a capacidade energética do carvão vegetal, sendo que quanto maior a umidade do carvão menor é o seu poder calorífico.

A densidade do carvão vegetal é uma característica que merece destaque, estando diretamente relacionada com o rendimento e produtividade do alto forno (BRITO, 1993). Uma maior densidade do carvão representa uma carga maior dentro do alto forno, isso significa um maior tempo de residência, o que resulta em uma redução do consumo específico de carvão por tonelada de ferro gusa produzido.

Segundo Barcellos (2007) o carvão vegetal é um material bastante poroso, podendo apresentar até 80% de porosidade. Matos e Rios (1982) citam que uma porosidade adequada promove o aumento da permeabilidade e melhora

a circulação dos gases no interior do alto forno. Dessa forma, a velocidade das reações que ocorrem durante o processo de redução do minério de ferro é afetada pela porosidade da partícula.

3.5.3 Propriedades mecânicas do carvão vegetal

A resistência mecânica é uma propriedade fundamental para o carvão vegetal e afeta a sua qualidade. Durante o processo de produção do ferro gusa o carvão vegetal deve apresentar resistência mecânica suficiente para suportar a camada de minério de ferro, sem prejudicar a permeabilidade do leito. Segundo Assis et al. (2016) um dos principais entraves da utilização do carvão vegetal como termorreductor do minério de ferro é a sua baixa resistência mecânica, quando comparado com o coque mineral.

Dentre as características do carvão vegetal a sua friabilidade é um ponto que merece destaque. A friabilidade pode ser definida como a característica que o carvão vegetal possui de produzir finos, quando sujeito a quebras, abrasão ou à ruptura (GOMES; OLIVEIRA, 1980).

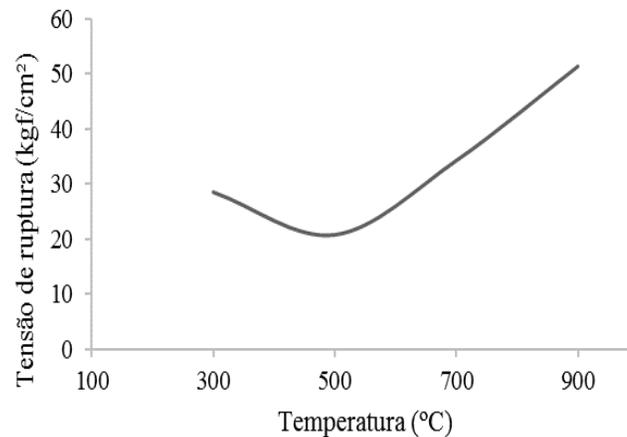
Segundo Brito (1993) a natureza friável que o carvão vegetal apresenta é intensificada pelas diversas operações de transporte, manuseio, carga e descarga. De acordo com o autor, a resistência mecânica do carvão afeta diretamente a sua granulometria e a produção de finos.

A baixa resistência do carvão resulta na produção acentuada de finos no interior do alto forno, devido à compactação, abração e ação da temperatura em que o termorreductor é submetido (ASSIS et al., 2016; CETEC, 1982).

De acordo com Assis e Braga (1977) a resistência mecânica do carvão vegetal produzido é um fator que limita a altura dos fornos, além de exigir uma melhor preparação da carga, uma vez que o carvão deve suportar o manto de minério de ferro.

Estudos realizados pelo Cetec (1982) demonstraram que a resistência mecânica do carvão vegetal é influenciada pela temperatura de carbonização, como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Variação da tensão de ruptura em função da temperatura final de carbonização.



Fonte: Cetec (1982).

Nos trabalhos realizados pelo CETEC foi possível observar redução da resistência de 300 para 500°C. Segundo os autores esse comportamento pode ser explicado devido ao fato de ocorrer a saída dos voláteis em maior intensidade nessa faixa de temperatura. Além disso, entre 300 e 500°C, o carvão apresenta maior porosidade resultante da saída dos gases.

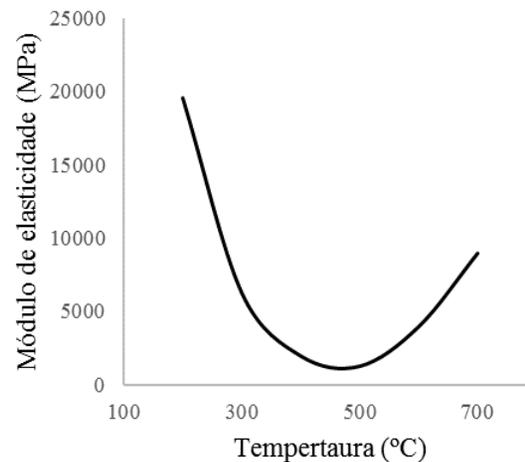
Para temperaturas de carbonização acima de 500°C há aumento na resistência à ruptura do carvão vegetal. Segundo Blankenhorn, Jenkins e Kline (1972), Mendes, Gomes e Oliveira (1982) e Moore et al. (1974), essa tendência pode estar relacionada a diversos fenômenos

- a) Redução da saída de materiais voláteis da peça;

- b) Redução dimensional e aumento do número de fibras por unidade de área;
- c) Alteração da forma e do tamanho da porosidade;
- d) Rearranjo estrutural do carbono residual.

De forma similar, a resistência à compressão e a rigidez do carvão vegetal também variam de acordo com a temperatura final de carbonização. Trabalho realizado por Moore et al. (1974) com madeira carbonizada de bétula mostrou tendência de aumento do módulo de elasticidade em temperaturas superiores a 500°C. Os autores também constataram queda bastante acentuada nos valores do módulo de elasticidade em temperaturas de carbonização inferiores a 400°C, conforme observado na Figura 3.

Figura 3 - Módulo de elasticidade em função da temperatura final de carbonização.



Fonte: Adaptado de Moore et al. (1974).

3.6 Caracterização do carvão vegetal

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possui algumas normas específicas para o carvão vegetal, as principais são ABNT NBR 7416 que dispõe sobre a determinação do índice de quebra, e a ABNT NBR 8740 que determina o índice de quebra e abrasão. No entanto, atualmente não existe norma técnica para avaliar a resistência à compressão, o que dificulta a padronização do teste.

Inicialmente os testes de resistência mecânica do carvão vegetal eram realizados a partir de métodos quase empíricos adaptados das normas da “American Society for Testing and Materials” (ASTM) existentes para a análise do carvão mineral.

De acordo com Araújo (1952), no Brasil os primeiros estudos de resistência mecânica do carvão à compressão foram realizados pela Usina Gorceix. O trabalho realizado pela Gorceix utilizou corpos de prova de formato cilíndrico, sendo os mesmos confeccionados em torno mecânico. Segundo o autor, essa metodologia pode ter contribuído para os baixos valores de resistência à compressão encontrados, aproximadamente 20 kgf/cm^2 , uma vez que a estrutura do carvão foi comprometida em razão dos esforços sofridos durante o preparo no torno.

Na década de 50, alguns trabalhos foram realizados com o intuito de avaliar as propriedades mecânicas do carvão vegetal por meio de ensaios de compressão. Nessas análises utilizaram-se corpos de prova com dimensões de 16 mm de diâmetro e 16 mm de altura. Os corpos de prova foram confeccionados utilizando-se serras manuais e o desbaste foi realizado com o uso de canivetes e esmeril. Os defeitos superficiais foram retirados por meio de lixas grossas e finas. Os ensaios foram realizados em prensas improvisadas, mas que atendiam às exigências da época (ARAÚJO, 1952).

Segundo Kurauchi (2014) a ausência de uma norma específica para avaliar a resistência à compressão paralela, as fibras do carvão vegetal têm levado alguns autores a utilizarem métodos próprios para confecção de corpos de prova e realização do ensaio. Segundo o autor, na década de 80 ocorreu uma tentativa da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC) de padronizar alguns ensaios para a caracterização de carvão vegetal, no entanto o projeto foi interrompido.

Dentre as metodologias propostas destaca-se a do Cetec (1978), que sugere um teste de resistência à compressão que possibilita comparar carvões vegetais produzidos de diferentes espécies e carbonizados em diferentes condições. De acordo com essa metodologia, alguns fatores como: dimensões do corpo de prova, presença de trincas ou rachaduras internas e a posição de onde o mesmo foi retirado da peça de madeira, interferem no resultado do ensaio de resistência mecânica do carvão vegetal.

Doat e Petroff (1975) citam que para realização do ensaio de compressão os corpos de prova devem ser confeccionados com o máximo de cuidado, evitando a presença de fissuras e trincas internas. Mendes, Gomes e Oliveira (1982) afirmam que os corpos de prova devem apresentar as menores dimensões possíveis, já que amostras de maiores tamanhos podem apresentar defeitos internos, que podem resultar em um desvio dos valores. Kumar e Gupta (1995), propõem a confecção de corpos de prova livres de fissuras e trincas, com as superfícies planas para aplicação de cargas paralelas à direção das fibras.

Vieira (2009) propôs a utilização de corpos de prova com dimensões de (10 x 10 x 25 mm). Para o processamento do carvão vegetal o autor utilizou uma serra de fita com uma lâmina apropriada para o corte de aço e para maior segurança foi desenvolvido um aparato para proteger o operador, devido às dimensões reduzidas das amostras. O ensaio de compressão paralela às fibras foi

realizado por meio de uma adaptação da norma ASTM D-143 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1995).

Os ensaios que avaliam a resistência do carvão à compressão, de acordo com diversos autores, entre eles Doat e Petroff (1975), Mendes, Gomes e Oliveira (1982), Moore et al. (1974) e Vieira (2009) podem ser influenciados por vários fatores como:

- a) Dimensões e posição de retirada da amostra na peça de madeira: a variação radial das propriedades da madeira causa desvios nos resultados;
- b) Taxa de aquecimento: taxas de aquecimento muito elevadas levam à produção de um carvão vegetal mais quebradiço e friável devido à rápida saída dos voláteis;
- c) Temperaturas de carbonização: a resistência do carvão varia em função da temperatura de carbonização;
- d) Dimensões dos corpos de prova de carvão vegetal;
- e) Confeção dos corpos de prova: dependendo da forma que os corpos de prova são confeccionados pode ocorrer danos na estrutura interna do carvão que reduz a sua resistência mecânica;
- f) Presença de trincas ou fissuras internas no carvão;
- g) Umidade do material;
- h) Temperatura na qual o ensaio é realizado;
- i) Velocidade de aplicação da carga durante o ensaio: quando a carga é aplicada em velocidade elevada, o material pode apresentar maior resistência inicial, devido à inércia de resposta que o carvão apresenta.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material de estudo

Neste estudo foram selecionadas 28 árvores procedentes do cruzamento do *Corymbia citriodora* com o *Corymbia torelliana* (TABELA 1). As árvores foram plantadas com espaçamento de 3 m x 3 m em teste clonal localizado no município de Itamarandiba, região Norte do Estado de Minas Gerais. Na época da coleta do material o plantio possuía 3,75 anos, sendo o mesmo pertencente à empresa Aperam Bioenergia.

Tabela 1 – Informações gerais sobre os materiais genéticos utilizados no estudo

Clones	Cruzamentos	Idade (anos)
1	<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	3,75
2	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	3,75
3	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	3,75
4	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	3,75
5	<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	3,75
6	<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	3,75
7	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	3,75

Foram selecionadas quatro árvores de cada clone com o objetivo de representar da melhor forma o material de estudo.

4.2 Amostragem

De cada árvore selecionada foi obtido um torete de aproximadamente 15 cm de comprimento, retirado a 1,3 m de altura do tronco (DAP). Após a retirada dos toretes, os mesmos foram devidamente identificados.

Os toretes foram transportados para unidade de usinagem da madeira da Universidade Federal de Lavras, onde foram devidamente marcados, para facilitar o desdobro e obtenção do pranchão central.

4.3 Confeção dos corpos de prova de madeira

Em condições de laboratório, os toretes foram serrados à espessura nominal de 2,5 cm de espessura. Foi obtido o pranchão central com 15 cm de comprimento e 2,5 cm espessura. Assim que produzidas, as pranchas foram devidamente identificadas, conforme Figura 4.

Figura 4 - Marcação dos toretes de madeira e esquema de desdobro utilizado para obtenção do pranchão central.



Fonte: Do autor (2016).

Após o desdobro, o pranchão central foi processado em amostras de madeira com dimensões de 2 x 2 x 4 cm, ficando com dimensões adequadas para serem carbonizadas em condição de laboratório em forno elétrico (mufla).

Para evitar a influência da posição radial de amostragem nas propriedades mecânicas do carvão vegetal, optou-se por escolher apenas os corpos de prova de madeira o mais distante possível da medula e que fossem livres de nós, furos ou qualquer outro defeito que pudessem afetar na resistência mecânica do carvão vegetal durante os ensaios de compressão paralela e perpendicular às fibras.

4.4 Carbonização

As carbonizações foram realizadas em forno elétrico adaptado dotado de sistema de recuperação de gases resultantes do processo de pirólise.

O sistema de carbonização foi constituído de um forno elétrico (mufla), uma cápsula metálica cilíndrica que possui tampa rosqueável, um condensador resfriado à água e um recipiente para coleta do gás condensável.

Foram utilizados parâmetros de carbonização visando produzir corpos de prova de carvão vegetal com o mínimo possível de defeitos.

Neste trabalho foram usados quatro tratamentos térmicos nas carbonizações, ou seja, temperaturas finais de 350°C, 450°C, 550°C e 700°C, tendo sido carbonizada uma árvore de cada clone por temperatura.

A taxa de aquecimento foi fixada em 0,5°C por minuto. A escolha dessa taxa é com base no trabalho realizado por Vieira (2009), onde o mesmo avaliando diferentes taxas de carbonização constatou que a taxa de aquecimento que resultou em corpos de prova com menores defeitos foi a de 0,5°C por minuto.

O tempo à temperatura máxima foi de 30 minutos para todos os tratamentos térmicos adotados.

Após cada carbonização foi determinado o rendimento gravimétrico em base seca do carvão vegetal, o rendimento em gases condensáveis e não condensáveis, tendo como referência a madeira seca, sendo o valor dos gases não condensáveis obtido por diferença.

Depois de pesadas, as amostras foram devidamente armazenadas para posterior confecção dos corpos de prova de carvão vegetal.

4.5 Determinação das propriedades do carvão vegetal

Para determinar as propriedades físicas e químicas do carvão vegetal foram realizadas análises de composição química imediata, densidade aparente e poder calorífico superior.

4.5.1 Composição química imediata

A composição química imediata do carvão vegetal foi obtida de acordo com a norma NBR 8112 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1986), por meio da determinação do teor de materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo, em base seca.

O teor de materiais voláteis foi determinado por meio da exposição do carvão vegetal à temperatura de 950°C, sem que ocorresse a oxidação do mesmo. As amostras foram depositadas em cadinhos, devidamente tampadas e levadas para mufla estabilizada a 950°C, sendo os mesmos colocados na extremidade da porta da mufla por 2 minutos, em seguida na borda por 3 minutos, posteriormente inseridos no interior da mufla por um período de 6 minutos, totalizando 11 minutos de exposição dos cadinhos.

O teor de cinzas foi obtido após o carvão vegetal sofrer combustão completa, depois que o material foi exposto a uma temperatura de 750°C por 6 horas.

O teor de carbono fixo foi calculado por meio da soma do teor de materiais voláteis e de cinzas, decrescida de 100.

4.5.2 Densidade aparente

A densidade aparente do carvão vegetal foi determinada por meio de medidas obtidas com auxílio de paquímetro com precisão de 0,01 mm e a massa foi obtida por meio de uma balança de precisão.

Para determinação da massa seca, o carvão foi levado à estufa regulada para $103 \pm 2^\circ\text{C}$, onde permaneceu até atingir massa constante.

4.5.3 Poder calorífico

O poder calorífico superior do carvão vegetal foi determinado conforme a metodologia descrita pela norma NBR 8633 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1984), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática.

As amostras foram moídas e posteriormente classificadas em peneiras de 40 e 60 mesh. A fração das amostras retida na malha da peneira de 60 mesh foi coletada e devidamente identificada, sendo posteriormente seca em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, até atingir massa constante.

4.6 Confeção dos corpos de prova de carvão vegetal

Depois de carbonizadas as amostras de madeira, foram confeccionados os corpos de prova de carvão vegetal para os ensaios mecânicos de compressão paralela e perpendicular às fibras.

Os corpos de prova foram confeccionados com o auxílio de um cortador de azulejo elétrico com disco diamantado, cuja lâmina possui características adequadas para o corte de cerâmicas e pavimentos de argila.

Para facilitar o corte e garantir a segurança do operador, foi desenvolvido um aparato de madeira, que pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Imagens do aparato de madeira desenvolvido para facilitar o corte e do equipamento utilizado para confecção dos corpos de prova



Fonte: Do autor (2016).

Após a confecção dos corpos de prova de carvão vegetal, foram utilizadas lixas de madeira para ajustar as dimensões e remover defeitos superficiais.

Para realização deste trabalho foram confeccionados corpos de prova com dimensões de 1 cm x 1 cm x 2,5 cm (radial, tangencial e longitudinal), para os ensaios de compressão paralela e perpendicular às fibras do carvão vegetal.

Após confeccionados, os corpos de prova foram levados para sala de climatização, estabilizada a 20°C de temperatura e 60% de umidade, por um período de 20 dias, após esse período os corpos de prova foram pesados diariamente até não apresentarem variação na massa, indicando que os corpos de prova estavam estabilizados à umidade do ambiente.

4.7 Ensaios mecânicos do carvão vegetal

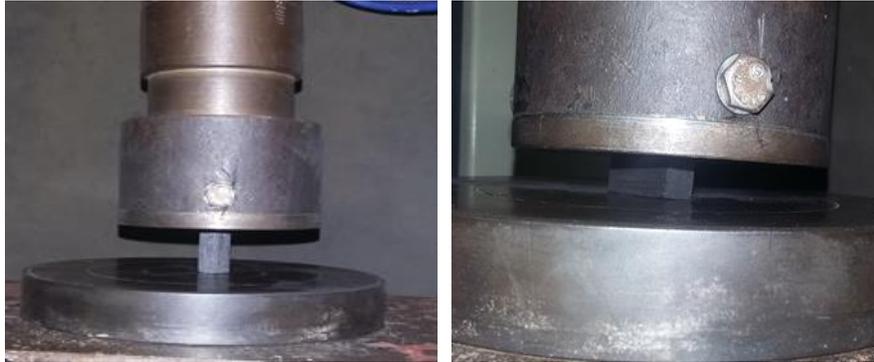
Os ensaios mecânicos foram realizados na Universidade Federal de Lavras – UFLA. Para realização dos testes utilizou-se uma máquina universal de ensaio, modelo EMIC DL 30000.

Devido à ausência de uma metodologia específica para direcionar a realização do trabalho, foram realizados ensaios preliminares para obter informações a respeito das particularidades do carvão vegetal.

Durante os ensaios utilizou-se célula de carga de 500 kg que se mostrou adequada para realização dos testes mecânicos (FIGURA 6). A velocidade de aplicação da carga foi fixada em 0,05mm/min e o ponto de interrupção do ensaio foi estipulado em 20% de perda de resistência do material.

Para o ensaio de compressão perpendicular às fibras do carvão vegetal a força foi aplicada no plano radial dos corpos de prova.

Figura 6 - Imagens do ensaio de compressão paralela e perpendicular às fibras do carvão vegetal



Fonte: Do autor (2016).

4.8 Análise estatística

Para os rendimentos da carbonização foi utilizada a análise de regressão linear para avaliar a relação funcional com a temperatura. Foram ajustados modelos lineares simples e quadráticos.

Para as características químicas, energéticas e mecânicas do carvão foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado disposto em um esquema fatorial com dois fatores (clone e temperatura) com três repetições. Para o efeito qualitativo (clone) foi usado o teste de Scott-Knott, em nível de 5% de probabilidade, enquanto que para o efeito quantitativo (temperatura) foi utilizada a análise de regressão linear, com ajuste de modelos simples e quadráticos.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio dos programas SISVAR 5.6 e SAEG 9.1.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para facilitar o entendimento, os resultados serão apresentados em três tópicos principais: rendimentos da carbonização, propriedades químicas e energéticas e propriedades mecânicas do carvão vegetal.

5.1 Rendimentos da carbonização

Na Tabela 2 encontram-se os valores médios de rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RGC), líquido pirolenhoso (RLP) e gases não condensáveis (RGNC), obtidos para os clones de *Corymbia*, nas diferentes temperaturas finais de carbonização consideradas.

Tabela 2 - Rendimentos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis para os clones de *Corymbia*

(continua)

Temperatura (°C)	Clones	RGC (%)	RLP (%)	RGNC (%)
350	1	43,85	29,26	26,89
	2	42,48	30,60	26,92
	3	43,83	32,28	23,89
	4	43,55	29,09	27,36
	5	42,71	25,40	31,89
	6	42,54	29,26	28,20
	7	40,84	28,95	30,21
	Média	42,84	29,26	27,90
450	1	38,43	35,46	26,11
	2	36,68	36,99	26,33
	3	36,63	35,14	28,23
	4	36,54	38,38	25,08
	5	37,50	37,00	25,50
	6	35,41	38,88	25,71
	7	35,36	39,99	24,65
	Média	36,65	37,40	25,95

Tabela 2 - Rendimentos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis para os clones de *Corymbia*

(conclusão)

Temperatura (°C)	Clones	RGC (%)	RLP (%)	RGNC (%)
550	1	33,29	40,24	26,47
	2	34,07	41,01	24,92
	3	32,71	45,27	22,02
	4	33,85	43,84	22,31
	5	31,66	45,23	23,11
	6	32,78	44,97	22,25
	7	31,95	42,50	25,55
	Média	32,90	43,29	23,81
700	1	31,35	45,80	22,85
	2	30,64	46,14	23,22
	3	29,57	46,25	24,18
	4	30,29	46,26	23,45
	5	29,34	47,68	22,98
	6	27,21	46,73	26,06
	7	30,90	46,03	23,07
	Média	29,90	46,41	23,69

Fonte: Do autor (2016)

RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal, RLP: Rendimento em líquido pirolenhoso, RGNC: Rendimento em gases não condensáveis.

De acordo com a Tabela 2 verifica-se redução nos valores de rendimento em carvão vegetal com o aumento da temperatura final de carbonização. Resultado contrário foi observado para o rendimento em líquido pirolenhoso, em que o aumento da temperatura de pirólise da madeira resultou em acréscimo nos valores.

Entre as temperaturas de 350°C e 700°C observou-se redução no rendimento em carvão de 30,2%, enquanto que o rendimento em líquido pirolenhoso aumentou 58,6%. O clone 1 se destacou por apresentar o maior valor de rendimento em carvão nas temperaturas de 350°C, 450°C e 700°C, enquanto que o clone 2 apresentou o maior valor em 550°C.

A redução do rendimento gravimétrico em carvão e aumento do rendimento em líquido pirolenhoso foi similar ao observado por Vieira et al.

(2013), que trabalhando *Eucalyptus microcorys*, carbonizados em temperaturas finais entre 500°C e 900°C, concluíram que temperatura de pirólise influencia nos rendimentos da carbonização.

A correlação negativa entre a temperatura final de carbonização e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal são comumente encontrados na literatura, como em trabalhos realizados Azevedo et al. (2013), Brito e Barrichello (1977) e Vilas Boas et al. (2010).

Pela Tabela 2 é possível observar que ocorreu redução acentuada nos valores do rendimento gravimétrico em carvão até a temperaturas de 550°C, enquanto que entre 550°C e 700°C essa diferença nos valores foi de menor magnitude.

Trabalhando com a espécie *Himenea courbaril* (jatobá) e utilizando temperaturas de carbonização variando de 300 a 900°C, Trugilho e Silva (2001) constataram tendência de estabilização nos valores de RGC em temperaturas elevadas (entre 700 e 900°C). Resultado similar foi observado por Azevedo et al. (2013), que avaliando clones híbridos de *Eucalyptus*, observaram que o aumento da temperatura final de carbonização promoveu estabilização dos valores, principalmente em temperaturas superiores a 700°C.

Para 450°C, que é a temperatura média de carbonização utilizada para produção de carvão vegetal destinado à siderurgia, o rendimento médio em carvão foi de 36,7%. Este valor é maior que o encontrado na literatura para o gênero *Eucalyptus* com idades próximas às dos materiais utilizados no presente estudo, por exemplo, os trabalhos de Frederico (2009) e Protásio et al. (2014), que obtiveram valores variando entre 27,8% a 33,0%. Todavia, o rendimento médio em líquido pirolenhoso foi menor que o relatado na literatura, com média de 37,4%. O rendimento em gases não condensáveis apresentou média de 25,9%, valor esse semelhante ao encontrados nos trabalhos anteriormente citados.

É importante ressaltar que quanto maior o rendimento gravimétrico em carvão vegetal melhor é o aproveitamento da madeira nos fornos de carbonização e maior será a produção desse biorredutor.

Na Tabela 3 estão apresentados os modelos de regressão linear simples e quadrático ajustados, bem como seus respectivos valores de coeficiente de determinação e coeficiente de determinação ajustados para a estimativa do rendimento gravimétrico em carvão vegetal em função da temperatura final de carbonização. Verifica-se que os modelos lineares simples apresentaram elevados valores de coeficiente de determinação, sendo que apenas o modelo estimado para o clone 7 foi não significativo.

Os modelos quadráticos apresentaram os maiores coeficientes de determinação, no entanto apenas para os clones 3 e 7 foram observados coeficientes de regressão significativos.

Tabela 3 - Modelos lineares e quadráticos ajustados para estimativa do rendimento gravimétrico em carvão vegetal dos clones de *Corymbia*

(continua)

Clone	Modelo ajustado	R ²	R ² aj
1	RGC = 55,1302 – 0,03591xTEMP	91*	87
1	RGC = 81,2783 – 0,1413xTEMP + 0,000099xTEMP ²	99 ^{ns}	98
2	RGC = 52,6194 – 0,03249x TEMP	94*	91
2	RGC = 70,8692 – 0,1060xTEMP + 0,0000696xTEMP ²	99 ^{ns}	97
3	RGC = 56,0122 – 0,03963xTEM	91*	87
3	RGC = 84,6867 – 0,1552xTEMP + 0,000109xTEMP ²	99*	99
4	RGC = 54,5410 – 0,03606xTEMP	92*	88
4	RGC = 78,4761 – 0,1325xTEMP + 0,0000913xTEMP ²	98 ^{ns}	96
5	RGC = 55,1942 – 0,03881xTEMP	92*	89
5	RGC = 79,6005 – 0,1371xTEMP + 0,0000931xTEMP ²	98 ^{ns}	96

Tabela 3 - Modelos lineares e quadráticos ajustados para estimativa do rendimento gravimétrico em carvão vegetal dos clones de *Corymbia*

(conclusão)			
Clone	Modelo ajustado	R ²	R ² aj
6	RGC = 55,9027 – 0,04179xTEMP	96*	94
6	RGC = 71,7502 – 0,1056xTEM +0,0000604xTEMP ²	98 ^{ns}	95
7	RGC = 48,9755 – 0,02773xTEMP	85 ^{ns}	78
7	RGC = 76,8905 – 0,1402xTEMP + 0,000106xTEMP ²	99*	96
C1	RGC = 54,0536 – 0,03606xTEMP	89*	88
C2	RGC = 77,6505 – 0,1311xTEMP + 0,0000900xTEMP ²	95*	94

Fonte: Do autor (2016).

RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal, TEMP: Temperatura (°C), C1: Modelo comum simples, C2: Modelo comum quadrático. * e ns: significativo e não significativo em nível de 5% de probabilidade.

Os modelos comuns simples e quadrático apresentaram coeficientes de regressão significativos e elevados valores de coeficiente de determinação ajustado, em que o modelo quadrático apresentou melhor ajuste.

Na Tabela 4 estão apresentados os coeficientes de regressão para os modelos lineares e quadráticos bem como seus respectivos valores de coeficiente de determinação e coeficiente de determinação ajustados para a estimativa do rendimento em líquido pirolenhoso em função da temperatura final de carbonização dos clones de *Corymbia* avaliados. Observa-se que os clones 3 e 7 não apresentaram coeficientes de regressão significativos para nenhum dos modelos testados, enquanto que os clones 4, 5 e 6 apresentaram coeficientes significativos apenas para os modelos quadráticos.

Verifica-se também que para os clones cujos coeficientes de regressão foram significativos tanto no modelo simples como no quadrático, que os modelos quadráticos apresentaram maiores valores de coeficiente de

determinação ajustados, indicando serem os modelos mais indicados para estudar a variação da temperatura.

Tabela 4 - Modelos lineares e quadráticos ajustados para estimativa do rendimento em líquido pirolenhoso dos clones de *Corymbia*

Clone	Modelo ajustado	R ²	R ² aj
1	RLP = 13,7376 + 0,04673xTEMP	98*	97
1	RLP = - 0,3609 + 0,1035xTEMP - 0,00005379xTEMP ²	99*	99
2	RLP = 16,4243 + 0,04343xTEMP	97*	96
2	RLP = 0,5529 + 0,1074xTEMP - 0,00006055xTEMP ²	99*	98
3	RLP = 17,2532 + 0,04385xTEMP	85 ^{ns}	78
3	RLP = - 6,9666 + 0,1414xTEMP - 0,00009240xTEMP ²	89 ^{ns}	69
4	RLP = 14,9314 + 0,04772xTEMP	87 ^{ns}	81
4	RLP = - 29,2127 + 0,2256xTEMP - 0,0001684xTEMP ²	99*	98
5	RLP = 6,6702 + 0,06274xTEMP	86 ^{ns}	80
5	RLP = -52,8204 + 0,3025xTEMP - 0,0002269xTEMP ²	99*	99
6	RLP = 14,9500 + 0,04880xTEMP	85 ^{ns}	78
6	RLP = - 34,5519 + 0,2483xTEMP - 0,0001888xTEMP ²	99*	99
7	RLP = 16,2188 + 0,04516xTEMP	83 ^{ns}	75
7	RLP = - 28,0296 + 0,2235xTEMP - 0,0001688xTEMP ²	97 ^{ns}	91
C1	RLP = 14,3122 + 0,04835xTEMP	86*	85
C2	RLP = - 21,6275 + 0,19322xTEMP - 0,0001371xTEMP ²	94*	93

Fonte: Do autor (2016)

RLP: Rendimento em líquido pirolenhoso, TEMP: Temperatura (°C), C1: Modelo comum simples, C2: Modelo comum quadrático. * e ns: significativo e não significativo em nível de 5% de probabilidade.

Pela Tabela 4 é possível constatar ainda que os modelos comuns simples e quadrático apresentaram coeficientes de regressão significativos e elevados valores de coeficiente de determinação ajustado.

A Tabela 5 apresenta os coeficientes de regressão para os modelos lineares e quadráticos, bem como seus respectivos valores de coeficiente de

determinação e coeficiente de determinação ajustados para a estimativa do rendimento em gases não condensáveis em função da temperatura final de carbonização dos clones de *Corymbia* avaliados. Observou-se que os clones 1, 4, 5 e 7 não apresentaram coeficientes de regressão significativos nos dois modelos testados. Os modelos comuns simples e quadrático apresentaram coeficientes de regressão significativos, mas com baixa magnitude nos valores dos coeficientes de determinação.

Tabela 5 - Modelos lineares e quadráticos ajustados para estimativa do rendimento em gases não condensáveis dos clones de *Corymbia*

Clone	Modelo Ajustado	R2	R2aj
1	RGNC = 31,1319 - 0,01082xTEMP	76 ^{ns}	64
1	RGNC = 19,0258 + 0,03797xTEMP - 0,00004618xTEMP ²	92 ^{ns}	77
2	RGNC = 30,9636 - 0,01095xTEMP	98*	97
2	RGNC = 28,5481 - 0,001216xTEMP - 0,0000092xTEMP ²	99 ^{ns}	97
3	RGNC = 26,7346 - 0,004218xTEMP	57*	41
3	RGNC = 22,2800 + 0,01373xTEMP - 0,00001699xTEMP ²	68*	57
4	RGNC = 30,5276 - 0,01166xTEMP	66 ^{ns}	44
4	RGNC = 50,7365 - 0,09312xTEMP + 0,00007710xTEMP ²	94 ^{ns}	84
5	RGNC = 38,1087 - 0,02388xTEMP	73 ^{ns}	59
5	RGNC = 73,1854 - 0,1652xTEMP + 0,0001338xTEMP ²	99 ^{ns}	98
6	RGNC = 29,1588 - 0,007031xTEMP	18*	16
6	RGNC = 62,7138 - 0,1422xTEMP + 0,0001280xTEMP ²	87 ^{ns}	62
7	RGNC = 34,8207 - 0,01745xTEMP	71 ^{ns}	57
7	RGNC = 51,2048 - 0,08350xTEMP + 0,00006251xTEMP ²	82 ^{ns}	47
C1	RGNC = 31,6351 - 0,01229xTEMP	44*	42
C2	RGNC = 43,9565 - 0,06195xTEMP + 0,00004701xTEMP ²	51*	47

Fonte: Do autor (2016)

RGNC: Rendimento em gases não condensáveis, TEMP: Temperatura (°C), C1: Modelo comum simples, C2: Modelo comum quadrático. * e ns: significativo e não significativo em nível de 5% de probabilidade.

5.2 Propriedades químicas e energéticas do carvão vegetal

5.2.1 Propriedades químicas do carvão vegetal

Na Tabela 6 está apresentado o resumo da análise de variância para o teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo do carvão vegetal dos clones de *Corymbia*. Verifica-se que todos os efeitos foram significativos em nível de 5% de probabilidade e que os coeficientes de variação foram baixos, indicando a eficiência do delineamento utilizado. Interação significativa indica que existe dependência entre os fatores. Dessa forma, procedeu-se em fazer o desdobramento da interação e avaliar o efeito do clone dentro da temperatura final de carbonização e vice-versa.

Tabela 6 - Resumo da análise de variância da química imediata do carvão vegetal dos clones de *Corymbia*

FV	GL	Quadrado médio		
		TMV	TCZ	TCF
Clone (C)	6	1,1498*	0,4407*	2,5693*
Temperatura (T)	3	3432,579*	2,6089*	3246,6823*
C x T	18	1,6561*	0,0858*	1,8172*
Resíduo	56	0,05129	0,0013	0,05279
Total	83		56	
Média		20,58	1,24	78,18
CV (%)		1,10	2,89	0,29

Fonte: Do autor (2016)

TMV: Teor de materiais voláteis, TCZ: Teor de cinzas, TCF: Teor de carbono fixo. * Significativo a 5% de probabilidade.

A Tabela 7 apresenta os valores médios e o teste de comparação múltipla para o desdobramento e avaliação do efeito de clone dentro das temperaturas finais de carbonização para as características químicas do carvão vegetal. Verifica-se que em todas as temperaturas o efeito de clone foi significativo para todas as características químicas.

Tabela 7 - Valores médios e o teste de comparação múltipla para as características químicas do carvão dos clones de *Corymbia*

Temperatura (°C)	Clones	Médias		
		TMV	TCZ	TCF
350	1	37,88 c	1,01 d	61,11 a
	2	36,84 b	0,72 b	62,44 c
	3	37,16 b	1,07 d	61,77 b
	4	36,49 a	0,62 a	62,89 d
	5	36,53 a	0,75 b	62,72 d
	6	37,07 b	0,83 c	62,10 c
	7	37,12 b	0,73 b	62,15 c
	Média	37,01	0,82	62,17
450	1	23,82 c	1,48 d	74,70 a
	2	24,33 d	1,26 c	74,41 a
	3	24,49 d	1,07 b	74,44 a
	4	23,26 b	0,99 a	75,75 b
	5	24,56 d	1,05 b	74,39 a
	6	22,08 a	0,93 a	76,99 c
	7	23,49 b	0,99 a	75,52 b
	Média	23,71	1,11	75,17
550	1	14,39 c	1,71 d	83,90 b
	2	13,46 b	1,46 c	85,08 d
	3	14,13 c	1,77 e	84,10 b
	4	13,26 b	1,37 b	85,37 d
	5	12,59 a	1,13 a	86,28 e
	6	15,53 d	1,18 a	83,29 a
	7	14,20 c	1,15 a	84,65 c
	Média	13,94	1,40	84,66
700	1	8,15 b	1,81 d	90,04 a
	2	8,21 b	2,04 e	89,75 a
	3	7,25 a	1,77 c	90,98 b
	4	7,39 a	1,85 d	90,76 b
	5	7,70 a	1,28 a	91,02 b
	6	7,37 a	1,25 a	91,38 c
	7	7,62 a	1,42 b	90,96 b
	Média	7,67	1,63	90,70

Fonte: Do autor (2016)

Nota: Valores médios seguidos de mesma letra, dentro das temperaturas, não diferem entre si pelo teste de comparação múltipla Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Pela Tabela 7 pode-se observar que o clone 1 apresentou o maior valor médio de materiais voláteis e menor de carbono fixo, enquanto que os clones 4 e 5 os menores e maiores valores de materiais voláteis e carbono fixo, respectivamente, para a temperatura de 350°C. O valor médio para o teor de voláteis e carbono fixo foi de 37,0% e 62,2%, respectivamente.

Para a temperatura de 450°C, os clones 2, 3 e 5 foram os que apresentaram os maiores valores médios de materiais voláteis e os menores teores de carbono fixo, enquanto que o clone 6 apresentou o maior teor de carbono fixo e menor de materiais voláteis. O valor médio para o teor de voláteis e carbono fixo foi de 23,7% e 75,2%, respectivamente.

Na temperatura de 550°C, o clone 6 apresentou o maior valor de materiais voláteis e o menor de carbono fixo, enquanto que o clone 5 o maior valor de carbono fixo e o menor de materiais voláteis. O valor médio para o teor de voláteis e carbono fixo foi de 13,9% e 84,7%, respectivamente.

Na temperatura de 700°C, os clones 1 e 2 apresentaram os maiores valores de materiais voláteis e os menores de carbono fixo, enquanto que 6 destacou-se por apresentar o maior valor médio de carbono fixo e baixo teor de materiais voláteis. O valor médio para o teor de voláteis e carbono fixo foi de 7,7% e 90,7%, respectivamente.

Para o teor de cinzas foram observados em média valores de 0,8% para temperatura de 350°C, sendo os maiores valores encontrados para os clones 1 e 3. Para temperatura de 450°C a média foi de 1,1%, o maior valor foi observado para o clone 1. A 550°C o valor médio de cinzas foi de 1,4%, sendo o clone 3 foi o que apresentou o maior valor e em 700°C a média foi de 1,6%, sendo o clone 2 o que apresentou valor mais elevado.

Observa-se que houve em média uma redução no teor de materiais voláteis de 79,3% entre a temperatura de 350°C e 700°C. Para os teores de cinzas

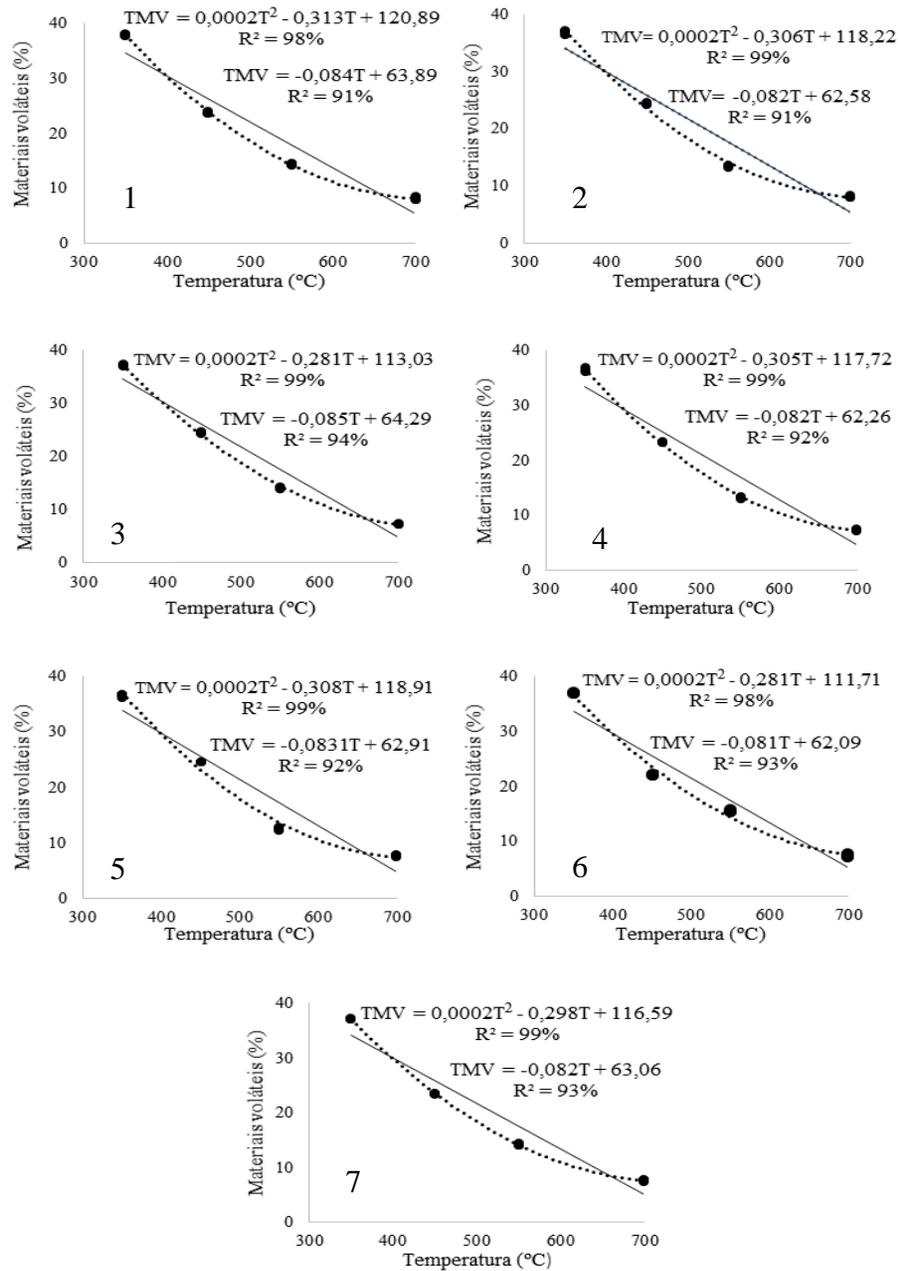
e de carbono fixo foi constatado aumento relativo de 98,8% e 45,9%, respectivamente, na faixa de temperatura considerada.

Esse comportamento foi similar ao encontrado por Trugilho e Silva (2001), que trabalhando com a espécie *Himenea courbaril* carbonizada em temperaturas variando de 300°C a 900°C, observaram redução de 92,4% no teor de materiais voláteis e aumento de 81,2% no teor de carbono fixo. Diversos outros autores como Couto et al. (2015); Oliveira, Gomes e Almeida (1982); Valente et al. (1985) e Vilas Boas et al. (2010) também observaram essa tendência dos componentes químicos do carvão em função do incremento da temperatura final de carbonização.

A redução no teor de materiais voláteis é acompanhada com aumento no teor de carbono fixo, devido à degradação térmica dos constituintes químicos da madeira, acarretando a concentração do carbono no produto sólido resultante da carbonização. O aumento no teor de cinzas é relativo e também está associado com este fenômeno, pois à medida que a matéria orgânica é volatizada ocorre a concentração da fração inorgânica.

Na Figura 7 podem ser verificados os ajustes dos modelos lineares simples e quadráticos para o teor de materiais voláteis em função da temperatura final de carbonização para os sete clones de *Corymbia*.

Figura 7 - Relação entre o teor de materiais voláteis e a temperatura final de carbonização dos clones de *Corymbia*



Fonte: Do autor (2016).

Pela Figura 7 observa-se que tanto os modelos quadráticos como os modelos lineares simples apresentaram elevados coeficientes de determinação, porém os melhores ajustes foram observados para os modelos quadráticos. Da temperatura de 550°C para 700°C a redução do teor de materiais voláteis foi de menor magnitude, indicando estabilização a partir dessa última temperatura.

Na Figura 8 podem ser verificados os ajustes dos modelos lineares simples e quadráticos para o teor de cinzas em função da temperatura final de carbonização para os sete clones de *Corymbia*.

Figura 8 - Relação entre o teor de cinzas e a temperatura final de carbonização dos clones de *Corymbia*

(continua)

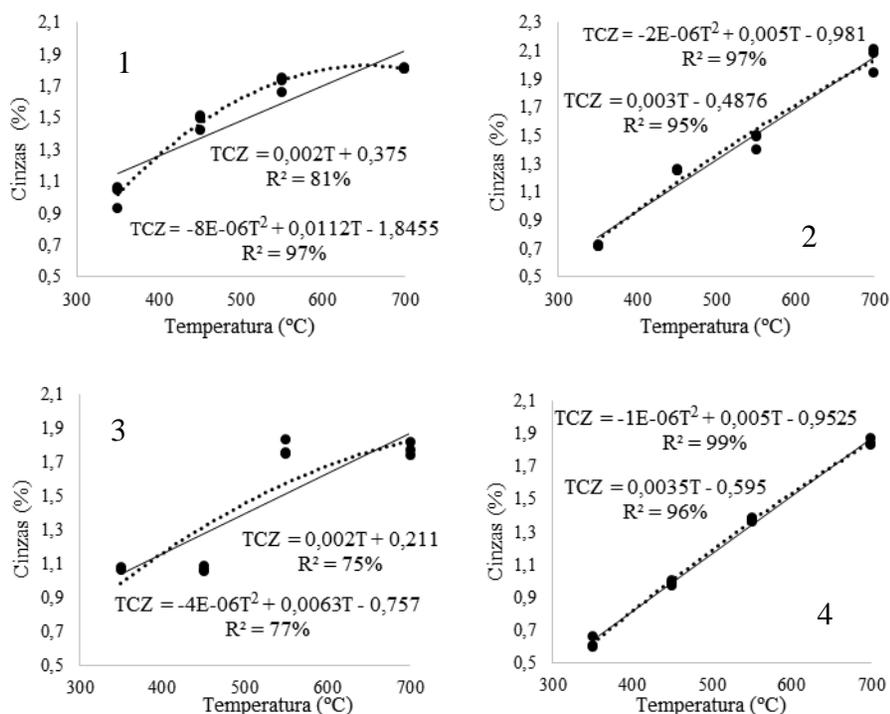
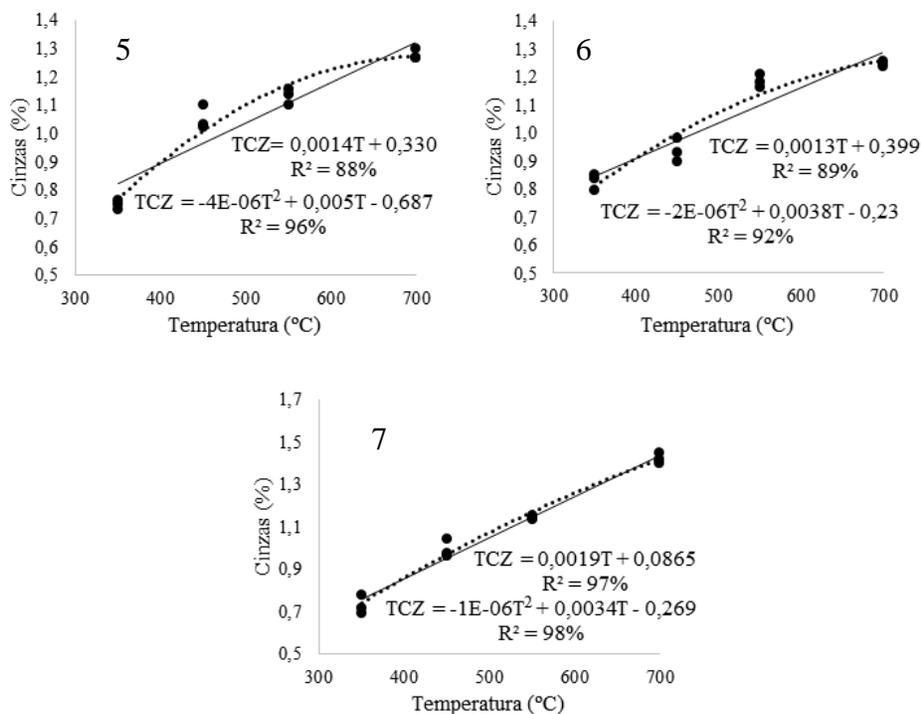


Figura 8 - Relação entre o teor de cinzas e a temperatura final de carbonização dos clones de *Corymbia*

(conclusão)

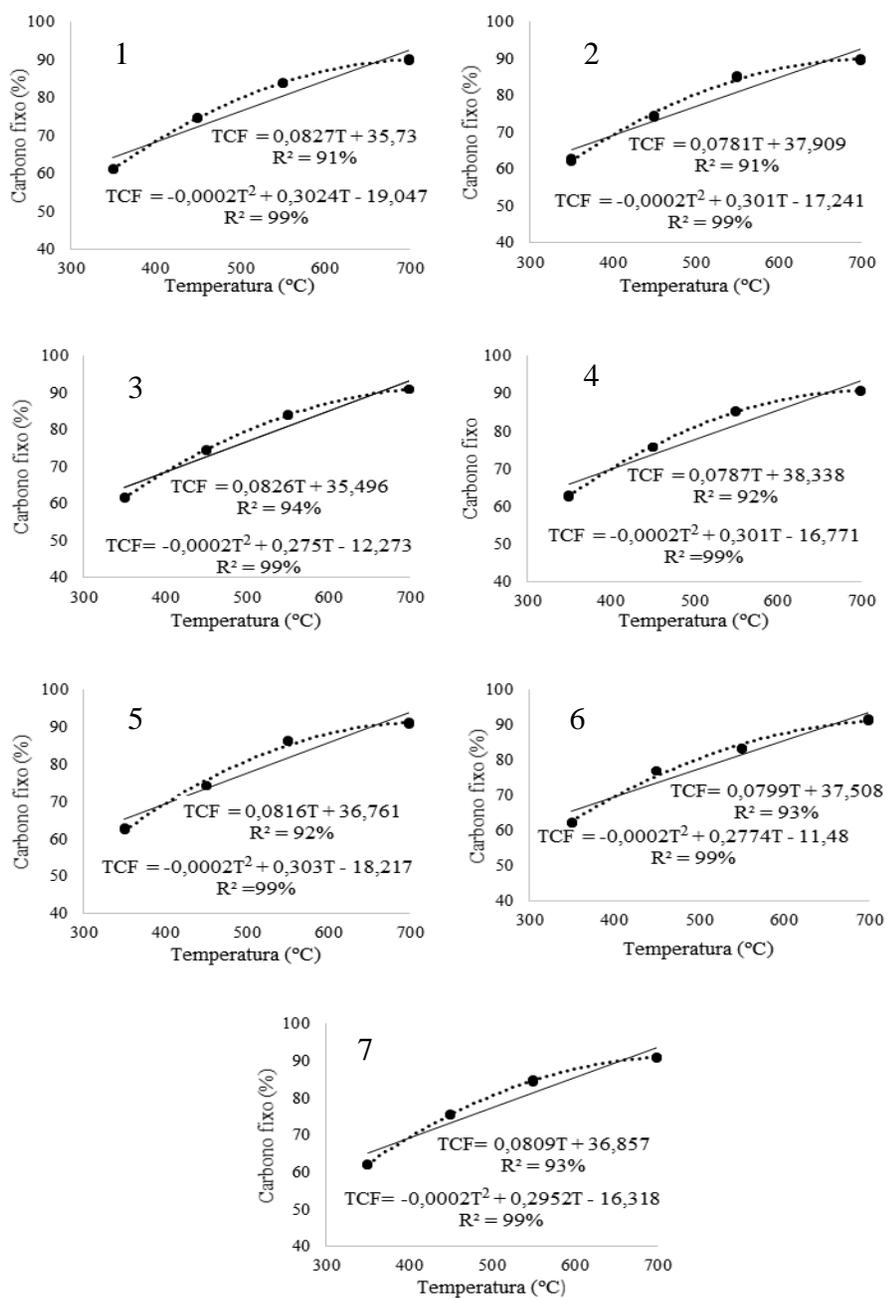


Fonte: Do autor (2016)

Como mostra a Figura 8, os modelos para estimativa do teor de cinzas em função da temperatura de carbonização apresentaram elevados coeficientes de determinação, com os modelos quadráticos também de melhores ajustes. O clone 3 (FIGURA 8) apresentou os piores ajustes nos dois modelos testados.

A Figura 9 representa a relação entre o teor de carbono fixo e a temperatura final de carbonização, juntamente com os modelos lineares simples e quadráticos e os seus respectivos coeficientes de determinação para os sete clones de *Corymbia*.

Figura 9 - Relação entre o teor de carbono fixo a temperatura final de carbonização dos clones de *Corymbia*



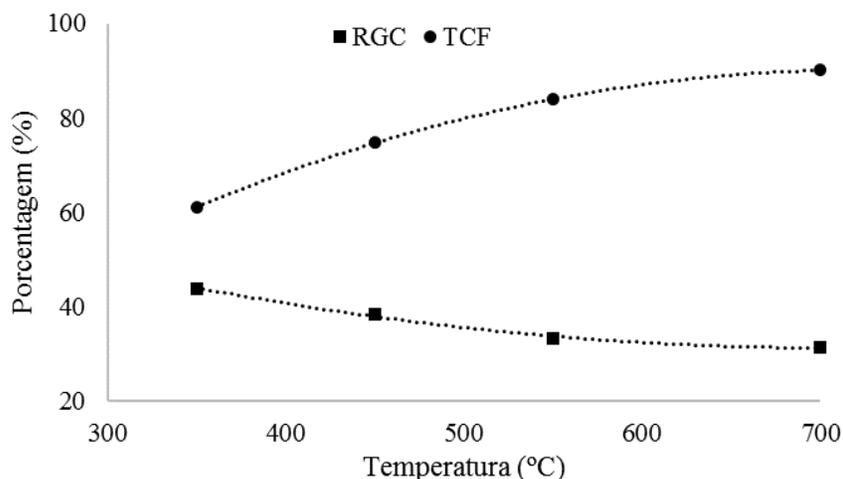
Fonte: Do autor (2016).

Pela Figura 9 observa-se que os modelos lineares simples e quadráticos apresentaram elevados coeficientes de determinação, sendo os modelos quadráticos os que apresentaram os valores mais elevados. Fenômeno semelhante ao ocorrido com o teor de materiais voláteis, porém inversamente proporcional. Observa-se também aumento de menor magnitude da temperatura de 550°C para 700°C. Este fato está relacionado à perda predominantemente de hidrogênio (H₂).

A Figura 10 exemplifica o efeito do aumento da temperatura de carbonização sobre o teor de carbono fixo e rendimento gravimétrico em carvão para o clone 1. Observa-se tendência de aumento e redução, respectivamente, do teor de carbono fixo e rendimento gravimétrico em carvão vegetal com a elevação da temperatura final de pirólise. Este efeito é típico e ocorreu da mesma forma para todos os demais clones avaliados.

Apesar do aumento do teor de carbono fixo com o incremento da temperatura de carbonização, o decréscimo do rendimento gravimétrico em carvão pode reduzir a eficiência energética do processo de conversão da madeira em carvão vegetal.

Figura 10 - Relação entre o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e teor de carbono fixo em função da temperatura final de carbonização



Fonte: Do autor (2016)

Legenda: RGC - Rendimento gravimétrico em carvão, TCF - Teor de carbono fixo.

Os teores de cinzas observados neste trabalho aumentaram significativamente entre as temperaturas de 350°C e 700°C. Para temperatura de 700°C, os valores variaram entre 1,25% e 2,04%. Esses teores estão acima do limite citado por Santos (2010), que considera, para o uso siderúrgico teores de cinzas inferiores a 1% para o carvão vegetal. Entretanto, segundo a autora, os teores de cinzas para o carvão vegetal podem variar de 0,5% a 4%. É importante ressaltar que a maior quantidade de cinzas pode resultar em redução do poder calorífico do carvão vegetal, causar danos no alto-forno e comprometer as propriedades físicas, químicas e mecânicas do ferro gusa obtido (fenômeno da segregação).

5.2.2 Propriedades energéticas do carvão vegetal

A Tabela 8 apresenta o resumo da análise de variância para a densidade relativa aparente (DRA), poder calorífico superior (PCS) e densidade energética (DE) do carvão vegetal. A análise de variância mostrou que todos os efeitos

(clone, temperatura final de carbonização e interação) foram significativos em nível de 5% de probabilidade e que os coeficientes de variação foram baixos, indicando a eficiência do delineamento utilizado. A interação significativa indica a existência de dependência entre os fatores. Diante disso, foi realizado o desdobramento da interação e avaliação do efeito de clone dentro de temperatura e vice-versa.

Tabela 8 - Resumo da análise de variância das propriedades energéticas do carvão vegetal dos clones de *Corymbia*

FV	GL	Quadrado médio		
		PCS	DRA	DE
Clone (C)	6	13789,0556*	0,0123*	680600,7531*
Temperatura (T)	3	4562700,7460*	0,0055*	2177160,4113*
C x T	18	9101,6164*	0,0013*	92381,5526*
Resíduo	56	373,4285	0,0001	4563,3385
Total	83			
Média		7670,17	0,46	3549,24
CV (%)		0,25	1,84	1,90

Fonte: Do autor (2016)

PCS: Poder calorífico superior, DRA: Densidade relativa aparente, DE: Densidade energética. * significativo em nível de 5% de probabilidade.

A Tabela 9 apresenta os valores médios e o teste de comparação múltipla para o desdobramento e avaliação do efeito de clone dentro das temperaturas finais de carbonização para as características poder calorífico superior (PCS), densidade relativa aparente (DRA) e densidade energética do carvão vegetal (DE).

Tabela 9 - Valores médios e o teste de comparação múltipla para o poder calorífico superior, densidade relativa aparente e densidade energético dos clones de *Corymbia*

Temperatura (°C)	Clones	Médias		
		PCS (cal/g)	DRA (g/cm ³)	DE (Mcal/m ³)
350	1	7043,00 b	0,46 b	3262,28 b
	2	7153,67 d	0,45 b	3208,26 b
	3	6994,67 a	0,48 c	3379,20 c
	4	7079,34 c	0,46 b	3246,82 b
	5	7045,67 b	0,39 a	2741,97 a
	6	7082,67 c	0,48 c	3367,71 c
	7	7096,00 c	0,40 a	2844,95 a
	Média	7070,71	0,44	3150,17
450	1	7503,33 b	0,48 c	3577,13 c
	2	7492,00 b	0,45 b	3388,77 b
	3	7441,00 a	0,47 c	3487,00 b
	4	7533,33 c	0,45 b	3427,01 b
	5	7533,34 c	0,41 a	3094,37 a
	6	7641,34 e	0,49 c	3715,03 d
	7	7571,33 d	0,46 b	3498,71 b
	Média	7530,81	0,45	3455,43
550	1	8094,00 d	0,49 d	3967,65 e
	2	7976,33 b	0,46 c	3673,01 c
	3	7941,67 a	0,52 e	4119,09 f
	4	8081,00 d	0,47 c	3818,20 d
	5	8075,67 d	0,41 a	3327,62 a
	6	8033,34 c	0,43 b	3453,68 b
	7	8018,34 c	0,43 b	3484,70 b
	Média	8031,47	0,45	3691,99
700	1	7959,33 a	0,49 d	3942,08 c
	2	7956,33 a	0,48 c	3851,15 c
	3	8081,33 b	0,56 f	4553,34 e
	4	8099,00 b	0,46 b	3726,85 b
	5	8097,33 b	0,42 a	3398,77 a
	6	8063,67 b	0,51 e	4124,09 d
	7	8076,67 b	0,46 b	3699,25 b
	Média	8047,67	0,48	3899,36

Fonte: Do autor (2016)

Nota: Valores médios seguidos de mesma letra, dentro das temperaturas, não diferem entre si pelo teste de comparação múltipla Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Verificou-se para os clones de *Corymbia*, aumento no poder calórico superior (PCS) em função da temperatura final de carbonização, a exceção ocorreu para os clones 1 e 2, que na temperatura de 700°C apresentaram valores de PCS inferiores aos observados na temperatura de 550°C. Este fato pode estar associado à perda de hidrogênio durante a decomposição térmica da madeira, além do maior teor de minerais apresentados por esses clones (1,81% e 2,04%, respectivamente) e menor teor de carbono fixo (90,04% e 89,75%, respectivamente) na temperatura de 700°C.

A densidade relativa aparente (DRA) apresentou variação entre as temperaturas finais de carbonização com tendência de aumento. O clone 3 foi o que apresentou o maior acréscimo nos valores de DRA, com aproximadamente 16,7% de aumento entre as temperaturas de 350°C e 700°C, enquanto que o clone 4 manteve a DRA praticamente estável na faixa de temperatura considerada.

O padrão de variação crescente da DRA está de acordo com resultados obtidos por Blankenhorn et al. (1978). O autor também encontrou variação crescente da DRA com aumento da temperatura acima de 600°C. Este fato está relacionado com a perda de massa, que passa a ser menor que a contração nas dimensões da peça de carvão, resultando em aumento nos valores de densidade relativa aparente. Resultado semelhante também foi observado em *Eucalyptus grandis* por Oliveira e Almeida (1980) e por Trugilho e Silva (2001) em *Himenea courbaril*.

Os valores médios encontrados para densidade relativa aparente do carvão vegetal variaram entre 0,39 e 0,48 g/cm³ para temperatura de 350°C, de 0,41 e 0,49 g/cm³ para temperatura de 450°C, de 0,41 e 0,52 g/cm³ para 550°C e entre 0,42 e 0,56 g/cm³ para temperatura de 700°C. Frederico (2009) observou valores para essa variável em clones de eucalipto com 3 anos de idade e carbonizados a 450°C, variando entre 0,28 e 0,32g/cm³. Trugilho et al. (2001)

observaram valores para DRA em clones de *Eucalyptus grandis*, variando entre 0,39 e 0,48 g/cm³. Santos (2010), trabalhando com *Eucalyptus* sp., carbonizados em temperatura de 450°C, encontraram valores variando de 0,26 e 0,34g/cm³. Os valores encontrados por esses autores são inferiores aos observados no presente trabalho, o que destaca a qualidade desses genótipos para produção de carvão vegetal.

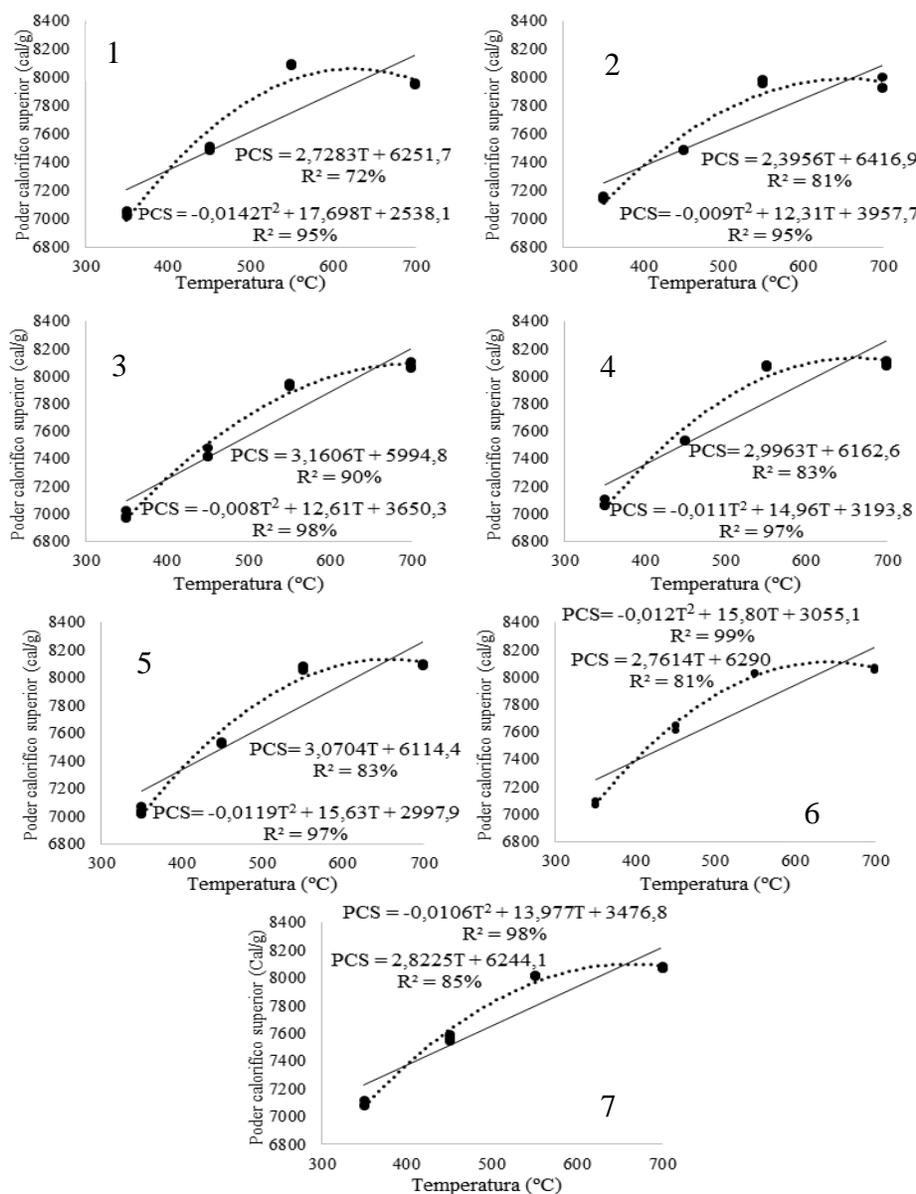
Valores mais elevados de densidade relativa aparente são desejados, principalmente quando o carvão vegetal é destinado à siderurgia, pois quanto maior a densidade do carvão menor é o volume ocupado pelo mesmo no interior do alto forno e maior a carga de minério, aumentando assim a eficiência do processo de conversão do minério de ferro.

Os valores de densidade energética que são dependentes da densidade relativa aparente e do poder calorífico superior também foram elevados, apresentando valor máximo de 4553,34 Mcal m⁻³ na temperatura de 700°C.

Para temperatura de 450°C, que é a temperatura usual de produção do carvão vegetal a densidade energética variou de 3094,37 e 3715,03 Mcal m⁻³ e foi em média 3455,43 Mcal m⁻³. Os valores encontrados na literatura para a densidade energética do carvão vegetal de espécies usualmente destinadas à bioenergia variaram de 2200 Mcal m⁻³ a 3170 Mcal m⁻³ (LIMA; SILVA; LAVORANTI, 2011; PROTÁSIO et al., 2013; VALE et al., 2001).

Na Figura 11 podem ser verificados os ajustes dos modelos lineares simples e quadráticos para o poder calorífico superior em função da temperatura final de carbonização para os sete clones de *Corymbia*.

Figura 11 - Relação entre o poder calorífico superior e a temperatura final de carbonização dos clones de *Corymbia*



Observa-se, pela Figura 11, que os modelos quadráticos foram os que apresentaram os melhores ajustes para a estimativa do poder calorífico em

função da temperatura final de carbonização. É possível observar que o poder calorífico superior tende a reduzir da temperatura de 550°C para 700°C. Este comportamento está associado ao maior teor de minerais e ao pequeno aumento no teor de carbono fixo na temperatura de 700°C.

Na Figura 12 podem ser verificados os ajustes dos modelos lineares simples e quadráticos para densidade relativa aparente do carvão vegetal dos clones de *Corymbia*. Observa-se que para os clones 1, 2 e 3 os modelos apresentaram elevados valores de coeficiente de determinação, tanto para o linear simples como o quadrático. Entretanto, os clones 4, 5, 6 e 7 apresentaram baixos coeficientes de determinação para ambos os modelos estatísticos testados.

Figura 12 - Relação entre a densidade relativa aparente e a temperatura final de carbonização dos clones de *Corymbia*

(continua)

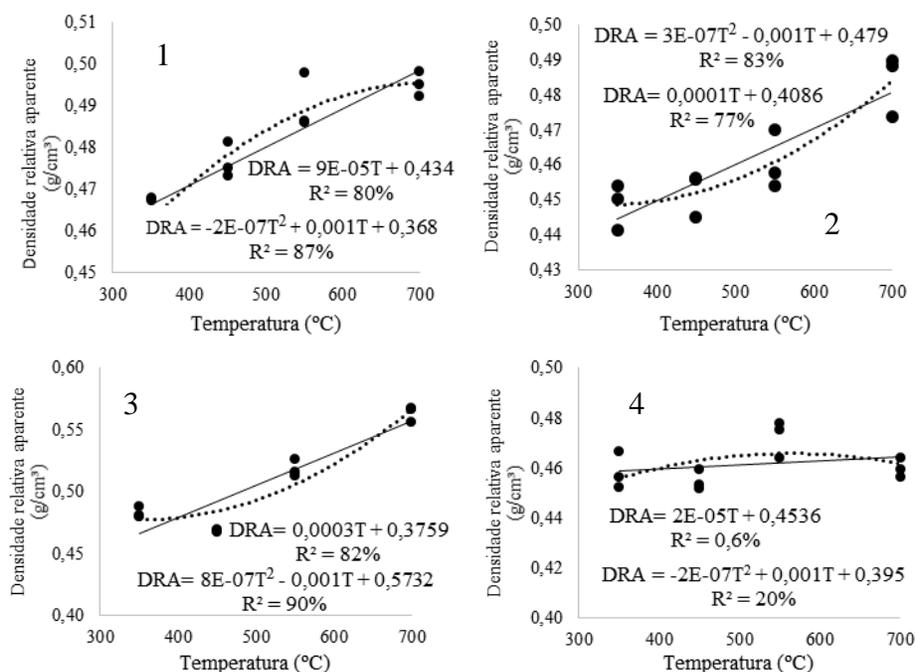
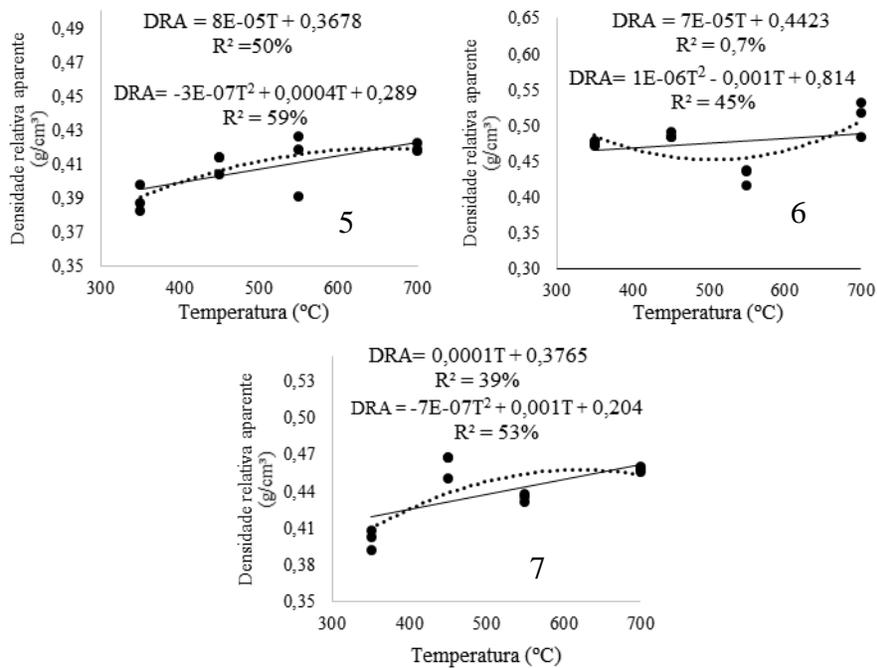


Figura 12 - Relação entre a densidade relativa aparente e a temperatura final de carbonização dos clones de *Corymbia*

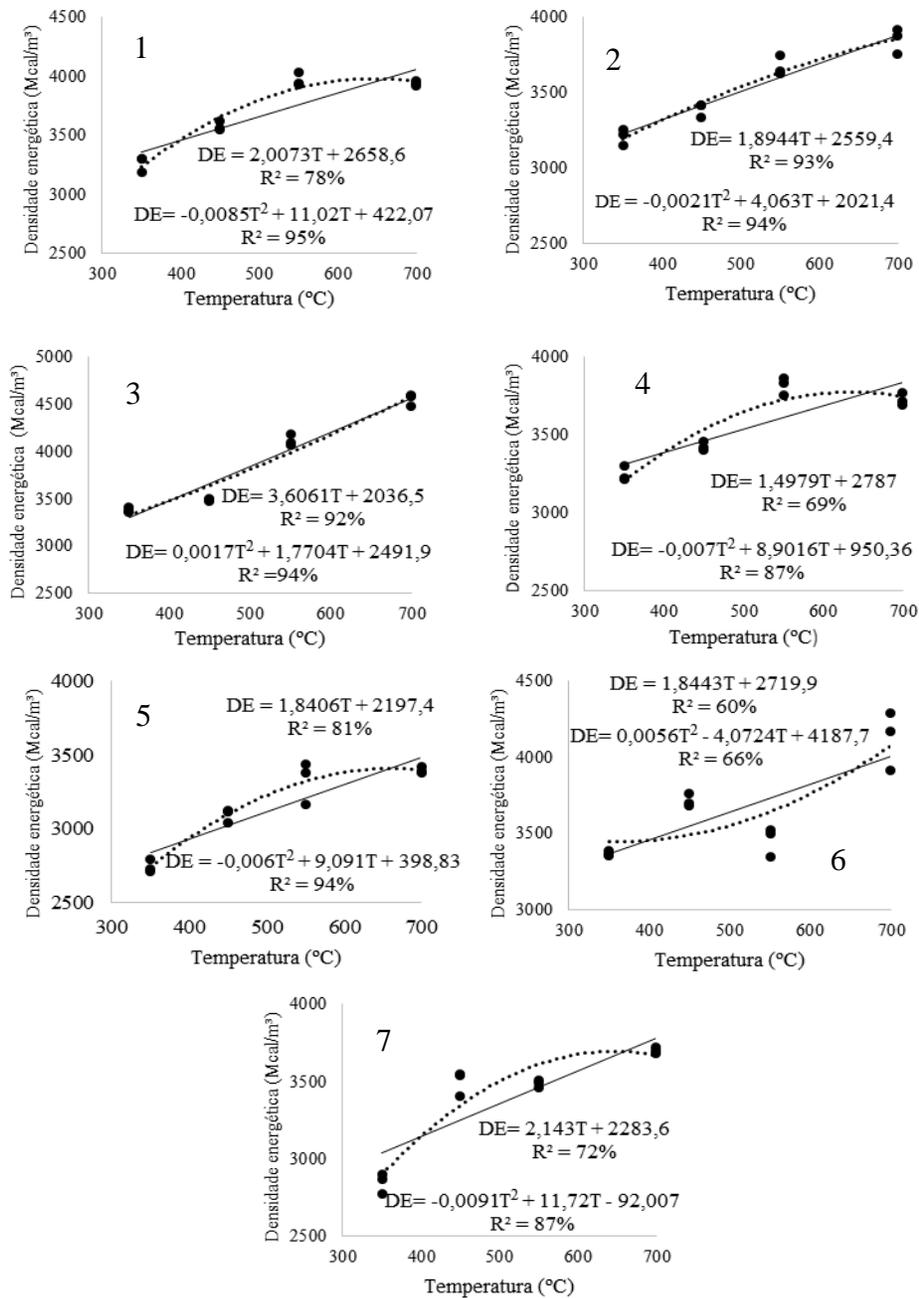
(conclusão)



Fonte: Do autor (2016)

Na Figura 13 podem ser verificados os ajustes dos modelos lineares simples e quadráticos para a densidade energética dos clones de *Corymbia* em função da temperatura final de carbonização. Verifica-se que os modelos apresentaram bons ajustes.

Figura 13 - Relação entre a densidade energética e a temperatura final de carbonização dos clones de *Corymbia*



5.3 Propriedades mecânicas do carvão vegetal

5.3.1 Compressão paralela às fibras do carvão

Na Tabela 10 está apresentado o resumo da análise de variância para o módulo de elasticidade (MOE) e resistência (RC) para o ensaio de compressão paralela às fibras. Observa-se que o efeito da interação e temperatura foram significativos, enquanto que o efeito de clone foi não significativo para todas as características consideradas. Interação significativa indica existência de dependência entre os fatores. Diante disso, foi realizado o desdobramento da interação e avaliação do efeito de clone dentro de temperatura e vice-versa.

Tabela 10 - Resumo da análise de variância para as propriedades mecânicas do carvão no ensaio de compressão paralela às fibras do carvão vegetal

FV	GL	Quadrado Médio	
		MOE	RC
Clone (C)	6	82325,3869 ns	41,3618 ns
Temperatura (T)	3	5335529,2353*	288,3505 *
C x T	18	234840,6674*	43,1173 *
Resíduo	56	75400,430534	21,1170
Total	83		
Média		1482,97	20,82
CV (%)		18,52	22,07

Fonte: Do autor (2016)

MOE: Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (MPa), RC: Resistência à compressão paralela às fibras do carvão vegetal (MPa). * e ns: significativo e não significativo em nível de 5% de probabilidade.

A Tabela 11 apresenta os valores médios e o teste de comparação múltipla para o desdobramento e avaliação do efeito de clone dentro das temperaturas finais de carbonização para as propriedades mecânicas do carvão vegetal.

Tabela 11 - Valores médios e teste de comparação múltipla para o módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras do carvão vegetal dos clones de *Corymbia*

Temperatura (°C)	Clone	Médias	
		MOE (MPa)	RC (MPa)
350	1	1011,34 a	18,59 a
	2	1095,94 a	19,57 a
	3	1069,86 a	20,30 a
	4	1226,10 a	21,99 a
	5	848,17 a	15,68 a
	6	1224,70 a	21,01 a
	7	972,83 a	22,68 a
	Média	1064,13	19,97
450	1	1209,24 a	17,81 a
	2	1117,88 a	16,70 a
	3	1360,64 a	20,26 a
	4	1454,75 a	16,53 a
	5	1353,55 a	19,31 a
	6	1295,08 a	20,72 a
	7	1374,97 a	26,67 a
	Média	1309,45	19,71
550	1	1783,44 b	24,31 b
	2	1504,66 b	18,39 b
	3	1127,64 a	10,76 a
	4	766,62 a	9,74 a
	5	1625,99 b	22,95 b
	6	1200,04 a	18,43 b
	7	1295,51 a	17,11 b
	Média	1329,13	17,38
700	1	2360,99 b	30,19 a
	2	1874,88 a	23,00 a
	3	2171,53 a	23,59 a
	4	2736,88 b	26,37 a
	5	2052,05 a	25,85 a
	6	1853,64 a	27,29 a
	7	2460,56 b	26,57 a
	Média	2215,79	26,12

Fonte: Do autor (2016)

Nota: Valores médios seguidos de mesma letra, dentro das temperaturas, não diferem entre si pelo teste de comparação múltipla Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Pela Tabela 11 observa-se que para as temperaturas de 350°C e 450°C não houve diferença significativa entre os clones para o módulo de elasticidade e resistência. Para a temperatura de 550°C os clones 1, 2 e 5 foram os que apresentaram os maiores valores de módulo de elasticidade, enquanto que para os valores de resistência os clones 1, 2, 5, 6 e 7 foram os que mais se destacaram. Na temperatura de 700°C os clones 1, 4 e 7 foram os que apresentaram os maiores valores de módulo de elasticidade e para a resistência à compressão não houve diferença significativa entre os clones.

Foi possível observar tendência de aumento das características de elasticidade e resistência mecânica do carvão com elevação da temperatura de carbonização. De acordo com os resultados é possível perceber que o módulo de elasticidade foi afetado de forma significativa pela temperatura final de carbonização, tendo aumento médio de 108,2% dentro da faixa de 350°C a 700°C. O maior aumento nos valores de módulo de elasticidade foi observado no clone 7, com 152,9% entre 350 e 700°C, enquanto que o clone 6 apresentou o de menor aumento, aproximadamente 51,4% na faixa de temperatura considerada.

Os clones 1, 2 e 5 apresentaram tendência de aumento no módulo de elasticidade à medida que a temperatura final de carbonização aumentou, com padrão similar ao encontrado por Vieira (2009), que avaliando 2 clones híbridos com 7 anos de idade, carbonizados em temperaturas variando entre 350°C e 900°C, constatou aumento tanto do módulo de elasticidade como da resistência à compressão paralela às fibras do carvão vegetal a partir do incremento da temperatura final de carbonização.

Para os clones 3, 4, 6 e 7 observou-se comportamento distinto dos demais, ou seja, de maneira geral ocorreu aumento do módulo de elasticidade de 350 °C a 450°C, seguido de redução de 450°C a 550°C e novamente aumento de 550 °C a 700°C.

Para resistência à compressão paralela às fibras em média ocorreu aumento de 30,8% entre 350°C e 700°C. O clone 5 foi o que apresentou o maior aumento 64,7%, enquanto que o clone 3 foi o que teve o menor aumento, aproximadamente 16,2%, dentro da faixa de temperatura citada acima.

Vieira (2009), avaliando as propriedades mecânicas do carvão vegetal de dois clones de *Eucalyptus* sp. produzidos em temperaturas de 350, 450, 550 e 900°C, observou valores máximo de módulo de elasticidade de 538, 571, 699 e 1026 MPa, respectivamente. Para a resistência à compressão foi de 8 MPa para temperatura de 350°C, 142 MPa a 450°C, 148 MPa a 550°C e 270 MPa a temperatura de 900°C.

De forma similar Assis (2016) também observou o aumento das características mecânicas do carvão com o acréscimo da temperatura final de carbonização. A autora trabalhou com um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* carbonizado a 550°C e 900°C e encontrou valores médios de 1247 MPa e 3794 MPa, respectivamente, para o módulo de elasticidade. O comportamento de aumento das propriedades mecânicas do carvão em temperatura elevada de carbonização também foi citado por Cetec (1982), Moore et al. (1974) e Kumar, Verma e Gupta (1999).

A redução na resistência mecânica do carvão vegetal em temperaturas de 450 e 550°C pode estar relacionada à saída dos gases voláteis do interior da peça durante a carbonização. Segundo Mendes, Gomes e Oliveira (1982), o decréscimo das propriedades mecânicas do carvão vegetal também está relacionado à perda de massa que o carvão sofre nessa faixa de temperatura. Ainda de acordo com os autores, as contrações que ocorrem no carvão não são significativas, permanecendo o número de fibras por unidade de área constante. Este fato, associado ao aumento da porosidade do carvão, que ocorre devido ao processo de volatilização dos componentes do lenho, pode ser a causa da perda da resistência mecânica do carvão até temperaturas próximas a 500°C.

O aumento das características mecânicas observadas na temperatura de 700°C estão de acordo com resultados obtidos por Cetec (1982), Moore et al. (1974) e Vieira (2009).

De acordo com Blankenhorn, Jenkins e Kline (1972), Ferrari e Rezende (1998), Moore et al. (1974), Oliveira, Gomes e Almeida (1982), Slocum, McGinnes Júnior e Beall (1978) o aumento de resistência a partir de 500 °C pode estar relacionado a fatores como a redução na liberação de voláteis, associado à modificação da quantidade, tamanho e forma da porosidade existente no material, redução dimensional associada a menor perda de massa, que resulta em acréscimo da densidade relativa aparente e aumento do número de fibras por unidade de área. Essas alterações acompanhadas de um possível rearranjo estrutural dos constituintes do carvão vegetal, principalmente do carbono que originam novas estruturas mais resistentes, produzidas em elevadas temperaturas de carbonização da madeira.

Assis et al. (2016), Blankenhorn, Jenkins e Kline (1972), Couto et al. (2015) e Vieira (2009), mencionam que a degradação térmica da lignina é similar ao processo de formação do carbono vítreo a partir de resinas fenólicas. Sendo que em temperaturas inferiores a 500°C, a lignina sofre desidratação, mas com o aumento da temperatura ocorre a formação de diversos compostos aromáticos ricos em carbono derivados deste componente do lenho. Segundo Jenkins e Kawamura (1976), materiais que apresentam constituição básica de carbono, possuem características de se ligarem entre si, podendo assumir diferentes combinações, adquirindo propriedades físicas, químicas e mecânicas distintas mediante a alteração do processo de obtenção e da matéria-prima.

De acordo com Couto et al. (2015) alguns autores citam ainda que em elevadas temperaturas de carbonização ocorre uma reestruturação dos átomos de carbono, fazendo com que os mesmos se reorganizem em estrutura semelhante às grafíticas. Ainda segundo os autores, trabalhos desenvolvidos por Mendes,

Gomes e Oliveira (1982) citam que, em temperaturas mais altas, o grau de organização e de ligações entre as cadeias carbônicas é maior.

É importante ressaltar que foram encontrados, neste trabalho, baixos valores de resistência mecânica nas temperaturas de 450°C e 550°C, que são temperaturas finais usualmente utilizadas para produção de carvão vegetal.

A Tabela 12 apresenta os coeficientes encontrados para os modelos testados, bem como a sua significância e seus respectivos coeficientes de determinação, para estimativa do módulo de elasticidade à compressão paralela para os clones de *Corymbia*. A representação gráfica dos modelos que apresentaram coeficientes de regressão significativos pode ser observada na Figura 14 do ANEXO.

Tabela 12 - Parâmetros e estatísticas dos modelos ajustados para estimativa do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão vegetal dos clones de *Corymbia*

Clone	Modelo	Coeficientes			R ²
		β_0	β_1	β_2	
1	1	-475,194860	4,032090		97*
	2	216,311375	1,244613	0,002638	98 ^{ns}
2	1	172,123302	2,392617		93*
	2	1121,874187	-1,435849	0,003624	96 ^{ns}
3	1	-27,926698	2,849450		69*
	2	3288,558107	-10,519371	0,012653	86*
4	1	-383,212523	3,764488		44*
	2	7837,103478	-29,371783	0,031363	80*
5	1	-241,402430	3,339203		97*
	2	-1347,704569	7,798731	-0,004221	99 ^{ns}
6	1	530,426636	1,683784		65*
	2	3104,024087	-8,690443	0,009819	91 ^{ns}
7	1	-511,884268	3,974247		84*
	2	2550,215159	-8,368249	0,011701	92*

Fonte: Do autor (2016)

β : coeficientes ajustados; R²: Coeficiente de determinação.

Pela Tabela 12 é possível observar que para os clones 1, 2, 5 e 6 os coeficientes ajustados para os modelos quadráticos não foram significativos.

Para os demais clones ambos os modelos apresentaram coeficientes significativos. Os modelos lineares foram os que apresentaram os menores coeficientes de determinação, em que pior ajuste foi observado no clone 4.

Para estimativa da resistência à compressão paralela às fibras também foram ajustados modelos de regressão para analisar o desdobramento de temperatura dentro dos clones avaliados. A Tabela 13 apresenta os coeficientes encontrados para os modelos testados, bem como a sua significância e seus respectivos coeficientes de determinação.

Tabela 13 - Parâmetros e estatísticas dos modelos ajustados para estimativa da resistência à compressão paralela às fibras do carvão vegetal dos clones de *Corymbia*

Clone	Modelo	Coeficientes			R ²
		β_0	β_1	β_2	
1	1	4,047788	0,036450		89*
	2	24,402467	-0,045600	0,000078	93 ^{ns}
2	1	13,457040	0,011628		42 ^{ns}
	2	45,542512	-0,117710	0,000122	96 ^{ns}
3	1	16,722274	0,003916		1 ^{ns}
	2	84,895283	-0,270891	0,000260	57*
4	1	13,272648	0,010510		4 ^{ns}
	2	121,490615	-0,425719	0,000413	89*
5	1	5,999938	0,029231		97*
	2	-4,894946	0,073085	-0,000042	99 ^{ns}
6	1	13,446199	0,016424		41 ^{ns}
	2	56,017782	-0,155242	0,000201	88*
7	1	21,228349	0,003341		1 ^{ns}
	2	61,650550	-0,159601	0,000154	24 ^{ns}

Fonte: Do autor (2016)

β : coeficientes ajustados; R²: Coeficiente de determinação.

Pela Tabela 13 observa-se que para os clones 2 e 7 ambos os modelos não apresentaram coeficientes significativos, indicando que os mesmos não são indicados para estimativa resistência à compressão paralela as fibras do carvão. Os demais clones apresentaram ao menos um modelo com coeficientes significativos. A Figura 15, do ANEXO, apresenta as tendências da resistência à

compressão paralela para os clones que apresentaram modelos com coeficientes de regressão significativos.

5.3.2 Compressão perpendicular às fibras do carvão

Na Tabela 14 está apresentado o resumo da análise de variância para o módulo de elasticidade (MOEp) e resistência (RCp) do carvão para o ensaio de compressão perpendicular às fibras. Observa-se que para o módulo de elasticidade os efeitos de clone e temperatura foram significativos e para resistência os efeitos de temperatura e interação foram significativos. Interação significativa indica a existência de dependência entre os fatores e dessa forma, deve-se avaliar um efeito dentro de outro, assim foi realizado o desdobramento da interação e avaliação do efeito de clone dentro de temperatura e vice-versa.

Tabela 14 - Resumo da análise de variância para as propriedades mecânicas do carvão no ensaio de compressão perpendicular às fibras do carvão vegetal

FV	GL	Quadrado Médio	
		MOEp	RCp
Clone (C)	6	29702,0618*	1,9447 ^{ns}
Temperatura (T)	3	189448,7077*	16,0082*
C x T	18	8565,1170 ^{ns}	2,6161*
Resíduo	56	12494,2318	1,1291
Total	83		
Média		209,85	3,39
CV (%)		53,27	31,29

Fonte: Do autor (2016)

MOEp: Módulo de elasticidade à compressão perpendicular às fibras (MPa), RCp: Resistência a compressão perpendicular às fibras do carvão vegetal (MPa). * e ^{ns}: significativo e não significativo em nível de 5% de probabilidade.

A Tabela 15 apresenta os valores da média de módulo de elasticidade dos clones de *Corymbia*. Observou-se que o clone 4 foi o único que apresentou a maior média nos valores de módulo de elasticidade à compressão perpendicular às fibras, diferenciando estatisticamente dos demais clones.

Tabela 15 - Valores médios e teste de média do módulo de elasticidade à compressão perpendicular às fibras do carvão vegetal dos clones de *Corymbia*

Clone	Médias
	MOE _p (MPa)
1	192,83 a
2	177,38 a
3	194,46 a
4	311,75 b
5	224,34 a
6	210,06 a
7	158,11 a

Fonte: Do autor (2016)

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

Na Tabela 16 estão apresentados os coeficientes dos modelos de regressão ajustados para a estimativa do módulo de elasticidade à compressão perpendicular às fibras do carvão vegetal em função da temperatura final de carbonização, para todos os materiais genéticos conjuntamente e o coeficiente de determinação. É possível observar que os modelos apresentaram elevados coeficientes de determinação e que o modelo quadrático foi o de melhor ajuste.

Tabela 16 - Parâmetros e estatísticas dos modelos ajustados para estimativa do módulo de elasticidade

Modelo	Coeficientes			R ²
	β_0	β_1	β_2	
1	-94,775127	0,594391		87*
2	448,252689	-1,594566	0,002072	99*

Fonte: Do autor (2016)

β : coeficientes ajustados; R²: Coeficiente de determinação.

A Tabela 17 apresenta os valores médios e o teste de comparação múltipla para o desdobramento e avaliação do efeito de clone dentro das

temperaturas finais de carbonização para a resistência à compressão perpendicular às fibras do carvão vegetal.

Tabela 17 - Valores médios e teste de comparação múltipla para a resistência à compressão perpendicular às fibras do carvão vegetal dos clones de *Corymbia*

(continua)

Temperatura (°C)	Clones	Médias
		RCp (MPa)
350	1	4,72 b
	2	2,23 a
	3	3,49 b
	4	3,79 b
	5	1,96 a
	6	4,05 b
	7	2,69 a
	Média	3,27
450	1	1,76 a
	2	3,45 a
	3	3,15 a
	4	3,75 a
	5	2,79 a
	6	2,39 a
	7	2,00 a
	Média	2,75
550	1	3,39 a
	2	2,43 a
	3	2,56 a
	4	2,92 a
	5	2,19 a
	6	2,62 a
	7	3,12 a
	Média	2,74

Tabela 17 - Valores médios e teste de comparação múltipla para a resistência à compressão perpendicular às fibras do carvão vegetal dos clones de *Corymbia*

(conclusão)

Temperatura (°C)	Clones	Médias
		RCp (MPa)
700	1	5,75 b
	2	6,32 b
	3	4,12 a
	4	3,99 a
	5	3,72 a
	6	4,95 b
	7	4,69 b
	Média	4,79

Fonte: Do autor (2016)

Nota: Valores médios seguidos de mesma letra, dentro das temperaturas, não diferem entre si pelo teste de comparação múltipla Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Pela Tabela 17 observa-se que para temperatura de 350°C os clones 1, 3, 4 e 6 foram os que apresentaram os maiores valores médios de resistência, enquanto que para os clones 2, 5 e 7 os menores valores médios.

Nas temperaturas de 450°C e 550°C não foi observada diferença significativa entre os valores médios de resistência para os clones avaliados.

Para 700°C os clones 1, 2, 6 e 7 apresentaram os maiores valores médios de resistência.

Na Tabela 17 pode-se verificar que independente do clone avaliado, comportamento de aumento dos valores das propriedades mecânicas do carvão vegetal na temperatura de 700°C, os valores médios de resistência à compressão perpendicular às fibras tiveram aumento 46,5% entre a temperatura de 350°C e 700°C.

Assis et al. (2016), estudando o comportamento mecânico do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla*, também observou o aumento do módulo de elasticidade com o incremento da temperatura de

carbonização. A autora trabalhou com duas temperaturas de carbonização 500°C e 900°C e encontrou valores médios de 1,5 MPa e 3,8 MPa, respectivamente, para a resistência, valores esses inferiores às médias encontradas neste trabalho. Entretanto, as metodologias utilizadas neste trabalho e as de Assis et al. (2016) não são as mesmas, o que pode ter contribuído para essas diferenças nos resultados do ensaio. Esse fato reforça a importância do desenvolvimento de metodologia específica e estabelece uma normativa para direcionar/orientar estudos futuros.

De forma similar ao observado para a compressão paralela, a melhoria das propriedades mecânicas do carvão na temperatura de 700°C pode estar relacionada ao aumento da densidade do carvão vegetal. O acréscimo da densidade resulta em melhora significativa nas características do carvão vegetal conforme constatado por Assis et al. (2016), Couto et al. (2015) e Kumar, Verma e Gupta (1999).

Essa característica associada ao rearranjo molecular do carvão, com as alterações na estrutura carbônica, assim como outras modificações já discutidas anteriormente, são as possíveis causas do aumento da elasticidade e resistência observados para resultados obtidos nos ensaios de compressão perpendicular às fibras.

É possível observar que os maiores valores médios de módulo de elasticidade e resistência ocorreram na temperatura de 700°C, comportamento semelhante ao observado para o ensaio de compressão paralela às fibras. No entanto, as magnitudes dos valores obtidos para compressão perpendicular foram inferiores aos observados nos ensaios de compressão paralela.

Para temperatura de 350°C foi observado que o módulo de elasticidade foi em média 7,2 vezes menor no ensaio de compressão perpendicular às fibras, enquanto que para resistência verificou-se redução de 6,1 vezes nos valores.

Os ensaios realizados a 450°C foram os que apresentaram a maior discrepância entre as propriedades do carvão vegetal avaliadas nos testes de compressão. Nesta temperatura foi observado que o módulo de elasticidade à compressão perpendicular foi 9,3 vezes menor que os valores encontrados para a compressão paralela às fibras, enquanto que a resistência apresentou redução de 7,1 vezes.

Entretanto, com o aumento da temperatura de carbonização observou-se que a diferença entre a magnitude dos valores de elasticidade e resistência obtidos nos ensaios de compressão paralela e perpendicular tendem a reduzir.

Para temperatura de 550°C o módulo de elasticidade foi 6,9 vezes menor, enquanto que a resistência foi 6,3 vezes menor para a compressão perpendicular. A 700°C a magnitude dos valores foi 6,4 vezes menor para o módulo de elasticidade e 5,5 vezes menor para a resistência à compressão perpendicular às fibras do carvão vegetal.

Essa diferença nos valores está associada ao arranjo estrutural e distribuição dos elementos anatômicos do carvão. Uma vez que as fibras do carvão vegetal estão dispostas verticalmente, é esperado que a resistência à compressão paralela seja superior à compressão perpendicular às fibras. A variação entre os valores das propriedades mecânicas em função do plano no qual é aplicada a força de compressão é similar ao observado para madeira; entretanto, a magnitude dessa diferença é maior para o carvão vegetal. Porém, como observado, a partir de 550°C a discrepância entre os resultados da compressão paralela e perpendicular tende a reduzir.

Para estimativa da resistência à compressão perpendicular às fibras do carvão foram ajustados modelos de regressão. A Tabela 18 apresenta os coeficientes encontrados para os modelos testados, bem como a sua significância e seus respectivos coeficientes de determinação.

Tabela 18 - Parâmetros e estatísticas dos modelos ajustados para estimativa da resistência à compressão perpendicular às fibras do carvão vegetal dos clones de *Corymbia*

Clone	Modelo				R ²
		β_0	β_1	β_2	
1	1	1,395327	0,004903		18*
	2	24,305788	-0,087449	0,000087	83*
2	1	-1,737757	0,010433		68*
	2	10,110974	-0,037329	0,000045	82*
3	1	2,526106	0,001575		12 ^{ns}
	2	11,741282	-0,035571	0,000035	86*
4	1	3,556636	0,000117		0,14 ^{ns}
	2	9,425297	-0,023540	0,000022	57 ^{ns}
5	1	0,473187	0,004324		66*
	2	3,623911	-0,008407	0,000013	72*
6	1	1,829377	0,003276		16 ^{ns}
	2	19,930036	-0,069688	0,000069	98*
7	1	-0,193053	0,006479		72*
	2	8,526010	-0,028668	0,000033	93 ^{ns}

Fonte: Do autor (2016)

β : coeficientes ajustados; R²: Coeficiente de determinação ajustado.

Pela Tabela 18 pode-se observar que o clone 4 foi o único que apresentou modelos não significativos para estimativa da resistência.

Nos clones 3 e 6 os modelos quadráticos foram os que apresentaram os melhores ajustes, enquanto que no clone 7 o modelo linear simples foi o único que apresentou significância.

Para os clones 1, 2 e 5 os modelos lineares simples e quadráticos apresentaram coeficientes significativos para ambos os modelos, sendo que os modelos quadráticos foram os de melhores ajustes.

A Figura 16 do ANEXO, apresenta as tendências da resistência à compressão perpendicular, para os clones que apresentaram modelos com coeficientes de regressão significativos.

6 CONCLUSÕES

Os resultados observados permitem concluir que os rendimentos gravimétricos da carbonização foram afetados pela temperatura final. O rendimento em carvão e gases não condensáveis apresentaram tendência de redução, enquanto que o rendimento em líquido pirolenhoso obteve efeito contrário.

As características químicas e energéticas do carvão vegetal apresentaram tendência de aumento até a temperatura de 700°C, exceto para o poder calorífico superior dos clones 1 e 2 que tiveram ligeira redução nos valores de 550°C a 700°C. O teor de materiais voláteis apresentou comportamento contrário.

O módulo de elasticidade e a resistência à compressão paralela às fibras apresentaram tendência de aumento entre as temperaturas de 350°C e 700°C.

Para a compressão perpendicular às fibras também se observou tendência de aumento das propriedades do carvão vegetal na faixa de temperatura entre 350 e 700°C. A magnitude dos valores de módulo de elasticidade e resistência para compressão perpendicular foram menores que os observados para compressão paralela às fibras, sendo que aparentemente a partir de 550°C essa diferença na magnitude dos valores de compressão paralela e perpendicular tendeu a reduzir.

Nas temperaturas de 450°C e 550°C que são temperaturas usualmente utilizadas para produção de carvão vegetal foram observados baixos valores de resistência e elasticidade no carvão vegetal.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à natureza heterogênea e friável que o carvão vegetal apresenta, algumas dificuldades foram constatadas no presente trabalho.

Apesar de a metodologia utilizada na preparação dos corpos de prova neste trabalho ter sido adequada, a confecção das amostras de carvão vegetal com dimensões planas e livres de defeitos mostrou-se demorada e difícil.

A amostragem deve ser feita de forma criteriosa, para evitar a utilização de corpos de prova defeituosos; desta forma é aconselhável a utilização de equipamento que possibilite observar a estrutura interna da amostra, pois o carvão pode apresentar defeitos não visíveis a olho nu.

Diante da dificuldade de confecção de corpos de prova e de realização dos ensaios de compressão, é importante desenvolver métodos de avaliação destrutivos ou não destrutivos nos quais evite a preparação minuciosa dos corpos de prova.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **D143-94**: standard methods of testing small clear specimens of timber. Philadelphia: ASTM International, 1995. 679 p.

ANTAL, M. J.; GRENDI, M. The art, science, and technology of charcoal production. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 42, n. 8, p. 1619-1640, 2003.

ARAÚJO, J. B. Carvão vegetal para alto forno: alguns dados nacionais e estrangeiros. **Boletim Técnico do Departamento Nacional da Produção Mineral**, Rio de Janeiro, n. 36, p. 37-49, 1952.

ASSIS, M. R. et al. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, New York, v. 1, n. 3, p. 1-18, May 2016.

ASSIS, M. R. **Study of the variability of mechanical and physical properties of charcoal obtained under different pyrolysis conditions**. 2016. 158 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

ASSIS, P. S.; BRAGA, R. N. B. Análise das limitações da capacidade de altos-fornos e carvão vegetal. In: SEMINÁRIO DA COMISSÃO DE TECNOLOGIA DO INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA, 1977, Rio de Janeiro. **Anais...** Timóteo: ACESITA, 1977. p. 37-46.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7416**: carvão vegetal: determinação do índice de quebra e abrasão. Rio de Janeiro: ABNT, 1985a. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8740**: carvão vegetal: determinação do índice de quebra e abrasão. Rio de Janeiro: ABNT, 1985b. 4 p.

AZEVEDO, C. H. S. et al. Influência da temperatura final de carbonização e da taxa de aquecimento no rendimento gravimétrico e teor de cinzas do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Enciclopédia biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 1279-1287, jul. 2013.

BARCELLOS, D. C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 162 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

BLANKENHORN, P. R. et al. Porosity and pore size distribution of Black Cherry carbonized in an inert atmosphere. **Wood Science**, Denver, v. 11, n. 1, p. 23-29, July 1978.

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, Jan. 1972.

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

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

BRITO, J. O.; BARRICHELLO, L. E. G. Comportamento isolados da lignina e da celulose da madeira frente a carbonização. **Circular técnica IPEF**, Piracicaba, n. 28, p. 4, 1977.

CASTRO, L. F. A.; TAVARES, R. P.; ASSIS, P. A. **Aspectos termodinâmicos e cinéticos da injeção de carvão e outros materiais pulverizados no alto-forno**. Belo Horizonte: [s.n.], 2003. 44 p.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE.
Mapeamento de ações institucionais para sustentabilidade da produção de ferro-gusa a partir de carvão vegetal. Brasília: CGEE, 2014. 26 p.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE.
Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia. Brasília: CGEE, 2015. 150 p.

COUTO, A. M. et al. Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 817-831, dez. 2015.

DOAT, J.; PETROF, G. **La carbonization des bois tropicaux. Bois et Forêts des Tropiques**, Paris, v. 1, n. 159, p. 55-64, Jan./Feb. 1975.

FERRARI, P. E.; REZENDE, M. C. Carbono polimérico: processamento e aplicação. **Polímeros**, São Carlos, v. 8, n. 4, dez. 1998.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS – CETEC. **Produção e Utilização de Carvão Vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. 393 p.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS - CETEC. **Programa de racionalização e sustentação da produção siderúrgica a carvão vegetal**: volume 1. Belo Horizonte: CETEC, 1978. Relatório Técnico.

GOMES, P. A., OLIVEIRA, J. B. Teoria da carbonização da madeira. In: PENEDO, W. R. (Ed.). **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. p. 27–42.

GÓMEZ, E. O.; SEYE, O.; CORTEZ, L. A. B. **Estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos**. Campinas: Agrener, 2000.

HAYKIRI-ACMA, H.; YAMAN, S.; KUCUKBAYRAK, S. Comparison of the thermal reactivities of isolated lignin and holocellulose during pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 91, n. 7, p. 759-764, July 2010.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Anuário estatístico da IBÁ**: ano base 2014. Brasília: IBÁ, 2015. 80 p.

INSTITUDO DO AÇO BRASIL – IAB. **Anuário estatístico do IAB**: ano base 2014. Rio de Janeiro: IBÁ, 2015. 94 p.

JENKINS, G. M.; KAWAMURA, K. **Polymeric carbons-carbon fibre, glass and char**. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1976. 188 p.

KUMAR, M.; GUPTA, R. Scanning electron microscopic study of acacia and eucalyptus wood chars. **Journal of Materials Science**, Norwell, v. 30, n. 2, p. 544-551, Jan. 1995.

KUMAR, M.; VERMA, B. B.; GUPTA, R. C. Mechanical properties of *Acacia* and *Eucalyptus* wood chars. **Energy Sources**, New York, v. 21, n. 8, p. 675-685, 1999.

KURAUCHI, M. H. N. **Uma abordagem de ensaio de resistência mecânica de carvão vegetal**. 2014. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; LAVORANTI, O. J. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 65, p. 9-17, Jan./Mar. 2011.

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

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

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

MONTEIRO, M. D. A. Em busca de carvão vegetal barato: o deslocamento de siderúrgicas para a Amazônia. **Novo Caderno NAEA- Núcleo de Altos Estudos da Amazônia**, Belém, v. 9, n. 2, p. 55-97, dez. 2006.

MOORE, G. R. et al. Some physical properties of birch carbonized in a nitrogen atmosphere. **Wood and Fiber**, Madison, v. 6, n. 3, p. 193-199, 1974.

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

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Caracterização do processo de fabricação de carvão em fornos de alvenaria. In: PENEDO, W. R. (Ed.). **Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades, controle de qualidade**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 63-102.

OLIVEIRA, T. L.; ALMEIDA, M. R. Avaliação de carvão vegetal. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. p. 42-53.

PEREIRA, B. L. C. et al. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 567-576, maio/jun. 2013.

PROTÁSIO, T. P. et al. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 74, p. 137-149, abr./jun. 2013.

PROTÁSIO, T. P. et al. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 78, p. 111-123, abr./jun. 2014.

RAAD, T. J. **Simulação do processo de secagem e carbonização do *Eucalyptus* spp.** 2004. 114 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

REZENDE, J. B.; SANTOS, A. C. D. **A cadeia produtiva do carvão vegetal em Minas Gerais: pontos críticos e potencialidades**. Viçosa: EPAMIG, 2010. 80 p.

ROWELL, R. M. et al. Cell wall chemistry. In: ROWELL, R. M. (Ed.). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005. p. 121-138.

ROWELL, R. M.; LE VAN-GREEN, S. Thermal properties. In: ROWELL, R. M. (Ed.). **Hand book of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005. p. 121-138.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalipto**. 2010. 159 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SÈYE, O. **Influência da temperatura de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus***. 1998. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1998.

SJÖTRÖM, E. **Wood Chemistry: fundamentals and applications**. New York: Academic Press, 1992. 293 p.

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

TRUGILHO, P. F. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.

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

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

VALE, A. T. et al. Relações entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 25, n. 89, p. 89-95, jan./mar. 2001.

VALENTE, O. F. et al. Efeito da temperatura de carbonização nos rendimentos e propriedades do carvão vegetal produzido. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 9, n. 1, p. 28-39, jan./fev. 1985.

VIEIRA, R. 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.

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

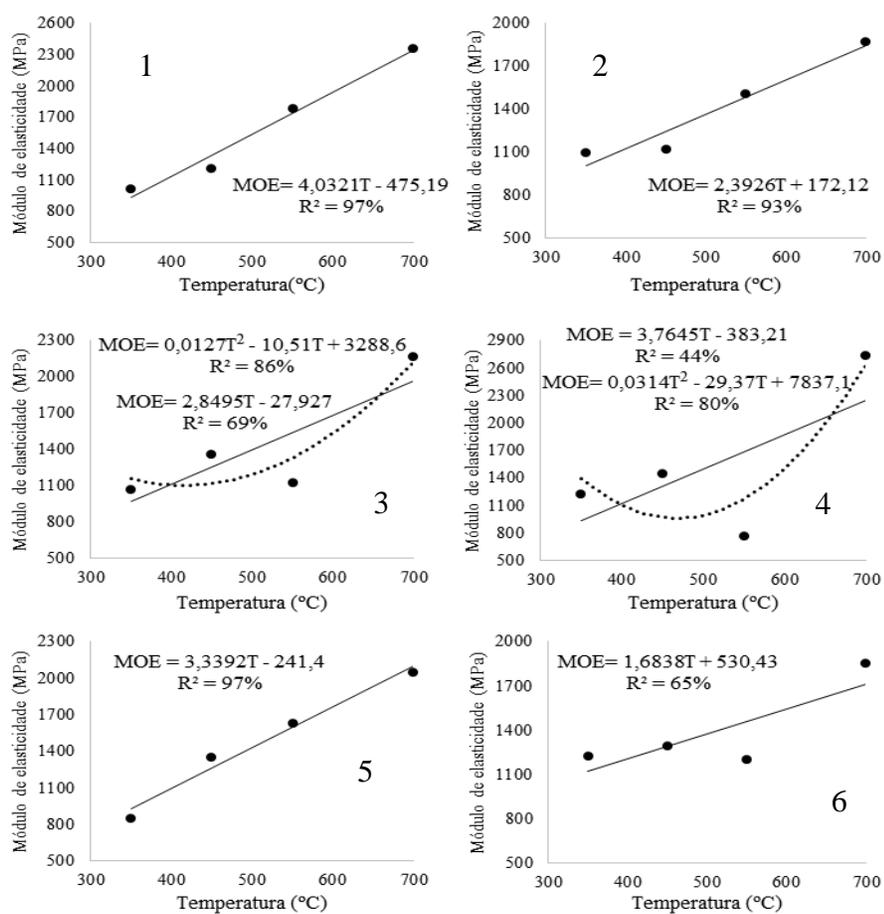
VILAS BOAS, M. A. et al. Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 481-490, set. 2010.

WHITE, R. H. Effect of lignin content and extractive on the higher heating value of wood. **Wood fiber and Science**, Madison, v. 19, n. 4, p. 446-452, Oct. 1987.

YANG, H. et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis.
Fuel, London, v. 86, n. 12/13, p. 1781-1788, Aug. 2007.

**ANEXO A - TENDÊNCIA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO
CARVÃO VEGETAL COM INCREMENTO DA TEMPERATURA
FINAL DE CARBONIZAÇÃO**

Figura 14 – Relação entre o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras e a temperatura final de carbonização dos clones de *Corymbia*.



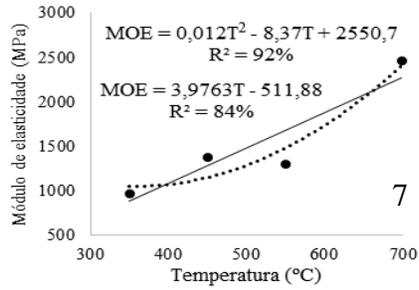
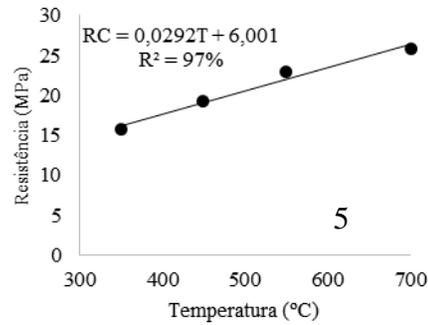
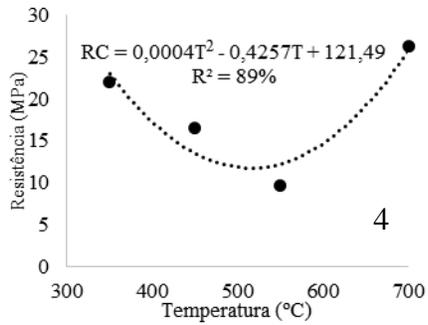
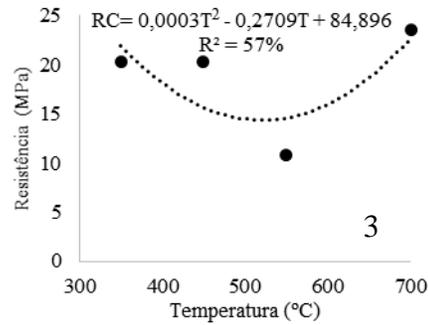
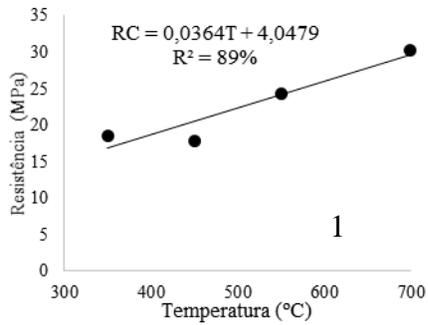


Figura 15 – Relação entre a resistência à compressão paralela às fibras e a temperatura final de carbonização dos clones de *Corymbia*.



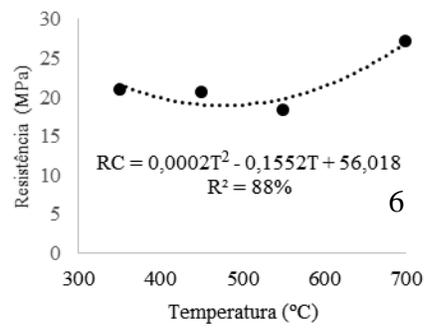


Figura 16 – Relação entre a resistência à compressão perpendicular às fibras e a temperatura final de carbonização dos clones de *Corymbia*.

