

ADALBERTO MIRANDA

**AVALIAÇÃO DE COQUE PRÉ-MOLDADO PRODUZIDO COM FINOS DE
CARVÃO E PICHE DE EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2001

ADALBERTO MIRANDA

**AVALIAÇÃO DE COQUE PRÉ-MOLDADO PRODUZIDO COM FINOS DE
CARVÃO E PICHE DE EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de abril de 2001.

Prof. Benedito Rocha Vital
(Conselheiro)

Prof. Ricardo Marius Della Lucia
(Conselheiro)

Prof. Ronaldo Santos Sampaio

Profa. Ana Márcia M. L. Carvalho

Prof. Alexandre Santos Pimenta
(Orientador)

A Deus.

A meus pais, Hormínio de Miranda (*in memoriam*)

e Ivone Ozólio.

A meus irmãos.

A meus amigos.

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade oferecida para realização do Curso de Mestrado em Ciência Florestal.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG) e ao Instituto Euvaldo Lodi (IEL), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Professor Alexandre Santos Pimenta, pelo apoio na execução do trabalho, pela orientação e pela amizade.

Aos Professores conselheiros Benedito Rocha Vital e Ricardo Marius Della Lucia, pelas sugestões e pelos esclarecimentos para realização deste trabalho.

A Silvana Lages Ribeiro Garcia, pelos ensinamentos, pelas dicas e pelos conselhos durante as análises estatísticas.

Aos funcionários do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira Hésio, Maninho e em especial ao Aristeu, pela grande ajuda na realização deste trabalho.

Em especial, à Viviane dos Santos Brandão, pelo carinho, pela compreensão e pela ajuda na elaboração da tese.

Aos amigos Aderbal, Ademar, Nelson, Tarcísio, Luizinho, Edival, Rosana, Fernando, Cristian, Serpa e Alecia, pela amizade.

Aos estagiários Clodoaldo e Camila, que contribuíram muito para a realização deste trabalho.

A meu pai Hormínio de Miranda (*in memoriam*), cujo exemplo ensinou-me a ser um cidadão honesto, e a minha mãe, pelo exemplo de humildade.

BIOGRAFIA

ADALBERTO MIRANDA, filho de Hormínio de Miranda e Ivone Ozólio, nasceu em 23 de janeiro de 1963, em Guaratinguetá, SP.

Em março de 1993, ingressou no curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, graduando-se em dezembro de 1997.

No período de agosto de 1996 a junho de 1997, foi bolsista de iniciação científica no programa Institucional, convênio CNPq/UFV, tendo como orientador o Professor Maurício Paulo Ferreira Fontes.

No período de março de 1998 a fevereiro de 1999, foi bolsista de aperfeiçoamento do CNPq, no Departamento de Solos, sob a orientação do Professor Nairam Félix de Barros.

Em março de 1999, ingressou no Curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, defendendo tese em abril de 2001.

ÍNDICE

	Página
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Briquetagem.....	4
2.1.1. Definição e histórico.....	4
2.2. Carbonização da madeira e obtenção do alcatrão.....	6
2.3. Fracionamento do alcatrão vegetal.....	7
2.4. Briquetagem de carvão vegetal.....	8
2.5. Aglomerantes e lubrificantes.....	9
2.5.1. Aglomerantes do tipo matriz.....	9
2.5.2. Aglomerantes do tipo filme.....	10
2.5.3. Aglomerantes químicos.....	10
2.6. Equipamentos utilizados.....	11
2.7. Fatores que influenciam a briquetagem.....	13
2.7.1. Tamanho das partículas.....	13
2.7.2. Teor de umidade das partículas.....	13
2.7.3. Efeito do agente ligante.....	13
2.8. Qualidade e uso dos briquetes.....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1. Carbonização da madeira.....	18
3.2. Mistura carvão e piche.....	18
3.3. Obtenção e destilação do alcatrão.....	18
3.4. Confecção dos briquetes.....	19
3.5. Pressão de compactação dos briquetes.....	20
3.6. Tratamento térmico dos briquetes.....	21
3.7. Caracterização dos briquetes.....	24

	Página
3.7.1. Carga de ruptura.....	24
3.7.2. Densidade relativa aparente.....	24
3.7.3. Densidade verdadeira.....	24
3.7.4. Análise química imediata.....	24
3.7.5. Porosidade.....	24
3.7.6. Poder calorífico.....	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4.1. Teor de matérias voláteis.....	26
4.2. Teor de carbono fixo.....	29
4.3. Densidade relativa aparente.....	33
4.4. Densidade verdadeira.....	36
4.5. Porosidade.....	38
4.6. Carga de ruptura.....	42
4.7. Poder calorífico.....	47
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
APÊNDICE.....	57

RESUMO

MIRANDA, Adalberto, M.S. Universidade Federal de Viçosa, abril de 2001.
Avaliação de coque pré-moldado produzido com finos de carvão e piche de eucalipto. Orientador: Alexandre Santos Pimenta. Conselheiros: Benedito Rocha Vital e Ricardo Marius Della Lucia.

O presente trabalho teve como objetivo produzir briquetes de carvão vegetal utilizando como aglutinantes diferentes tipos de piches de madeira e, posteriormente, avaliar o efeito desses aglutinantes, da temperatura final de coqueificação, da granulometria e da proporção de piche utilizada na mistura sobre a qualidade dos briquetes. Os seguintes parâmetros foram utilizados para a produção dos briquetes: quatro tipos de piches, duas granulometrias, duas proporções, duas temperaturas finais de coqueificação dos briquetes e uma pressão de compactação. A avaliação da qualidade dos briquetes foi feita por meio de análise química imediata, determinando-se os teores de matérias voláteis, cinzas e carbono fixo, as propriedades físico-mecânicas, densidade aparente, densidade verdadeira, porosidade, carga de ruptura e poder calorífico. Os resultados mostraram que os diferentes tipos de piches utilizados como aglutinantes apresentaram diferenças significativas entre si, em função do tratamento, mas todos apresentaram condições de ser utilizados como aglutinantes. A temperatura final de coqueificação foi o parâmetro mais importante na produção de briquetes, visto que influenciou significativamente algumas propriedades, como matérias voláteis, carbono fixo e poder calorífico. Os briquetes produzidos apresentaram baixos teores de matérias voláteis e cinzas, alto teor de carbono fixo, densidades aparente e verdadeira elevadas, cargas de ruptura superiores à do carvão vegetal e poder calorífico elevado.

ABSTRACT

MIRANDA, Adalberto, M.S. Universidade Federal de Viçosa, April, 2001.
Evaluation of pre-molded coke produced from charcoal and eucalyptus tar. Adviser: Alexandre Santos Pimenta. Committee Members: Benedito Rocha Vital and Ricardo Marius Della Lucia.

The aim of this work was producing charcoal briquettes using different types of wood tar as agglutinants, and evaluating the effect of tar type, final temperature of coking, granulometry and proportion of tar used in the mixture on quality of briquettes. The parameters used to produce the briquettes were: four types of tar, two granulometries, two proportions, two final temperatures of briquette coking and one compactation pressure. Their quality evaluation was made by an immediate chemical analysis, to determine the rate of volatile matters, ashes and fixed carbon, physical-mechanical properties, true and apparent densities, porosity, rupture load and heat capacity. The results showed that the different types of tar used as agglutinants were significantly different from each other due to the treatment, though all of them had presented conditions to be used as agglutinants. The final temperature of briquette coking was the most important parameter in the production, influencing significantly on properties like volatile matters, fixed carbon and heat capacity. The produced briquettes showed low rate of volatile matters and ash, high rate of fixed carbon, high true and apparent densities, rupture load higher than that of charcoal and high heat capacity.

1. INTRODUÇÃO

Os combustíveis sólidos sempre foram uma fonte energética de grande importância para a humanidade. Desde os períodos pré-históricos a lenha é utilizada pelo homem como fonte de energia. Somente com o advento da Revolução Industrial, no século XVIII, o carvão vegetal e mineral começaram a ser utilizados em grande escala, aliados, posteriormente, a outras formas de energia que seriam consumidas em grandes proporções, como os derivados de petróleo, a energia hidráulica e a nuclear (MARTINS, 1980).

Dentre os combustíveis sólidos renováveis, o carvão vegetal ocupa lugar de destaque entre os principais insumos energéticos utilizados no país. O Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal, produzindo, segundo o Balanço Energético Nacional de 1999, 9 milhões de ton.ano⁻¹. O setor industrial, principalmente o segmento siderúrgico, é responsável por mais de 80% do consumo nacional (FONTES et al, 1987).

Entretanto, o carvão vegetal, apesar de ser um combustível de grande aplicabilidade, apresenta algumas propriedades desfavoráveis à sua utilização no setor siderúrgico, tais como baixa densidade aparente, friabilidade e desuniformidade granulométrica, o que, em certos casos, pode restringir sua utilização. Devido a essas propriedades, o carvão vegetal gera, nas fases de produção, transporte e peneiramento nas indústrias siderúrgicas, elevada quantidade de finos, que podem chegar a 25% da produção total.

Uma melhor forma de aproveitamento do carvão vegetal, sem passar por essas etapas geradoras de finos, seria a sua briquetagem, utilizando como aglutinante o alcatrão de madeira desidratado (piche), que é um resíduo produzido durante a carbonização da madeira.

A coqueificação ou briquetagem do carvão vegetal é um processo que envolve balanceamento granulométrico, mistura proporcional de aglutinante e carvão, compactação e secagem, tornando o produto final um combustível de maior densidade e homogeneidade, granulometria uniforme, maior resistência mecânica e baixa geração de finos, com a vantagem de manter e até melhorar as características energéticas do carvão vegetal e facilitar seu manuseio, estocagem e transporte.

O objetivo geral deste trabalho foi produzir coques pré-moldados ou briquetes de carvão vegetal, utilizando como aglutinantes diferentes tipos de piches obtidos do alcatrão de madeira, e, posteriormente, avaliar o efeito dos tipos de piches, das temperaturas finais de coqueificação, das granulometrias e das proporções carvão:piche nas propriedades físico-químicas dos briquetes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os resíduos agroflorestais apresentam grande potencial de uso para a geração de energia, devido principalmente aos grandes volumes disponíveis. Entretanto, seu uso como combustível apresenta o inconveniente da baixa eficiência energética, sendo necessário, na maioria dos casos, a utilização de processos industriais para corrigir algumas propriedades indesejáveis como baixa densidade, alta umidade e baixo poder calorífico.

O carvão vegetal, em decorrência de sua alta friabilidade, gera elevada quantidade de finos, que não é utilizada pela indústria siderúrgica, principalmente por ser um resíduo que apresenta desuniformidade granulométrica, alta porcentagem de cinzas e impurezas. Em virtude desses problemas, uma alternativa para sua utilização como energético é o seu melhoramento através de técnicas industriais como a briquetagem. O interesse nesse processo, utilizando resíduos como o fino de carvão vegetal e o alcatrão, está no fato de eles serem abundantes e possuírem baixo preço de comercialização.

Através do processo de briquetagem do carvão vegetal, técnica que envolve balanceamento granulométrico, mistura proporcional de aglutinante, compactação e secagem, consegue-se o aproveitamento dos finos de carvão na forma de um combustível de melhor densidade, mais homogêneo, granulometria uniforme, maior resistência mecânica e baixa geração de finos. Os briquetes produzidos mantêm as características energéticas do carvão, facilitando o manuseio, a estocagem e a utilização e permitindo o seu transporte a maiores distâncias (FONTES et al., 1987).

2.1. Briquetagem

2.1.1. Definição e histórico

Define-se briquetagem como um processo no qual pequenas partículas de material sólido são prensadas para formar blocos de forma definida e maior tamanho. Por meio desse processo, subprodutos de beneficiamento agroflorestal e finos de carvão convertem-se em briquetes, que é um material de maior valor comercial (ANTUNES, 1982).

A fabricação comercial mecanizada de briquetes de carvão mineral teve início na França, em 1842. Até a Segunda Guerra Mundial, foram produzidas grandes quantidades em diversos países da Europa, sendo os briquetes utilizados em fornos e caldeiras. Em 1915, foi realizada a primeira briquetagem de carvão vegetal, em uma fábrica do Tennessee (EUA). Essa fábrica produzia metanol por meio da destilação destrutiva da madeira. Os finos de carvão vegetal, subprodutos do processo, eram briquetados usando alcatrão de madeira como ligante (ANTUNES, 1982).

Outra usina de briquetagem foi construída muitos anos depois pela Ford Motors Co. em Michigan (EUA), onde a matéria-prima era constituída de aparas de madeira usada para a produção de carrocerias de caminhões. As aparas eram carbonizadas, e o carvão era moído e briquetado, utilizando como ligante 5% de amido e 30% de água (ANTUNES, 1982). Atualmente, a produção de briquetes de finos de carvão mineral e vegetal e resíduos agroflorestais ocorre em grande escala nos EUA, em países da Europa e Sudeste Asiático.

Segundo Borba, citado por FONTES et al. (1987), uma das primeiras experiências em briquetagem de carvão vegetal em escala industrial realizadas no Brasil aconteceu em 1977 na Usiminas, com resultados satisfatórios. A partir de 1979, as pesquisas foram direcionadas para a briquetagem de carvão de babaçu, visando à obtenção de briquetes com resistência a quente compatível com seu uso em cubilôs e altos fornos de pequeno porte. Como aglutinantes, eram utilizados a dextrina de milho – produto intermediário formado na hidrólise do amido –, piche com baixo ponto de amolecimento (entre 36 e 40°C), melão e emulsão asfáltica. Dessas experiências, concluiu-se que os briquetes apresentavam boa resistência mecânica a frio e a temperaturas elevadas quando

a dextrina de milho e o piche de carvão mineral eram utilizados como aglutinantes.

Em 1979, MOTTER realizou na Mannesmann S.A. experiências de briquetagem de carvão vegetal, inicialmente em escala de laboratório, obtendo melhor resultado quando o melaço de cana foi utilizado como aglutinante. Posteriormente, a produção foi ampliada para $1,5 \text{ t h}^{-1}$ de briquete, com o uso de melaço "in natura", porém os briquetes apresentavam alta higroscopicidade, sendo também requerida grande quantidade de melaço (cerca de 30%). Visando à melhoria dos briquetes, foi realizado um tratamento térmico do aglomerado para diminuir sua participação na mistura e, conseqüentemente, minimizar a higroscopicidade do briquete. A moimha utilizada foi também parcialmente desvolatilizada em forno rotativo a 700°C . Foram testadas, em fornos de redução da Mannesmann S.A., 340 toneladas de diferentes tipos de briquetes, conseguindo-se substituir até 10% do carbono fixo proveniente do carvão vegetal, sem alterar muito a marcha do forno. No forno elétrico de redução, substituiu-se até 20% do carbono fixo, tendo o forno aceitado bem a alteração de carga, com marcha bastante regular. Apesar dos resultados operacionais satisfatórios, o programa foi abandonado por adicionar custos à moimha, e porque as vantagens operacionais apresentadas não justificavam a elevação do custo.

No Brasil, atualmente, são conhecidas duas marcas comerciais de briquetes para uso doméstico, Brasa Gold e Ecoway, que utilizam carvão vegetal e amido como aglutinantes. Esses briquetes foram analisados no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira da UFV, sendo os resultados apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Comparação entre as propriedades físicas e químicas de briquetes e de carvão vegetal

Parâmetros	Análise química imediata (%B.S.)		
	Carvão de eucalipto	Briquetes ECOWAY	Briquetes BRASA GOLD
Umidade (%)	7,0	7,9	3,2
Carbono fixo (%)	78,4	66,0	68,8
Matérias voláteis (%)	20,8	24,4	29,1
Cinzas (%)	0,8	9,6	2,1
Poder calorífico(kcal kg ⁻¹)	5600	6095	6567
Dens. aparente (kg m ⁻³)	250	930	710

Fonte: Análise química imediata realizada no LPEM/DEF/UFV.

2.2. Carbonização da madeira e obtenção do alcatrão

O processo de destilação da madeira é conhecido desde a antigüidade. Os egípcios conheciam o preparo do carvão vegetal e utilizavam os produtos da destilação, tais como alcatrão e vinagre, para embalsamar cadáveres (YANTORNO, 1933).

Ainda hoje o carvão vegetal é produzido de forma rudimentar em alguns países, utilizando processos nos quais a madeira é carbonizada dentro de buracos ou em pilhas cobertas de terra. No Brasil, ainda é comum a utilização dos tradicionais fornos de alvenaria, nos quais ocorre perda dos produtos gasosos durante a carbonização da madeira. Essa perda de produtos voláteis equivale a cerca de 70% da madeira enfiada em massa e 50% de sua capacidade energética, segundo SIQUEIRA e SCHARLE (1982). Entretanto, utilizando fornos de alvenaria ou metálicos, adaptados com recuperadores de fumaça, parte dos gases que seriam liberados para a atmosfera podem ser condensados, dando origem ao licor pirolenhoso, composto de água, ácido acético e alcatrão solúvel e insolúvel (JANKOWSKY & LEPAGE, 1986; LEPAGE, 1986).

Segundo OLIVEIRA et al. (1982), o alcatrão deixa o leito da reação sob a forma de microgotículas, que são arrastadas pela massa gasosa. Parte dessa massa gasosa se liquefaz após passar por condensadores ou recuperadores,

dando origem ao licor pirolenhoso que, posteriormente, subdivide-se em duas frações: o ácido pirolenhoso, constituído principalmente por compostos resultantes da degradação térmica dos carboidratos da madeira, e o alcatrão insolúvel, derivado principalmente da lignina, apresentando carácter fenólico (WENZL, 1970; ALMEIDA, 1982; MATOS et al., 1982).

Dependendo da tecnologia de carbonização e recuperação dos gases, pode-se obter um rendimento em alcatrão de 300 kg por tonelada de carvão produzido em sistemas de carbonização contínua, e de 70 a 140 kg por tonelada de carvão em sistemas utilizando fornos de alvenaria. Considerando a produção nacional de carvão vegetal, existe uma infra-estrutura para a recuperação do alcatrão, pelas usinas integradas, de 140.000-800.000 t ano⁻¹. Isso representa, teoricamente, 70.000 a 400.000 t ano⁻¹ de piche de alcatrão de eucalipto. Esses números são muito expressivos, se considerarmos que todo o parque siderúrgico brasileiro a coque tem capacidade instalada de produção de piche de alcatrão mineral de 160.000 t ano⁻¹ (PASA, 1994).

Além das variações em rendimento, o alcatrão também apresenta variações em sua composição química, o que foi comprovado por SIQUEIRA e SCHARLE (1982) por meio de análise química elementar. Segundo esses autores, tais variações podem estar associadas a umidade, qualidade e espécie de madeira, processo e velocidade de carbonização e tipos de recuperadores.

2.3. Fracionamento do alcatrão vegetal

A destilação é um processo clássico de separação muito usado no fracionamento de materiais orgânicos como petróleo, alcatrão mineral e misturas de solventes orgânicos (PASA, 1994). Os estudos de fracionamento do alcatrão vegetal têm sido realizados através de destilação fracionada e extração com solventes. Contudo, a destilação tem sido mais utilizada em processos industriais, principalmente pelo menor custo, nas primeiras etapas de separação do alcatrão em frações: aquosa, óleo bruto e piche (PASA, 1994).

O fracionamento do alcatrão, além de promover a separação de frações de interesse comercial, também é destinado ao ajuste de certas propriedades físico-químicas como ponto de amolecimento, teor de carbono residual e

viscosidade, para que o alcatrão se enquadre nas especificações exigidas pelo segmento industrial que o absorverá.

Os alcatrões vegetais sofrem polimerização quando submetidos a tratamentos térmicos na faixa de temperatura entre 150-300°C, durante o processo de destilação. Os alcatrões tratados possuem maior estabilidade térmica quando comparados com alcatrões crus, sendo possível aumentar em até 50% seu rendimento em resíduo carbonoso após a polimerização, confirmando a possibilidade de sua utilização como precursor de materiais carbonosos, como a resina fenólica (PASA, 1994).

2.4. Briquetagem de carvão vegetal

De acordo com SALEME (s.d.), a maior vantagem que o briquete apresenta está na possibilidade de ser controlada a porosidade e, com tratamentos térmicos posteriores, obterem-se propriedades mecânicas similares às do coque metalúrgico, além de sua maior reatividade, teores reduzidos de fósforo e enxofre, baixa proporção de cinzas, etc. Além disso, o briquete pode ser mais denso que o carvão vegetal, o que permitirá a utilização mais adequada do alto forno. O processo de briquetagem para finos de carvão vegetal normalmente é realizado com adição de aglutinantes e prensagem a frio.

Segundo MORO (1987), uma metodologia típica para a briquetagem de finos de carvão deve passar pelas seguintes etapas:

- Moagem do carvão - a moagem é necessária para evitar partículas muito grandes que prejudiquem a ação dos materiais ligantes. Normalmente, são utilizados moinhos de martelo, sendo a faixa granulométrica ideal geralmente abaixo de 3 mm.
- Mistura com o ligante - o ligante é um material com propriedades aglutinantes que tem a função de unir as partículas do carvão. A escolha do tipo e da quantidade de ligante é o ponto mais crítico na produção de briquetes, sendo a etapa que mais influencia no custo do processo.
- Prensagem - a briquetagem propriamente dita resulta da aplicação de pressão por meio de prensas sobre a massa de carvão e o ligante, fazendo com que o briquete adquira resistência e formato geométrico

definido. Deve ser realizado aquecimento simultâneo de acordo com o ligante utilizado.

- Secagem - alguns ligantes são adicionados com água ao briquete, proporcionando alta umidade ao produto final. Por esse motivo, deve ser realizado um processo de secagem, que geralmente é conseguido com a passagem de ar quente e seco.
- Estocagem e embalagem - os briquetes são armazenados em silos de estocagem dimensionados, a fim de manter um estoque intermediário entre a produção e a distribuição. Em seguida, são empacotados para consumo.

2.5. Aglomerantes e lubrificantes

Messman e Tibbetts, citados por QUIRINO (1991), afirmam que os aglomerantes são materiais essenciais para auxiliar economicamente a briquetagem. Teoricamente, alguns materiais sólidos podem ser compactados sem aglomerantes, se altas pressões forem aplicadas. O carvão vegetal é tradicionalmente compactado com aglomerante. Segundo SALEME (s.d.), o aglomerante deve comportar-se como um simples adesivo que ligue duas superfícies inertes, promovendo a soldagem das partículas.

Segundo Pietsch, citado por QUIRINO (1991), os aglomerantes podem ser de três tipos:

2.5.1. Aglomerantes do tipo matriz

Este tipo de aglomerante envolve completamente as partículas, formando uma matriz contínua. Quantidades razoáveis são requeridas do aglutinante, já que geralmente essas substâncias apresentam baixa resistência, sendo esta dependente de uma fase contínua em volta das partículas individuais. São exemplos desses aglomerantes: alcatrão mineral, alcatrão de madeira, asfalto ou piche de petróleo.

2.5.2. Aglomerantes do tipo filme

São geralmente usados como soluções ou dispersões. A água é o solvente mais comum. O briquete confeccionado com este tipo de aglomerante, após a secagem, adquire alta resistência. Alguns exemplos desses aglomerantes são: silicato de sódio, água, amido, melão e lignosulfatos.

2.5.3. Aglomerantes químicos

São aqueles cuja adesão depende de reações químicas efetivas dos componentes do aglomerado entre si, ou entre o aglomerante e o material que está sendo aglomerado. Os aglomerantes químicos podem ser do tipo matriz ou filme, dependendo principalmente da resistência e das características dos produtos das reações. Como exemplos, temos Ca(OH)_2 + melão, Ca(OH)_2 + CO_2 , MgO + Fe_3O_4 e silicato de sódio + CO_2 .

Segundo Kural, citado por BEZZON (1994), os ligantes mais utilizados no processo de briquetagem são:

Piche - fração mais pesada resultante da destilação do alcatrão mineral ou vegetal, é uma matéria-prima muito utilizada na briquetagem. As principais características do piche são ponto de amolecimento, conteúdo de carbono fixo, conteúdo de voláteis, poder calorífico, umidade e cinzas. Deve-se ressaltar também que o alcatrão mineral (matéria-prima para a produção de piche) também é usado em plantas de briquetagem.

Betume (asfalto) - é uma fração pesada resultante da destilação do petróleo. Tem boas propriedades ligantes, sendo à prova de intempéries os briquetes produzidos, porém com a desvantagem de aumentar um pouco a quantidade de cinzas. Tolerância maior umidade que o piche. Os principais testes de caracterização são o ponto de amolecimento, penetração e ductilidade. Os principais problemas de utilização são as propriedades cancerígenas e a poluição do ar.

Licor sulfítico - é um resíduo obtido em grande quantidade quando a celulose é produzida da madeira usando processos sulfíticos. Este ligante produz briquetes com alta resistência, devido às consideráveis propriedades adesivas. As

principais desvantagens são alta concentração de enxofre, baixa resistência à água e difícil combustão.

Amido - o grande poder adesivo dos amidos faz com que sirvam como ligantes para a produção de briquetes de carvão com alta resistência. O amido pode ser adicionado ao carvão como sólido ou, mais comumente, em suspensão em uma solução aquosa. Com o emprego de amido seco, torna-se possível o uso de briquetes com matéria-prima possuindo alta umidade, já que são utilizados aproximadamente 8% de água para a produção da suspensão de amido. A desvantagem deste ligante é seu alto preço, o que limita sua utilização industrial.

Cal - a cal possui grande aplicação, por ser relativamente barata e abundante. A produção de briquetes com cal envolve conversão do hidróxido de cálcio (CaOH) e dióxido de carbono (CO₂) a carbonato de cálcio (CaCO₃), enrijecendo os briquetes. Os briquetes podem ser usados em aquecimento doméstico e caldeiras industriais.

2.6. Equipamentos utilizados

O equipamento principal em uma unidade de briquetagem é a prensa, que tem a função de realizar a união do carvão com o ligante pela ação de esforços entre eles, possibilitando que a função aglomerante do ligante ocorra. Com isso o briquete adquire resistência mecânica e formato geométrico definido, o que, na maioria dos casos, é acompanhado de aumento na densidade em relação ao material inicial.

Segundo Kural, citado por BEZZON (1994), os principais tipos de prensas utilizadas são as prensas de extrusão e as prensas de rolos descritas abaixo:

- Prensas de extrusão - possuem uma matriz com molde originalmente feito para dar forma ao briquete. Trabalham com princípio de pistão-matriz, em que a força passa ao pistão vindo do virabrequim. O pistão serve como ferramenta de pressão, com a função de pressionar o briquete no canal molde (matriz). A maior utilização deste tipo de prensa atualmente ocorre na Alemanha, onde a indústria do briquete se desenvolveu durante a 2ª Guerra Mundial devido à escassez de combustível, quando houve a necessidade de procurar novas alternativas para o problema energético do país.

- Prensa de cilindros giratórios - provavelmente representa o tipo mais conhecido de prensa, sendo utilizada em países industrializados para briquetes com ligante e grande variedade de materiais. As prensas compreendem dois cilindros de diâmetros iguais girando em direções opostas, à mesma velocidade. O movimento é geralmente efetivado por volantes de engrenagem com absoluto sincronismo. As superfícies dos cilindros possuem vários copos com o formato dos briquetes e o material é carregado por uma pá de distribuição e um alimentador ou uma rosca de alimentação. A quantidade de material deve ser dimensionada de forma que, com a rotação dos cilindros, haja uma pressão, que produzirá os briquetes. As fôrmas dos briquetes neste processo podem ser bastante variadas e dependem do tipo de cavidade nos cilindros giratórios. A mais indicada é a de uma pequena almofada quadrada com os cantos arredondados ou ovalada, que evita quebras em cantos vivos, gera baixo índice de vazios na estocagem e permite a fácil manutenção dos cilindros. Os produtores de briquetes que mais utilizam este equipamento são os EUA, principalmente nos estados da Carolina do Norte e Carolina do Sul, visando basicamente ao mercado comercial e doméstico (ANTUNES, 1982).

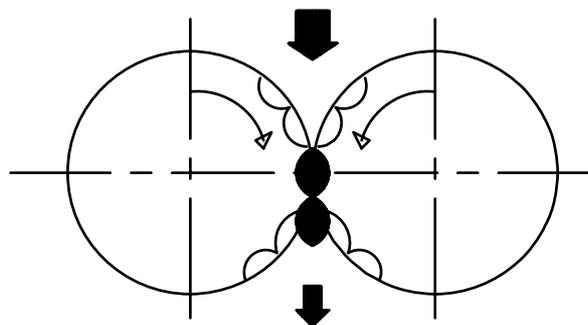


Figura 1. Esquema da prensa de cilindros giratórios com iguais diâmetros.

Para uma indústria de briquetagem, além da prensa há uma série de outros equipamentos importantes como secadores de matéria-prima, secadores para o briquete, misturadores, correias transportadoras, sistemas de suprimento

de carvão e carregamento do produto final, sistemas de moagem e pátio de armazenamento da matéria-prima e dos briquetes produzidos.

2.7. Fatores que influenciam a briquetagem

Existem muitos fatores que afetam o processo de briquetagem, interferindo também na qualidade e nas propriedades do produto final. Esses fatores podem ocorrer devido às características próprias do material utilizado, como tamanho das partículas, teor de umidade, densidade do material e aglutinante. Outros fatores que afetam a briquetagem são as variáveis do processo, tais como pressão e temperatura.

2.7.1. Tamanho das partículas

O tamanho das partículas é um parâmetro importante no processo de briquetagem, pois afeta diretamente as propriedades do produto final. Segundo Koullas et al., citados por BHATTACHARYA et al. (1989), a redução no tamanho das partículas aumenta a área de contato entre as partículas, aumentando a união entre elas. A redução no tamanho das partículas também aumenta a densidade do produto final, mas, em contrapartida, aumenta o consumo de aglutinante.

2.7.2. Teor de umidade das partículas

O teor de umidade do material a ser densificado é fator importante na briquetagem de biomassa. Contudo, para a briquetagem de carvão vegetal sua influência não é tão expressiva, uma vez que o teor de umidade do carvão vegetal é baixo, em decorrência da perda de água durante o processo de carbonização.

2.7.3. Efeito do agente ligante

Segundo ANTUNES (1982), o ponto considerado mais crítico na manufatura dos briquetes de carvão vegetal é a adição do agente ligante. Praticamente qualquer adesivo pode ser usado. A seleção é feita em função de

custo e do uso final que se pretende para o briquete. Os ligantes mais utilizados são: amido, melação de cana, cimento, licor sulfítico, piche de petróleo ou vegetal e alcatrão vegetal ou mineral.

2.8. Qualidade e uso dos briquetes

A idéia de briquetar finos de carvão vegetal no Brasil teve início com o desenvolvimento do setor industrial no país e com a expansão da siderurgia a carvão vegetal. Na siderurgia, durante a seleção granulométrica do carvão vegetal, antes da utilização nos fornos de redução, um volume considerável de finos de carvão é produzido. Além da baixa granulometria, esses finos possuem restrições qualitativas pelas impurezas e pela própria natureza do material de origem, carvões frágeis e de cascas, o que, no entanto, não inviabiliza sua utilização na briquetagem, mas apenas constituem mais uma fonte de variabilidade na qualidade do briquete (IBDF, 1985). BROSCH e FURUNO (1968) concluíram que a separação hidrogravimétrica permite apreciável enriquecimento dos finos de carvão em carbono, reduzindo a porcentagem de cinzas. Oliveira et al., citados por QUIRINO (1991), observaram a necessidade de adequar a distribuição granulométrica dos finos de carvão e a importância do tratamento térmico durante e após a prensagem, o que influencia a qualidade do briquete. Esse trabalho, no entanto, pretendia estudar técnicas experimentais para desenvolvimento de testes futuros. SILVEIRA e CAMPOS (1977) mostraram sua preocupação na utilização dos finos. Esses pesquisadores discutiram uma série de alternativas, das quais a única que vinha sendo aplicada na época era a sinterização de minério de ferro. Uma das opções mencionadas seria a de compactação da moinha para produção de briquetes. Ressaltaram que a uniformidade granulométrica do briquete permitiria uma distribuição do fluxo gasoso mais uniforme através da carga, e que a maior densidade do briquete conduziria a um menor consumo específico de carbono. O briquete deveria ter, entretanto, uma resistência, quando aquecido e sobre pressão, equivalente às condições de reação de processo no alto-forno.

MOTTER (1979), em seus trabalhos de briquetagem de finos de carvão vegetal, chegou às seguintes conclusões:

- O melaço torna o briquete higroscópico, causando problemas na estocagem e necessitando de tratamento térmico;
- A desvolatilização da moinha antes da briquetagem diminui o consumo de ligante na produção de briquetes; e
- O briquete de maior resistência à compressão, de maior teor de carbono fixo e menos higroscópico foi conseguido com melaço em pó; no entanto, foi o que apresentou menor reatividade.

Foram testados por esse autor, em diferentes fornos de redução, 340 toneladas de briquetes, conseguindo-se a substituição de até 20% de carbono fixo da carga do forno elétrico de redução, sem alterar a marcha do mesmo.

Essa porcentagem de substituição é considerável, levando em conta que a geração de finos está próxima dessa proporção em relação ao carvão vegetal. Por meio de seus ensaios, MOTTER (1979) estabeleceu que o briquete siderúrgico deveria satisfazer os seguintes requisitos:

- Teor de cinzas abaixo de 12%;
- Matérias voláteis abaixo de 15%;
- Carbono fixo acima de 73%;
- Enxofre abaixo de 0,5%; e,
- Resistência mecânica à compressão superior de 70 kg cm⁻².

A FAO, segundo QUIRINO (1991), comenta que briquetes aglutinados com amido não são adequados para uso industrial. Os briquetes utilizando alcatrão ou piche como aglomerante e posteriormente coqueificados constituiriam o tipo ideal para fornos de redução e fundição, pela sua maior resistência a quente. No entanto, esses briquetes possuem custo mais elevado de produção. Esse mesmo autor afirma que, objetivando melhorar a combustão e algumas características físico-químicas, é possível adicionar materiais na composição dos briquetes, tais como ceras, nitrato de sódio, argila e sílica, que influenciam a combustão e diminuem o custo, mas que, por outro lado, alteram também a qualidade do briquete. MESSMAN e TIBBETTS (1977) afirmam também que é possível adicionar produtos combinados com os aglomerantes, com o objetivo de facilitar a ignição, prolongar a queima, aumentar a densidade e a resistência do briquete.

KUMAREK RESEARCH (s.d.) ressalta também que os briquetes podem ser avaliados quanto a sua resistência à absorção de umidade e a soluções

salinas, podendo também ser quantificada sua reatividade. Entretanto, testes que avaliam as propriedades mecânicas são usualmente os mais empregados. A resistência à compressão determina a capacidade de empilhamento na estocagem, e o teste de tamboramento ou índice de quebra e abrasão determina a resistência à abrasão provocada durante o transporte e manuseio natural dos briquetes. Todos esses testes medem certos aspectos de qualidade dos briquetes, mas os resultados devem ser interpretados com cuidado, já que são influenciados pelo tamanho e pela forma dos briquetes, bem como pelas propriedades dos materiais a partir dos quais são produzidos. Para muitos propósitos, a densidade é o parâmetro de qualidade mais importante.

No Brasil, o interesse na briquetagem sempre esteve voltado para o aproveitamento dos finos de carvão vegetal oriundos da siderurgia, conduzindo a maioria das pesquisas para o desenvolvimento de briquetes para usos nessa atividade.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este experimento foi desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, com o objetivo de produzir briquetes utilizando o carvão vegetal moído e diferentes tipos de piche vegetal como aglutinantes.

As análises dos briquetes foram realizadas de acordo com as normas da American Society for Testing and Materials (ASTM) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

O experimento foi executado em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial $2 \times 2 \times 2 \times 4$, com dois níveis de temperaturas (400 e 500°C), duas proporções de carvão:piche em massa (1:1 e 1:0,8), duas granulometrias (todo o material que passou pelas malhas de 40 e 60 mesh) e quatro tipos de piche (LPEM, BIO2, BIO3 E MANN), utilizando quatro repetições para a análise química imediata e duas para a análise físico-mecânica dos briquetes. Os 32 tratamentos foram realizados utilizando uma pressão de compactação de 260 kgf cm⁻² aplicada por 1 (um) minuto.

Os resultados dos teores de carbono fixo (CF), matérias voláteis (MV), densidade relativa aparente (DA), densidade verdadeira (DV), porosidade (PO) e carga de ruptura (CR) foram submetidos a análise de variância e teste “F” ($p < 0,01$). A interação entre os fatores piche (P) x granulometria (G) x proporção (R) x temperatura (T) foi desdobrada independentemente de sua significância.

Os efeitos da temperatura, granulometria e proporção foram comparados entre si pelo teste “F” ($p < 0,01$). A comparação entre os piches foi feita por meio do teste de Tukey ($p < 0,05$).

3.1. Carbonização da madeira

O carvão utilizado neste trabalho foi obtido de toras de *Eucalyptus grandis* com idade entre 7 e 8 anos e secas à temperatura ambiente. As carbonizações foram realizadas em forno *container* com capacidade aproximada de um metro cúbico de madeira, sob condições controladas, atingindo temperatura final de 500°C e totalizando um ciclo de carbonização de 10 horas.

3.2. Mistura carvão e piche

O carvão vegetal foi quebrado em pedaços menores, para posteriormente ser triturado em moinho de martelo. O carvão moído passou por avaliação granulométrica, realizada por meio de uma seqüência de peneiras com malhas de 14, 20, 40 e 60 mesh. Após a obtenção de várias granulometrias, foram realizados testes preliminares, combinando-se todas as granulometrias obtidas com as seguintes proporções em massa de carvão:piche: 1:0,2; 1:0,4; 1:0,6; 1:0,8; e 1:1. Foram utilizados os quatro tipos de piche. Após avaliada a integridade dos briquetes, optou-se então pela utilização das granulometrias que passaram pelas malhas das peneiras de 40 e 60 mesh, que serão identificadas nas tabelas por < 40 e < 60 mesh, em combinação com as proporções de carvão:piche de 1:0,8 e 1:1, em razão de as granulometrias maiores e as proporções menores de piche terem apresentado problemas na confecção dos briquetes, os quais apresentaram trincamentos durante a desmoldagem.

3.3. Obtenção e destilação do alcatrão

Foram utilizados quatro tipos de alcatrões na confecção dos briquetes, com o objetivo de comparar seus resultados mediante as análises química imediata e físico-mecânica e os tratamentos térmicos.

Os alcatrões utilizados foram os seguintes:

- LPEM - alcatrão produzido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, obtido por meio de carbonização em fornos de alvenaria.

- BIO2 e BIO3 - alcatrões fornecidos pela empresa BIOCARBO Indústria e Comércio LTDA.
- MANN - alcatrão produzido pela Vallourec & Mannesmann Florestal por meio de carbonização em fornos de alvenaria com capacidade para 200 estéreos de lenha.

Foram realizados testes preliminares de destilação nos alcatrões LPEM e MANN, utilizando balões de vidro com capacidade para 1,5 litros, manta aquecedora e um condensador “Liebig” de 40 cm de comprimento refrigerado com água. Durante as destilações dos alcatrões as frações aquosas e oleosas foram descartadas, enquanto o alcatrão desidratado (piche residual) foi recolhido e armazenado, para ser utilizado posteriormente como aglutinante na confecção dos briquetes. Os alcatrões fornecidos pela BIOCARBO não foram destilados durante o trabalho de pesquisa, pois já haviam passado por esse processo, durante o qual a empresa retirou as frações de seu interesse.

3.4. Confecção dos briquetes

A mistura carvão:piche foi obtida em um misturador manual, utilizando 60 gramas da mistura para confeccionar cada briquete.

A prensagem dos briquetes foi feita em uma prensa do tipo SCHWING SIWA com capacidade para 15 toneladas e utilizando uma fôrma cilíndrica de aço medindo 30 cm de comprimento e 5,42 cm de diâmetro, conforme mostrado na Figura 2.



Figura 2. Prensa (a) e fôrma cilíndrica (b), utilizadas na confecção dos briquetes.

3.5. Pressão de compactação dos briquetes

A carga de compactação utilizada na confecção dos briquetes foi de 6,0 toneladas, aplicada durante 1 (um) minuto. Optou-se por essa carga tomando como base os resultados obtidos por MELO (2000), que utilizou várias cargas, incluindo essa, em condições semelhantes de trabalho. A carga foi aplicada sobre a parte superior e distribuída por toda a superfície dos briquetes, os quais apresentavam 5,42 cm de diâmetro. Para calcular a área de cada briquete, aplicou-se a fórmula abaixo:

$$A_{\text{briquete}} = \pi * D^2/4$$

$$A_{\text{briquete}} = 3,1416 * (5,42)^2/4$$

$$A_{\text{briquete}} = 23,072 \text{ cm}^2$$

Portanto, dividindo-se a carga utilizada, em toneladas, pela área de cada briquete, tem-se a força aplicada em cm^2 dos briquetes, ou seja, para carga de 6,0 toneladas obtém-se pressão de 260 kgf cm^{-2} .

3.6. Tratamento térmico dos briquetes

Foram realizados dois tratamentos térmicos (coqueificação) com temperaturas finais de 400 e 500°C, com o objetivo de avaliar a influência da temperatura final nas propriedades dos briquetes produzidos. Os tratamentos térmicos foram realizados acondicionando-se os briquetes em um cadinho metálico (Figura 3) dotado de quatro divisões internas, que, após ser hermeticamente fechado, foi submetido a temperaturas crescentes em um forno elétrico (Figura 4), de acordo com as marchas apresentadas nos Quadros 2 e 3.



Figura 3. Cadinho metálico utilizado para acondicionar os briquetes durante o tratamento térmico.

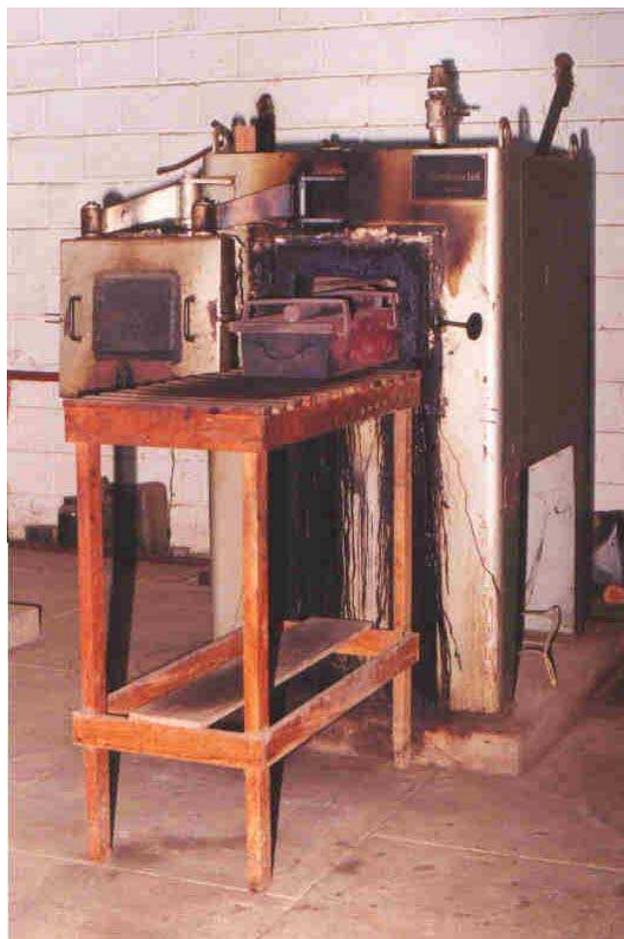


Figura 4. Forno elétrico utilizado nos tratamentos térmicos dos briquetes.

Quadro 2. Marcha do tratamento térmico com temperatura final de 400°C

Etapas	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
1	150	30
2	250	30
3	350	60
4	400	60

Quadro 3. Marcha do tratamento térmico com temperatura final de 500°C

Etapas	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
1	150	30
2	250	60
3	350	30
4	450	60
5	500	30

Após os processos de prensagem e tratamento térmico, os briquetes adquirem formato uniforme, perdendo massa devido à expulsão das matérias voláteis. O aspecto final dos briquetes é apresentado na Figura 5.



Figura 5. Briquetes produzidos, apresentando formato uniforme.

3.7. Caracterização dos briquetes

3.7.1. Carga de ruptura

A carga de ruptura dos briquetes foi determinada a fim de se prever seu comportamento mecânico quando submetidos a determinadas cargas ou esforços. O teste para avaliação da carga de ruptura dos briquetes foi realizado no Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira, em máquina de testes universal do tipo LOSENHAUSEN.

3.7.2. Densidade relativa aparente

A densidade relativa aparente foi obtida pelo método da balança hidrostática (M 14/1974), usualmente empregada para madeiras, de acordo com o proposto pela Associação Brasileira de Celulose e Papel (ABCP). O fluido usado foi o mercúrio.

3.7.3. Densidade verdadeira

Para determinação da densidade verdadeira, utilizou-se o método do picnômetro, seguindo as normas ASTM D-167/1973 e ISO 1014. As determinações foram feitas em duplicata.

3.7.4. Análise química imediata

Foram realizadas análises químicas imediatas, determinando-se os teores de umidade, matérias voláteis, cinzas e carbono fixo (ASTMD - 1762/1964).

3.7.5. Porosidade

A porosidade em porcentagem foi obtida da relação entre as densidades aparente e verdadeira, aplicando-se a seguinte equação:

$$\text{Porosidade} = 100 - \left(\frac{\text{Densidade relativa aparente}}{\text{Densidade verdadeira}} \right) \cdot 100$$

3.7.6. Poder calorífico

Para determinação do poder calorífico superior dos briquetes, utilizou-se o método da Bomba Calorimétrica Parr, seguindo a norma NBR-2015 (ABNT, 1966).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, serão apresentados e discutidos os resultados das análises químicas imediatas (teores de voláteis, cinzas e carbono fixo) e das análises físico-mecânicas (densidade relativa aparente, densidade verdadeira, porosidade, carga de ruptura e poder calorífico) dos briquetes desenvolvidos neste trabalho de pesquisa. Os resultados obtidos foram submetidos a análise estatística para verificar o efeito dos tratamentos realizados com os briquetes. O resumo da análise de variância para todas as características dos briquetes é apresentado no Quadro 1A. A análise dos desdobramentos das interações entre temperatura, granulometria e proporção sobre as variáveis estudadas é apresentada nos Quadros 2A, 3A e 4A, respectivamente.

4.1. Teor de matérias voláteis

Os valores médios do teor de matérias voláteis para todas as granulometrias, proporções carvão:piche, tipos de piches e temperatura final de coqueificação são apresentados nos Quadros 3 e 4. De acordo com o Quadro 3, é possível observar que, para todos tratamentos, a temperatura final de coqueificação afetou significativamente os teores de matérias voláteis, segundo o teste “F” ($p < 0,01$). Esse resultado é evidente, pois pode-se observar que todos os tratamentos realizados com a temperatura final 500°C apresentaram os menores teores de matérias voláteis, ficando óbvio que o aumento da temperatura final de coqueificação promove a diminuição desses teores. Observa-se que, em todos os tratamentos, os teores de matérias voláteis diferiram significativamente entre si dependendo do tipo de piche utilizado. Serão discutidos, de agora em

diante, os resultados apresentados pelos briquetes coqueificados a 500°C, por apresentarem os menores teores de matérias voláteis. O baixo teor de matérias voláteis é necessário em um agente redutor, visto que uma grande expansão de voláteis durante o processo de redução provoca a degradação desse agente, alterando drasticamente propriedades como porosidade, diâmetro médio dos poros, densidade e carga de ruptura.

Quadro 3. Valores médios do teor de matérias voláteis (%) em relação à granulometria, à proporção, aos tipos de piches e às temperaturas de coqueificação

Granulometria (mesh)	Proporção carvão:piche	Piche	Temperatura (°C)	
			400	500
< 40	1:1	LPEM	30,14 Aa	20,82 Bb
		BIO2	31,64 Aa	18,64 Bc
		BIO3	28,11 Ab	22,41 Ba
		MANN	30,70 Aa	19,24 Bc
	1:0,8	LPEM	29,44 Abc	18,20 Bc
		BIO2	30,59 Ab	19,70 Bb
		BIO3	28,75 Ac	22,21 Ba
		MANN	33,24 Aa	20,03 Bb
< 60	1:1	LPEM	29,63 Aa	20,25 Bab
		BIO2	29,14 Aab	19,47 Bb
		BIO3	28,08 Ab	20,79 Bab
		MANN	30,39 Aa	21,52 Ba
	1:0,8	LPEM	29,00 Aa	22,59 Ba
		BIO2	29,29 Aa	19,99 Bb
		BIO3	28,72 Aa	18,91 Bb
		MANN	29,76 Aa	21,34 Ba

Sendo: LPEM - Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, BIO2 - Biocarbo tipo 2, BIO3 - Biocarbo tipo 3 e MANN - Mannesmann.

Para cada granulometria, proporção e temperatura, comparando-se os piches dentro de uma mesma coluna (letras minúsculas), médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Para cada granulometria, proporção e piche, comparando-se as temperaturas dentro de uma mesma linha (letras maiúsculas), "A" difere de "B" pelo teste F ($p < 0,01$).

Para observar o efeito das proporções e granulometrias sobre os teores de matérias voláteis dentro de cada piche, os dados foram agrupados de outra maneira, para melhor visualização (Quadro 4).

Quadro 4. Valores médios do teor de matérias voláteis (%) em relação às temperaturas de coqueificação, aos tipos de piches, à proporção e à granulometria

Temperatura (°C)	Piche	Proporção carvão:piche	Granulometria (mesh)	
			< 40	< 60
400	LPEM	1:1	30,14Aa	29,63Aa
		1:0,8	29,44Aa	29,00Aa
	BIO2	1:1	31,64Aa	29,14Ba
		1:0,8	30,59Aa	29,29Ba
	BIO3	1:1	28,11Aa	28,05Aa
		1:0,8	28,75Aa	28,72Aa
	MANN	1:1	30,70Ab	30,39Aa
		1:0,8	33,24Aa	29,76Ba
500	LPEM	1:1	20,82Aa	20,25Ab
		1:0,8	18,20Bb	22,59Aa
	BIO2	1:1	18,64Aa	19,47Aa
		1:0,8	19,70Aa	19,99Aa
	BIO3	1:1	22,41Aa	20,79Ba
		1:0,8	22,21Aa	18,91Bb
	MANN	1:1	19,24Ba	21,52Aa
		1:0,8	20,03Ba	21,34Aa

Sendo: LPEM - Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, BIO2 - Biocarbo tipo 2, BIO3 - Biocarbo tipo 3 e MANN - Mannesmann.

Para cada temperatura, piche e granulometria, comparando-se as proporções dentro de uma mesma coluna (letras minúsculas), "a" difere de "b" pelo teste F ($p < 0,01$).

Para cada temperatura, piche e proporção, comparando-se as granulometrias dentro de uma mesma linha (letras maiúsculas), "A" difere de "B" pelo teste F ($p < 0,01$).

Observou-se que, nos briquetes produzidos com o piche LPEM à temperatura de 500°C, não houve diferença significativa no teor de matérias voláteis entre briquetes com granulometria de 40 e 60 mesh na proporção de 1:1. Já para os briquetes com proporção de 1:0,8, houve diferença significativa

($p < 0,01$), sendo o tratamento que utilizou a granulometria de 40 mesh o que apresentou o menor teor de matérias voláteis (18,20%). Entre os tratamentos que utilizaram o piche BIO2 na confecção dos briquetes, não ocorreu diferença significativa entre os teores de matérias voláteis. Entre os tratamentos que utilizaram o piche BIO3 ocorreram diferenças significativas ($p < 0,01$) entre as granulometrias, sendo as granulometrias de 60 mesh as que apresentaram os menores teores de matérias voláteis. Entre as proporções nos tratamentos com granulometria de 40 mesh, não houve diferença significativa nos teores de matérias voláteis. Entretanto, nos briquetes com granulometria de 60 mesh ocorreu diferença significativa no teor de voláteis entre as proporções, e os briquetes que utilizaram a proporção de 1:0,8 apresentaram melhor resultado, com teor de materiais voláteis de 18,91%. Os tratamentos que utilizaram o piche MANN apresentaram diferenças significativas nos teores de matérias voláteis entre granulometrias diferentes. Entre as proporções diferentes de carvão:piche e uma mesma granulometria de carvão, não ocorreu diferença significativa nos teores de matérias voláteis, sendo os tratamentos que utilizaram a granulometria de 40 mesh, nas duas proporções, os que apresentaram os menores teores de voláteis, não diferindo entre si significativamente. O efeito da proporção carvão:piche e da granulometria do carvão variou de acordo com os tratamentos realizados, não sendo possível definir uma tendência para o comportamento dessas variáveis em relação ao teor de matérias voláteis. Os briquetes que apresentaram os menores teores de matérias voláteis foram confeccionados com o piche LPEM, na granulometria de 40 mesh, com proporção carvão:piche de 1:0,8 (18,20%); com BIO3, na granulometria de 60 mesh e proporção carvão:piche de 1:0,8, apresentaram teor de 18,91%; com MANN, na granulometria de 40 mesh e com proporções carvão:piche de 1:1 e 1:0,8, apresentaram teores respectivos de 19,24 e 20,03%.

4.2. Teor de carbono fixo

Os valores médios do teor de carbono fixo para todas as granulometrias, proporções carvão:piche, tipos de piches e temperatura final do tratamento térmico são apresentados nos Quadros 5 e 6. De acordo com o Quadro 5, é

possível observar que, em todos os tratamentos, o efeito da temperatura final do tratamento térmico afetou significativamente ($p < 0,01$) os teores de carbono fixo.

De forma semelhante ao que ocorre na carbonização da madeira para produção de carvão vegetal, a elevação da temperatura final do tratamento térmico dos briquetes ocasionou um acréscimo no teor de carbono fixo. Tal fato é explicado pela maior perda de matérias voláteis, o que promove um acréscimo no teor de carbono fixo. O maior teor de carbono fixo foi comprovado pela análise estatística, demonstrando que o efeito da temperatura foi significativo em todos os tratamentos e promoveu um incremento no teor de carbono fixo dos tratamentos que utilizaram a temperatura final mais elevada. Com base nesses resultados, pode-se afirmar que a melhor condição para produzir briquetes com elevado teor de carbono fixo, neste trabalho, foi obtida com a temperatura final de coqueificação de 500°C.

Serão discutidos de agora em diante os resultados apresentados pelos briquetes coqueificados a 500°C, por apresentarem maiores teores de carbono fixo. O elevado teor de carbono fixo é importante na utilização do alto-forno, pois o seu efeito se reflete em maior utilização volumétrica e, conseqüentemente, em aumento da produtividade (ASSIS et al., 1982).

Quadro 5. Valores médios do teor de carbono fixo (%) em relação à granulometria, à proporção, aos tipos de piches e às temperaturas de coqueificação

Granulometria (mesh)	Proporção carvão:piche	Piche	Temperatura (°C)	
			400	500
< 40	1:1	LPEM	66,60 Bc	76,72 Ab
		BIO2	67,13 Bbc	79,73 Aa
		BIO3	69,72 Ba	74,79 Ac
		MANN	68,18 Bb	78,49 Aa
	1:0,8	LPEM	67,52 Bb	79,30 Aa
		BIO2	67,49 Bb	78,77 Aab
		BIO3	69,04 Ba	75,58 Ac
		MANN	65,85 Bc	77,54 Ab
< 60	1:1	LPEM	66,34 Bb	71,65 Ac
		BIO2	67,71 Bab	78,95 Aa
		BIO3	69,03 Ba	76,76 Ab
		MANN	68,62 Ba	77,22 Ab
	1:0,8	LPEM	67,17 Bb	73,32 Ac
		BIO2	67,86 Bab	78,41 Aab
		BIO3	68,86 Ba	79,55 Aa
		MANN	69,18 Ba	77,43 Ab

Sendo: LPEM - Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, BIO2 - Biocarbo tipo 2, BIO3 - Biocarbo tipo 3 e MANN - Mannesmann.

Para cada granulometria, proporção e temperatura, comparando-se os piches dentro de uma mesma coluna (letras minúsculas), médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Para cada granulometria, proporção e piche, comparando-se as temperaturas dentro de uma mesma linha (letras maiúsculas), "A" difere de "B" pelo teste F ($p < 0,01$).

De acordo com o Quadro 6, é possível observar que o efeito da proporção e da granulometria sobre os teores de carbono fixo variaram conforme o tipo de piche e tratamento utilizado. Contudo, observa-se que em apenas alguns tratamentos esse efeito foi significativo.

Quadro 6. Valores médios do teor de carbono fixo (%) em relação às temperaturas de coqueificação, aos tipos de piches, à proporção e à granulometria

Temperatura (°C)	Piche	Proporção carvão:piche	Granulometria (mesh)	
			< 40	< 60
400	LPEM	1:1	66,60Aa	66,34Aa
		1:0,8	67,52Aa	67,17Aa
	BIO2	1:1	67,13Aa	67,71Aa
		1:0,8	67,49Aa	67,86Aa
	BIO3	1:1	69,72Aa	69,03Aa
		1:0,8	69,04Aa	68,86Aa
	MANN	1:1	68,18Aa	68,62Aa
		1:0,8	65,85Bb	69,18Aa
500	LPEM	1:1	76,72Ab	71,65Bb
		1:0,8	79,30Aa	73,32Ba
	BIO2	1:1	79,73Aa	78,95Aa
		1:0,8	78,77Aa	78,41Aa
	BIO3	1:1	74,79Ba	76,76Ab
		1:0,8	75,58Ba	79,55Aa
	MANN	1:1	78,49Aa	77,22Ba
		1:0,8	77,54Aa	77,43Aa

Sendo: LPEM - Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, BIO2 - Biocarbo tipo 2, BIO3 - Biocarbo tipo 3 e MANN - Mannesmann.

Para cada temperatura, piche e granulometria, comparando-se as proporções dentro de uma mesma coluna (letras minúsculas), “a” difere de “b” pelo teste F ($p < 0,01$).

Para cada temperatura, piche e proporção, comparando-se as granulometrias dentro de uma mesma linha (letras maiúsculas), “A” difere de “B” pelo teste F ($p < 0,01$).

Observou-se que, entre os tratamentos que utilizaram o piche LPEM, os teores de carbono fixo dos briquetes confeccionados com granulometrias diferentes apresentaram diferença significativa ($p < 0,01$), e os briquetes que utilizaram a granulometria de 40 mesh apresentaram os maiores teores de carbono fixo. Entre as proporções numa mesma granulometria também ocorreu diferença significativa ($p < 0,01$), sendo os briquetes produzidos com proporção de 1:0,8 os que apresentaram os maiores teores de carbono fixo. O melhor resultado foi obtido pelo briquete confeccionado com granulometria de 40 mesh

na proporção de 1:0,8, que apresentou teor de carbono fixo de 79,30%. Os tratamentos que utilizaram o piche BIO2 na confecção dos briquetes apresentaram teores de carbono fixo que não diferiram entre si significativamente. Os tratamentos que utilizaram o piche BIO3 apresentaram diferenças significativas entre os teores de carbono fixo dos briquetes confeccionados com granulometrias diferentes, sendo a granulometria de 60 mesh a que apresentou os maiores teores de carbono fixo. Entre os briquetes confeccionados com granulometria de 60 mesh, os que utilizaram a proporção de 1:0,8 apresentaram o melhor resultado, com um teor de carbono fixo de 79,55%. Nos tratamentos que utilizaram o piche MANN, não houve diferença significativa entre os teores de carbono fixo dos briquetes confeccionados com proporções diferentes nas granulometrias de 40 e 60 mesh. Entre os briquetes confeccionados com granulometrias diferentes, os que utilizaram a proporção de 1:1 apresentaram teores de carbono fixo que diferiram entre si significativamente ($p < 0,01$), e entre os que utilizaram a proporção de 1:0,8 não houve diferença significativa entre os teores de carbono fixo.

Os briquetes que apresentaram os maiores teores de carbono fixo foram confeccionados com o piche LPEM, na granulometria de 40 mesh, com proporção carvão:piche de 1:0,8 (79,30%); com BIO2, nas granulometrias de 40 e 60 mesh e proporções de 1:1 e 1:0,8, apresentaram teores de 79,30, 78,77, 78,95 e 78,41%; com BIO3, na granulometria de 60 mesh e proporção carvão:piche de 1:0,8, teor de 79,55%; com MANN, na granulometria de 40 mesh e com proporções carvão:piche de 1:1 e 1:0,8, apresentaram teores respectivos de 78,49 e 77,54%, e na granulometria de 60 mesh e proporção carvão:piche de 1:0,8, teor de 77,43%.

4.3. Densidade relativa aparente

Os valores médios de densidade relativa aparente para todas as granulometrias, proporções carvão:piche, tipos de piches e temperatura final de coqueificação são apresentados nos Quadros 7 e 8. De acordo com o Quadro 7, é possível observar que, em todos os tratamentos, o efeito da temperatura final de coqueificação não afetou significativamente os valores de densidade relativa aparente.

Segundo QUIRINO (1991), a densidade relativa aparente tem elevada dependência do processo (compactação e granulometria do carvão). A partir dessa afirmação, conclui-se que um dos motivos que contribuiu para que os valores de densidade relativa aparente dos briquetes não diferissem entre si, foi a utilização de uma única pressão de compactação na confecção dos briquetes.

Quadro 7. Valores médios de densidade aparente (g cm^{-3}) em relação à granulometria, à proporção, aos tipos de piches e às temperaturas de coqueificação

Granulometria (mesh)	Proporção carvão:piche	Piche	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	
			400	500
< 40	1:1	LPEM	0,54 Ab	0,59 Aa
		BIO2	0,53 Ac	0,51 Ac
		BIO3	0,57 Aa	0,53 Ab
		MANN	0,49 Ad	0,54 Ab
	1:0,8	LPEM	0,51 Ab	0,53 Aa
		BIO2	0,49 Ac	0,47 Ac
		BIO3	0,53 Aa	0,49 Ab
		MANN	0,41 Ad	0,48 Abc
< 60	1:1	LPEM	0,57 Ab	0,69 Aa
		BIO2	0,54 Ac	0,51 Ac
		BIO3	0,60 Aa	0,56 Ab
		MANN	0,50 Ad	0,48 Ad
	1:0,8	LPEM	0,52 Aa	0,57 Aa
		BIO2	0,52 Aa	0,48 Ab
		BIO3	0,51 Aa	0,48 Ab
		MANN	0,46 Ab	0,41 Ac

Sendo: LPEM - Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, BIO2 - Biocarbo tipo 2, BIO3 - Biocarbo tipo 3 e MANN - Mannesmann.

Para cada granulometria, proporção e temperatura, comparando-se os piches dentro de uma mesma coluna (letras minúsculas), médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Para cada granulometria, proporção e piche, comparando-se as temperaturas dentro de uma mesma linha (letras maiúsculas), "A" difere de "B" pelo teste F ($p < 0,01$).

Para observar o efeito da proporção e da granulometria sobre os valores de densidade aparente dentro de cada piche, os dados foram agrupados de outra maneira, para melhor visualização (Quadro 8). Observa-se que a proporção e a granulometria não afetaram significativamente os valores de densidade aparente.

Quadro 8. Valores médios da densidade aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) em relação às temperaturas de coqueificação, aos tipos de piches, à proporção e à granulometria

Temperatura (°C)	Piche	Proporção carvão:piche	Granulometria (mesh)		
			< 40	< 60	
400	LPEM	1:1	0,54Aa	0,57Aa	
		1:0,8	0,51Aa	0,52Aa	
	BIO2	1:1	0,53Aa	0,54Aa	
		1:0,8	0,49Aa	0,52Aa	
	BIO3	1:1	0,57Aa	0,60Aa	
		1:0,8	0,53Aa	0,51Aa	
	MANN	1:1	0,49Aa	0,50Aa	
		1:0,8	0,41Aa	0,46Aa	
	500	LPEM	1:1	0,59Aa	0,69Aa
			1:0,8	0,53Aa	0,57Aa
BIO2		1:1	0,51Aa	0,51Aa	
		1:0,8	0,47Aa	0,48Aa	
BIO3		1:1	0,53Aa	0,56Aa	
		1:0,8	0,49Aa	0,48Aa	
MANN		1:1	0,54Aa	0,48Aa	
		1:0,8	0,48Aa	0,41Aa	

Sendo: LPEM - Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, BIO2 - Biocarbo tipo 2, BIO3 - Biocarbo tipo 3 e MANN - Mannesmann.

Para cada temperatura, piche e granulometria, comparando-se as proporções dentro de uma mesma coluna (letras minúsculas), “a” difere de “b” pelo teste F ($p < 0,01$).

Para cada temperatura, piche e proporção, comparando-se as granulometrias dentro de uma mesma linha (letras maiúsculas), “A” difere de “B” pelo teste F ($p < 0,01$).

A granulometria do carvão, por apresentar tamanho de partículas semelhante, também foi um fator que contribuiu para que a densidade aparente dos briquetes não diferissem significativamente entre si. Apesar de não ocorrer

diferença significativa entre as proporções, observou-se que a maior proporção de piche na mistura produz um briquete com maior densidade relativa aparente. Isso ocorreu, segundo MELO (2000), porque uma maior proporção de piche tende a preencher os espaços vazios existentes entre as partículas de carvão.

4.4. Densidade verdadeira

Os valores médios da densidade verdadeira para todas as granulometrias, proporções carvão:piche, tipos de piches e temperatura final de coqueificação são apresentados nos Quadros 9 e 10. De acordo com o Quadro 9, é possível observar que, em todos os tratamentos, o efeito da temperatura final de coqueificação não afetou significativamente os valores de densidade verdadeira. Entre os tipos diferentes de piches dentro de um mesmo tratamento, ocorreram diferenças significativas nos valores de densidade verdadeira na maioria dos tratamentos, exceto naqueles que utilizaram granulometria de 40 mesh nas proporções de 1:1 e 1:0,8 e temperatura de 500°C e nos tratamentos que utilizaram a granulometria de 60 mesh na proporção de 1:1 e temperatura de 500°C.

A densidade é propriedade importante em um termo-redutor, pois determina o volume ocupado por este nos aparelhos de redução, tais como os altos-fornos. A densidade dos briquetes depende da densidade do carvão vegetal utilizado na sua confecção. Como todos os tratamentos foram realizados com o mesmo carvão vegetal, isso contribuiu para que as densidades verdadeiras dos briquetes não diferissem significativamente entre si.

Quadro 9. Valores médios de densidade verdadeira (g cm^{-3}) em relação à granulometria, à proporção, aos tipos de piches e às temperaturas de coqueificação

Granulometria (mesh)	Proporção carvão:piche	Piche	Temperatura (°C)			
			400	500		
< 40	1:1	LPEM	1,01	Ac	1,34	Aa
		BIO2	1,33	Aa	1,27	Aa
		BIO3	1,18	Ab	1,32	Aa
		MANN	1,34	Aa	1,27	Aa
	1:0,8	LPEM	0,76	Ab	1,35	Aa
		BIO2	1,07	Aa	1,27	Aa
		BIO3	1,20	Aa	1,30	Aa
		MANN	1,13	Aa	1,28	Aa
< 60	1:1	LPEM	1,39	Aa	1,25	Aa
		BIO2	1,21	Ab	1,38	Aa
		BIO3	1,39	Aa	1,34	Aa
		MANN	1,20	Ab	1,32	Aa
	1:0,8	LPEM	1,24	Ab	1,23	Ab
		BIO2	1,03	Ac	1,39	Aa
		BIO3	1,42	Aa	1,35	Aab
		MANN	1,15	Abc	1,39	Aa

Sendo: LPEM - Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, BIO2 - Biocarbo tipo 2, BIO3 - Biocarbo tipo 3 e MANN - Mannesmann.

Para cada granulometria, proporção e temperatura, comparando-se os piches dentro de uma mesma coluna (letras minúsculas), médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Para cada granulometria, proporção e piche, comparando-se as temperaturas dentro de uma mesma linha (letras maiúsculas), "A" difere de "B" pelo teste F ($p < 0,01$).

De acordo com o Quadro 10, é possível observar que, em todos os tratamentos, os efeitos das granulometrias e proporções não afetaram significativamente os valores de densidade verdadeira.

Quadro 10. Valores médios da densidade verdadeira ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) em relação às temperaturas de coqueificação, aos tipos de piches, à proporção e à granulometria

Temperatura (°C)	Piche	Proporção carvão:piche	Granulometria (mesh)	
			< 40	< 60
400	LPEM	1:1	1,01Aa	1,39Aa
		1:0,8	0,76Aa	1,24Aa
	BIO2	1:1	1,33Aa	1,21Aa
		1:0,8	1,07Aa	1,03Aa
	BIO3	1:1	1,18Aa	1,39Aa
		1:0,8	1,20Aa	1,42Aa
	MANN	1:1	1,34Aa	1,20Aa
		1:0,8	1,13Aa	1,15Aa
500	LPEM	1:1	1,34Aa	1,25Aa
		1:0,8	1,35Aa	1,23Aa
	BIO2	1:1	1,27Aa	1,38Aa
		1:0,8	1,27Aa	1,39Aa
	BIO3	1:1	1,32Aa	1,34Aa
		1:0,8	1,30Aa	1,35Aa
	MANN	1:1	1,27Aa	1,32Aa
		1:0,8	1,28Aa	1,39Aa

Sendo: LPEM - Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, BIO2 - Biocarbo tipo 2, BIO3 - Biocarbo tipo 3 e MANN - Mannesmann.

Para cada temperatura, piche e granulometria, comparando-se as proporções dentro de uma mesma coluna (letras minúsculas), “a” difere de “b” pelo teste F ($p < 0,01$).

Para cada temperatura, piche e proporção, comparando-se as granulometrias dentro de uma mesma linha (letras maiúsculas), “A” difere de “B” pelo teste F ($p < 0,01$).

4.5. Porosidade

Os valores médios de porosidade para todas as granulometrias, proporções carvão:piche, tipos de piches e temperatura final de coqueificação são apresentados nos Quadros 11 e 12. De acordo com o Quadro 11, é possível observar que o efeito da temperatura final de coqueificação variou conforme o tipo de piche e o tratamento utilizado, não sendo possível definir uma tendência geral dessa variável sobre a porosidade. Todavia, para todos os tratamentos a análise

química imediata determinou que houve diminuição da porosidade dos briquetes em função da compactação aplicada no processo, em comparação com a porosidade do carvão vegetal a partir do qual foram confeccionados, de 77,17%. Uma baixa porosidade é importante em um agente redutor, pois as reações de gaseificação não irão ocorrer no seu interior, não ocasionando a perda de massa interna que iria torná-lo menos resistente às condições de operação em alto-forno.

Quadro 11. Valores médios de porosidade (%) em relação à granulometria, à proporção, aos tipos de piches e às temperaturas de coqueificação

Granulometria (mesh)	Proporção carvão:piche	Piche	Temperatura (°C)	
			400	500
< 40	1:1	LPEM	45,70 Bb	55,89 Aa
		BIO2	60,41 Aa	60,05 Aa
		BIO3	51,46 Bb	59,73 Aa
		MANN	62,90 Aa	57,42 Aa
	1:0,8	LPEM	32,16 Bc	60,48 Aa
		BIO2	53,62 Bb	63,34 Aa
		BIO3	55,71 Bb	62,67 Aa
		MANN	62,62 Aa	62,70 Aa
< 60	1:1	LPEM	58,76 Aa	44,97 Bb
		BIO2	55,33 Ba	63,56 Aa
		BIO3	56,82 Aa	58,56 Aa
		MANN	57,95 Ba	64,09 Aa
	1:0,8	LPEM	58,37 Aa	53,43 Ab
		BIO2	47,23 Bb	65,50 Aa
		BIO3	64,30 Aa	64,01 Aa
		MANN	60,31 Ba	70,09 Aa

Sendo: LPEM - Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, BIO2 - Biocarbo tipo 2, BIO3 - Biocarbo tipo 3 e MANN - Mannesmann.

Para cada granulometria, proporção e temperatura, comparando-se os piches dentro de uma mesma coluna (letras minúsculas), médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Para cada granulometria, proporção e piche, comparando-se as temperaturas dentro de uma mesma linha (letras maiúsculas), "A" difere de "B" pelo teste F ($p < 0,01$).

De acordo com o Quadro 12, é possível observar que os efeitos das granulometrias e proporções também variaram conforme o tipo de piche e o tratamento utilizado, não sendo possível definir uma tendência geral dessas variáveis sobre a porosidade.

Quadro 12. Valores médios de porosidade (%) em relação às temperaturas de coqueificação, aos tipos de piches, à proporção e à granulometria

Temperatura (°C)	Piche	Proporção carvão:piche	Granulometria (mesh)		
			< 40	< 60	
400	LPEM	1:1	47,70Ba	58,76Aa	
		1:0,8	32,16Bb	58,37Aa	
	BIO2	1:1	60,41Aa	55,33Aa	
		1:0,8	53,62Ab	47,23Bb	
	BIO3	1:1	51,46Aa	56,82Ab	
		1:0,8	55,71Ba	64,30Aa	
	MANN	1:1	62,90Aa	57,95Aa	
		1:0,8	62,62Aa	60,31Aa	
	500	LPEM	1:1	55,89Aa	44,97Bb
			1:0,8	60,48Aa	53,43Ba
BIO2		1:1	60,05Aa	63,56Aa	
		1:0,8	63,34Aa	65,50Aa	
BIO3		1:1	59,73Aa	58,56Aa	
		1:0,8	62,67Aa	64,01Aa	
MANN		1:1	57,42Ba	64,09Ab	
		1:0,8	62,70Ba	70,09Aa	

Sendo: LPEM - Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, BIO2 - Biocarbo tipo 2, BIO3 - Biocarbo tipo 3 e MANN - Mannesmann.

Para cada temperatura, piche e granulometria, comparando-se as proporções dentro de uma mesma coluna (letras minúsculas), "a" difere de "b" pelo teste F ($p < 0,01$).

Para cada temperatura, piche e proporção, comparando-se as granulometrias dentro de uma mesma linha (letras maiúsculas), "A" difere de "B" pelo teste F ($p < 0,01$).

Nos briquetes confeccionados com o piche LPEM e tratados termicamente a 400°C, ocorreu diferença significativa ($p < 0,01$) entre as porosidades dos tratamentos que utilizaram granulometria de 40 e 60 mesh, sendo que na granulometria de 40 mesh foram obtidos briquetes com porosidades

menores. Entre as proporções, na granulometria de 40 mesh, também ocorreu diferença significativa ($p < 0,01$), sendo a proporção de 1:0,8 a que apresentou a menor porosidade (32,16%). Entre os briquetes tratados termicamente a 500°C também ocorreu diferença significativa entre as granulometrias, mas, ao contrário dos briquetes tratados termicamente a 400°C, a granulometria de 60 mesh foi a que apresentou os menores valores de porosidade. Entre as proporções, nesses tratamentos que utilizaram granulometria de 60 mesh, também ocorreu diferença significativa ($p < 0,01$), sendo a proporção de 1:1 a que apresentou a menor porosidade (44,97%).

Nos briquetes confeccionados com piche BIO2 e tratados termicamente a 400°C, ocorreu diferença significativa nos valores de porosidade entre as proporções, para as duas granulometrias utilizadas, e apenas os tratamentos que utilizaram a proporção de 1:0,8 apresentaram diferença significativa nos valores de porosidade entre as granulometrias. Desta maneira, o briquete confeccionado com granulometria de 60 mesh e proporção 1:0,8 apresentou o menor valor de porosidade (47,23%). Nos briquetes tratados termicamente a 500°C, não ocorreu diferença significativa entre os valores de porosidade dos tratamentos.

Nos briquetes confeccionados com piche BIO3 e tratados termicamente a 400°C, não ocorreu diferença significativa nos valores de porosidade entre as proporções, para a granulometria de 40 mesh. Entre as proporções na granulometria de 60 mesh, ocorreu diferença significativa ($p < 0,01$) nos valores de porosidade. Entre as granulometrias dentro de uma mesma proporção, os valores de porosidade diferiram significativamente entre si ($p < 0,01$) nas proporções de 1:0,8, e entre as proporções de 1:1 não houve diferença significativa; desta forma, os briquetes confeccionados com granulometria de 40 mesh nas duas proporções e com granulometria de 60 mesh e proporção de 1:1 os apresentaram os menores valores de porosidade, não diferindo entre si significativamente. Nos briquetes tratados termicamente a 500°C, não houve diferença significativa entre os valores de porosidade, para todos os tratamentos.

Nos briquetes confeccionados com o piche MANN e tratados termicamente a 400°C, não ocorreu diferença significativa nos valores de porosidade entre todos os tratamentos. Nos briquetes tratados termicamente a 500°C, ocorreu diferença significativa ($p < 0,05$) nos valores de porosidade entre as granulometrias, sendo a granulometria de 40 mesh a que apresentou menores

valores de porosidade. Entre as proporções, em uma mesma granulometria, não ocorreu diferença significativa na porosidade dos briquetes confeccionados com granulometria de 40 mesh; já para a granulometria de 60 mesh, a porosidade diferiu significativamente ($p < 0,05$) entre as proporções.

4.6. Carga de ruptura

Os valores médios da carga de ruptura para todas as granulometrias, proporções carvão:piche, tipos de piches e temperatura final de coqueificação são apresentados nos Quadros 13 e 14. De acordo com os esses quadros, é possível observar que os efeitos da temperatura final de coqueificação, da granulometria e das proporções variaram conforme o tipo de piche e o tratamento utilizado, não sendo possível definir uma tendência geral dessas variáveis sobre a carga de ruptura.

Quadro 13. Valores médios de carga de ruptura (kg) em relação à granulometria, à proporção, aos tipos de piches e às temperaturas de coqueificação

Granulometria (mesh)	Proporção carvão:piche	Piche	Temperatura (°C)			
			400		500	
< 40	1:1	LPEM	13,00	Bb	111,50	Aa
		BIO2	14,00	Bb	38,50	Ad
		BIO3	68,50	Ba	91,00	Ab
		MANN	79,00	Aa	79,50	Ac
	1:0,8	LPEM	8,50	Bc	67,00	Aa
		BIO2	12,50	Bbc	39,50	Ab
		BIO3	52,50	Aa	60,00	Aa
		MANN	23,50	Bb	53,00	Aab
< 60	1:1	LPEM	11,00	Bb	194,00	Aa
		BIO2	12,50	Bb	39,50	Ac
		BIO3	107,50	Aa	114,00	Ab
		MANN	23,50	Bb	41,00	Ac
	1:0,8	LPEM	9,50	Bc	87,50	Aa
		BIO2	17,00	Bbc	36,50	Ac
		BIO3	44,00	Ba	68,50	Ab
		MANN	30,50	Aab	23,00	Ac

Sendo: LPEM - Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, BIO2 - Biocarbo tipo 2, BIO3 - Biocarbo tipo 3 e MANN - Mannesmann.

Para cada granulometria, proporção e temperatura, comparando-se os piches dentro de uma mesma coluna (letras minúsculas), médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Para cada granulometria, proporção e piche, comparando-se as temperaturas dentro de uma mesma linha (letras maiúsculas), "A" difere de "B" pelo teste F ($p < 0,01$).

Quadro 14. Valores médios da carga de ruptura (Kg) em relação às temperaturas de coqueificação, aos tipos de piches , à proporção e à granulometria

Temperatura (°C)	Piche	Proporção carvão:piche	Granulometria (mesh)	
			< 40	< 60
400	LPEM	1:1	13,00Aa	11,00Aa
		1:0,8	8,50Aa	9,50Aa
	BIO2	1:1	14,00Aa	12,50Aa
		1:0,8	12,50Aa	17,00Aa
	BIO3	1:1	68,50Ba	107,50Aa
		1:0,8	52,50Ab	44,00Ab
	MANN	1:1	79,00Aa	23,50Ba
		1:0,8	23,50Ab	30,50Aa
500	LPEM	1:1	111,50Ba	194,00Aa
		1:0,8	67,00Bb	87,50Ab
	BIO2	1:1	38,50Aa	39,50Aa
		1:0,8	39,50Aa	36,50Aa
	BIO3	1:1	91,00Ba	114,00Aa
		1:0,8	60,00Ab	68,50Ab
	MANN	1:1	79,50Aa	41,00Ba
		1:0,8	53,00Ab	23,00Bb

Sendo: LPEM - Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, BIO2 - Biocarbo tipo 2, BIO3 - Biocarbo tipo 3 e MANN - Mannesmann.

Para cada temperatura, piche e granulometria, comparando-se as proporções dentro de uma mesma coluna (letras minúsculas), "a" difere de "b" pelo teste F ($p < 0,01$).

Para cada temperatura, piche e proporção, comparando-se as granulometrias dentro de uma mesma linha (letras maiúsculas), "A" difere de "B" pelo teste F ($p < 0,01$).

Os briquetes confeccionados com piche LPEM e coqueificados a 400°C não apresentaram diferença significativa ($p < 0,01$) entre as cargas de ruptura, para todos os tratamentos. De acordo com os resultados apresentados nos quadros de médias, a temperatura final de coqueificação afetou significativamente ($p < 0,01$) as cargas de ruptura dos briquetes produzidos com o piche LPEM, observando-se que a temperatura de 500°C foi a que apresentou os maiores valores de carga de ruptura. Entre os briquetes coqueificados a 500°C ocorreu diferença significativa ($p < 0,01$) entre as cargas de ruptura, para todos os tratamentos. Os briquetes confeccionados com granulometria de 60 mesh apresentaram carga de ruptura superior, diferindo significativamente ($p < 0,01$) dos que utilizaram granulometria de 40 mesh. Entre as proporções, nesse tratamento, também ocorreu diferença significativa ($p < 0,01$), e o briquete que utilizou a proporção de 1:1 apresentou a carga de ruptura mais elevada (194 kg).

Os briquetes confeccionados com piche BIO2 e coqueificados a 400°C também não apresentaram diferença significativa ($p < 0,01$) entre as cargas de ruptura, para todos os tratamentos. Os briquetes tratados termicamente a 500°C também não apresentaram diferença significativa ($p < 0,01$) entre as cargas de ruptura, para todos os tratamentos. De acordo com os resultados apresentados nos quadros de médias, a temperatura final de coqueificação afetou significativamente ($p < 0,01$) a carga de ruptura dos briquetes produzidos com o piche BIO2, observando-se que a temperatura de 500°C foi a que apresentou os maiores valores de carga de ruptura.

De acordo com os resultados obtidos, os tratamentos que apresentaram a carga de ruptura mais elevada foram realizados com temperatura final de coqueificação de 500°C, independentemente da granulometria e da proporção utilizada, não diferindo entre si significativamente.

Nos briquetes confeccionados com piche BIO3 e coqueificados a 400°C, ocorreu diferença significativa ($p < 0,01$) nas cargas de ruptura entre as proporções, nas granulometrias de 40 e 60 mesh. Entre as granulometrias dentro de uma mesma proporção, as cargas de ruptura diferiram significativamente ($p < 0,01$) nos tratamentos que utilizaram a proporções de 1:1, e não houve diferença entre as proporções de 1:0,8, sendo os briquetes com granulometria de 60 mesh os que apresentaram cargas de ruptura maiores. Nos briquetes tratados termicamente a 500°C, também ocorreu diferença significativa ($p < 0,01$) nas

cargas de ruptura entre as proporções, nas granulometrias de 40 e 60 mesh. Entre as granulometrias dentro de uma mesma proporção, as cargas de ruptura diferiram significativamente ($p < 0,01$) nos tratamentos que utilizaram a proporções de 1:1, e não houve diferença entre as proporções de 1:0,8, sendo os briquetes com granulometria de 60 mesh os que apresentaram cargas de ruptura maiores. Os briquetes confeccionados com granulometria de 60 mesh, proporção de 1:1 e coqueificados a 400 e 500°C não diferiram significativamente entre si, apresentando as maiores cargas de ruptura. Nos briquetes confeccionados com o piche MANN, coqueificados a 400°C e utilizando granulometrias diferentes de carvão:piche na proporção de 1:1, ocorreu diferença significativa ($p < 0,01$) entre as cargas de ruptura, sendo a granulometria de 40 mesh a que apresentou maior carga de ruptura. Nos tratamentos que utilizaram proporção de 1:0,8, não ocorreu diferença significativa entre as cargas de ruptura. Os briquetes coqueificados a 500°C apresentaram diferenças significativas ($p < 0,01$) entre as cargas de ruptura, em todos os tratamentos. Os briquetes confeccionados com granulometria de 40 mesh e proporção de 1:1 apresentaram as maiores cargas de ruptura. Os tratamentos que utilizaram a granulometria de 40 mesh, proporções de 1:1 e coqueificados a 400 e 500°C não diferiram entre si significativamente, apresentando os maiores valores de carga de ruptura.

4.7. Poder calorífico

Os valores médios de poder calorífico para todas as granulometrias, proporções de carvão:piche, tipos de piches e temperatura final de coqueificação são apresentados nos Quadros 15 e 16. De acordo com o Quadro 16, é possível observar que, em todos tratamentos, o efeito da temperatura final de coqueificação afetou significativamente ($p < 0,01$) os valores de poder calorífico, exceto nos confeccionados com piche BIO3, granulometria de 40 mesh e proporção carvão:piche de 1:1, nos quais os poderes caloríficos não diferiram significativamente entre si nas diferentes temperaturas finais de coqueificação. Esse resultado é bem evidente, pois pode-se observar que os tratamentos coqueificados a 500°C apresentaram os maiores valores de poder calorífico, permitindo concluir que o aumento da temperatura de coqueificação promove o aumento do poder calorífico. Serão discutidos apenas os resultados apresentados pelos briquetes coqueificados a 500°C, por apresentarem os maiores valores de poder calorífico.

Quadro 15. Valores médios de poder calorífico (kcal kg⁻¹) em relação à granulometria, à proporção, aos tipos de piches e às temperaturas de coqueificação

Granulometria (mesh)	Proporção carvão:piche	Piche	Temperatura (°C)			
			400		500	
< 40	1:1	LPEM	6901	Bb	7209	Aab
		BIO2	7101	Ba	7254	Aa
		BIO3	6864	Ab	6943	Ac
		MANN	6956	Bb	7119	Ab
	1:0,8	LPEM	6943	Bb	7389	Aa
		BIO2	7073	Ba	7213	Ab
		BIO3	7080	Ba	6912	Ac
		MANN	6955	Bb	7281	Ab
< 60	1:1	LPEM	6758	Bb	6905	Ac
		BIO2	6811	Bb	7284	Ab
		BIO3	6844	Bb	7424	Aa
		MANN	7092	Ba	7325	Ab
	1:0,8	LPEM	6718	Bc	7000	Ab
		BIO2	6761	Bbc	7315	Aa
		BIO3	6836	Bb	7261	Aa
		MANN	7063	Ba	7225	Aa

Sendo: LPEM - Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, BIO2 - Biocarbo tipo 2, BIO3 - Biocarbo tipo 3 e MANN - Mannesmann.

Para cada granulometria, proporção e temperatura, comparando-se os piches dentro de uma mesma coluna (letras minúsculas), médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Para cada granulometria, proporção e piche, comparando-se as temperaturas dentro de uma mesma linha (letras maiúsculas), "A" difere de "B" pelo teste F ($p < 0,01$).

Para observar o efeito da proporção e da granulometria sobre os valores de poder calorífico dentro de cada piche, os dados foram agrupados de outra maneira, para melhor visualização (Quadro 16).

Quadro 16. Valores médios de poder calorífico (kcal kg^{-1}) em relação às temperaturas de coqueificação, aos tipos de piches, à proporção e à granulometria

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Piche	Proporção carvão:piche	Granulometria (mesh)		
			< 40	< 60	
400	LPEM	1:1	6901Aa	6758Ba	
		1:0,8	6943Aa	6718Ba	
	BIO2	1:1	7101Aa	6811Ba	
		1:0,8	7073Aa	6761Ba	
	BIO3	1:1	6864Ab	6844Aa	
		1:0,8	7080Aa	6836Ba	
	MANN	1:1	6956Ba	7092Aa	
		1:0,8	6955Ba	7063Aa	
	500	LPEM	1:1	7209Ab	6905Bb
			1:0,8	7389Aa	7000Ba
BIO2		1:1	7254Aa	7284Aa	
		1:0,8	7213Ba	7315Aa	
BIO3		1:1	6943Ba	7424Aa	
		1:0,8	6912Ba	7261Ab	
MANN		1:1	7119Bb	7325Aa	
		1:0,8	7281Aa	7225Ab	

Sendo: LPEM - Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, BIO2 - Biocarbo tipo 2, BIO3 - Biocarbo tipo 3 e MANN - Mannesmann.

Para cada temperatura, piche e granulometria, comparando-se as proporções dentro de uma mesma coluna (letras minúsculas), "a" difere de "b" pelo teste F ($p < 0,01$).

Para cada temperatura, piche e proporção, comparando-se as granulometrias dentro de uma mesma linha (letras maiúsculas), "A" difere de "B" pelo teste F ($p < 0,01$).

Para todos os tratamentos, o processo de briquetagem promoveu um incremento sobre os valores de poder calorífico, fato este que pode ser comprovado pelos resultados obtidos, que foram sempre maiores do que os apresentados pelo carvão vegetal ($6740 \text{ kcal kg}^{-1}$) e pelos piches utilizados no

processo de briquetagem. Os piches apresentaram os seguintes resultados de poder calorífico: LPEM - 6687 kcal kg⁻¹, BIO2 - 6622 kcal kg⁻¹, BIO3 - 6563 kcal kg⁻¹ e MANN - 6149 kcal kg⁻¹.

Nos tratamentos que utilizaram o piche LPEM, houve diferença significativa ($p < 0,01$) entre os valores de poder calorífico dos briquetes com granulometrias diferentes, sendo as granulometrias de 40 mesh as que apresentaram os maiores valores. Entre os briquetes confeccionados com essa granulometria, também houve diferença significativa ($p < 0,01$) quando comparamos as proporções diferentes de carvão:piche, e o briquete que utilizou a proporção de 1:0,8 apresentou o maior valor de poder calorífico (7389 kcal kg⁻¹). Nos tratamentos que utilizaram o piche BIO2, não houve diferença significativa entre os valores de poder calorífico dos briquetes confeccionados com proporções diferentes de carvão:piche em uma mesma granulometria. Entre granulometrias diferentes, na proporção de 1:1, não houve diferença significativa; já para a proporção de 1:0,8, os valores de poder calorífico diferiram entre si significativamente ($p < 0,01$). Os tratamentos que utilizaram o piche BIO3 apresentaram diferença significativa ($p < 0,01$) entre os valores de poder calorífico dos briquetes confeccionados com granulometrias diferentes, nas duas proporções carvão:piche. Entre as proporções na granulometria de 40 mesh não houve diferença significativa; já para a granulometria de 60 mesh, ocorreu diferença significativa ($p < 0,01$) entre as proporções, e o briquete que apresentou o maior poder calorífico (7424 kcal kg⁻¹) foi confeccionado com granulometria de 60 mesh e proporção carvão:piche de 1:1. Os tratamentos que utilizaram o piche MANN também apresentaram diferença significativa ($p < 0,01$) entre os valores de poder calorífico dos briquetes confeccionados com granulometrias diferentes, nas duas proporções carvão:piche. Entre as proporções, na granulometria de 40 mesh, não houve diferença significativa; já para a granulometria de 60 mesh ocorreu diferença significativa ($p < 0,01$) entre as proporções, e o briquete que apresentou o maior poder calorífico (7325 kcal kg⁻¹) foi confeccionado com granulometria de 60 mesh e proporção carvão:piche de 1:1. O aumento da temperatura de coqueificação, de maneira semelhante ao que ocorre com a carbonização da madeira, promoveu um aumento do poder calorífico dos briquetes.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

O carvão vegetal, em decorrência de sua alta friabilidade, gera uma quantidade elevada de finos, que não são utilizados pela indústria siderúrgica, principalmente por serem resíduos que apresentam desuniformidade granulométrica, alta porcentagem de cinzas e impurezas. Em virtude desses problemas apresentados pelos finos de carvão vegetal, uma alternativa para sua utilização como energético é o seu melhoramento por meio de técnicas industriais como a briquetagem.

Através do processo de briquetagem do carvão vegetal com o uso de aglutinantes, ou seja, técnica que envolve balanceamento granulométrico, mistura proporcional de aglutinante, compactação e secagem, consegue-se o aproveitamento dos finos de carvão na forma de um combustível de melhor densidade, mais homogêneo, granulometria uniforme, maior carga de ruptura e baixa geração de finos, mantendo-se as características energéticas do carvão, facilitando o manuseio, a estocagem, a utilização e permitindo o seu transporte a maiores distâncias (FONTES et al., 1991).

Os briquetes desenvolvidos neste projeto foram confeccionados utilizando o carvão vegetal moído em duas granulometrias (todo o material que passou pelas malhas de 40 e 60), duas proporções carvão:piche (1:1 e 1:0,8), duas temperaturas finais de tratamento térmico dos briquetes (400 e 500°C), uma pressão de compactação dos briquetes (6 toneladas) e quatro tipos diferentes de piches vegetais como aglutinantes (LPEM, BIO2, BIO3 e MANN). Este projeto visou avaliar o efeito dessas variáveis sobre os teores de carbono fixo (CF), matérias voláteis (MV), densidade relativa aparente (DA), densidade verdadeira (DV), porosidade (PO) e carga de ruptura (CR).

Com base nos resultados, podem-se obter as seguintes conclusões:

Todos os piches utilizados na confecção dos briquetes, apesar de serem obtidos de formas distintas, apresentaram possibilidades de serem utilizados como aglutinantes. Houve diferenças significativas nas propriedades dos briquetes de acordo com o tratamento e tipo de piche utilizado, bastando adequar seu processo de confecção de acordo com as exigências do produto para uso determinado.

A temperatura final do tratamento térmico afetou significativamente os teores de matérias voláteis, carbono fixo e o poder calorífico dos briquetes. A elevação da temperatura promoveu a diminuição do teor de matérias voláteis, o aumento do teor de carbono fixo e do poder calorífico em todos os tratamentos.

As densidades aparente e verdadeira dos briquetes não foram afetadas significativamente pela temperatura final do tratamento térmico.

A porosidade e a carga de ruptura dos briquetes variaram conforme o tipo de piche e o tratamento realizado, não sendo possível definir uma tendência do efeito da temperatura sobre essas propriedades.

As variáveis granulometria do carvão e proporção carvão:piche não afetaram significativamente as densidades aparente e verdadeira dos briquetes.

Os teores de matérias voláteis, carbono fixo, porosidade e a carga de ruptura dos briquetes variaram conforme o tratamento realizado, não sendo possível definir o efeito da granulometria do carvão e da proporção carvão:piche sobre essas propriedades.

Os briquetes produzidos apresentaram baixo teor de matérias voláteis, alto teor de carbono fixo, densidades aparente e verdadeira superiores às do carvão vegetal, porosidade inferior à do carvão vegetal, carga de ruptura dos melhores tratamentos superior à do carvão vegetal e poder calorífico mais elevado do que o apresentado pelo carvão vegetal e pelos piches.

Quanto à carga de ruptura, os resultados obtidos variaram conforme os tratamentos realizados, não sendo possível definir o efeito da granulometria do carvão, da proporção carvão:piche e da temperatura final do tratamento térmico sobre essa propriedade.

O parâmetro mais importante no processo de briquetagem foi a temperatura de coqueificação, visto que sua elevação promoveu a melhoria dos resultados de propriedades importantes como teor de matérias voláteis, carbono

fixo e poder calorífico. As propriedades dos briquetes variaram conforme a granulometria e a proporção carvão:piche utilizada, não sendo possível determinar sua influência sobre elas.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que o processo de briquetagem de carvão vegetal utilizando diferentes tipos de piche vegetal como aglutinantes, independentemente de seu processo de recuperação, é viável tecnicamente desde que se adapte o processo de produção às propriedades requeridas pelo produto final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M. R. Recuperação de alcatrão em fornos de alvenaria. In: PENEDO, W. R. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, p. 175-80. 1982. (Publicações Técnicas 8)
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Chemical analysis of wood charcoal. **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia. v. 410, p.257-63, 1964. (ASTM D – 1762)
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Determination of true density, apparent relative density and porosity. **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia. v. 410, p. 211-14, 1973. (ASTM D – 167)
- ANTUNES, R.C. Briquetagem de carvão vegetal. In: Produção, utilização de carvão vegetal. **Publicação Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC**, v 1, p. 197-206, Belo Horizonte, 1982.
- ASSIS, P.S.; ALMEIDA, L.Z.; PORTO, F.M. Utilização de carvão vegetal na siderurgia. In: **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC. p. 281-318. 1982.
- BEZZON, G. **Síntese de novos combustíveis a partir de resíduos agroflorestais e possíveis contribuições no cenário energético brasileiro**. Campinas: FEM/UNICAMP, 1994. 108 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos). Universidade Estadual de Campinas, 1994.
- BHATTACHARYA, S. C. Carbonized and uncarbonized briquettes from residues. **Workshop on Biomass Thermal Processing**, 1990. Londres, Inglaterra. SHELL, 1990. v. 1, p. 1-9.
- BHATTACHARYA, S. C.; SETT, S.; SHRESTHA, R. M. **State of the art for biomass densification**. Energy Sources. v. 2. 1989. p. 161-182.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional**, Brasília, 2000. 154 p.

- BROSCH, C. D.; FURUNO, J. K. Aproveitamento dos finos de carvão vegetal. Divisão de Metalurgia do Instituto de Pesquisas de São Paulo. In: **Congresso Anual da ABM**. 12. Vitória, ES, 1968.
- FONTES, P. J. P.; QUIRINO, W. F.; OKINO, E. Y. **Aspectos técnicos da briquetagem de carvão vegetal no Brasil**. Brasília, DF: Laboratório de Produtos Florestais, Departamento de Pesquisas, Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal. 1989. p. 1-14.
- FONTES, P. J. P.; QUIRINO, W. F.; PASTORE Jr., F.; FILGUEIRAS, S. M. S. **Aglutinantes para briquetagem de carvão vegetal**. Brasília, DF: Laboratório de Produtos Florestais, Departamento de Pesquisas, Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal. 1984. 8 p.
- FONTES, P. J. P.; QUIRINO, W. F.; OKINO, E. Y. **Aspectos técnicos da briquetagem de carvão vegetal no Brasil**. Brasília, DF: Laboratório de Produtos Florestais - LPF. 1987. p. 1-14. (Série Técnica nº 1)
- INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL - IBDF, **Programa de Briquetagem do Laboratório de Produtos Florestais - LPF**. Brasília, DF. 1985. 14p.
- JANKOWSKY, I. P.; LEPAGE, E. S. O creosoto de *Eucalyptus* spp. como preservativo de madeiras. **Revista IPEF**. Piracicaba, 33: 47-57, 1986.
- KUMAREK RESEARCH. **The briquetting process**. K. R. Anniston, s.d. 38 p.
- LEPAGE, E.S. Preservativos e sistemas preservativos. In: LEPAGE, E.S. coord. **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT. v. 1. 1986. p. 279-342.
- MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. In: **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. v. 1. p. 9-26.
- MATOS, M.; ALMEIDA, M.R.; OLIVEIRA, L. P. Características dos produtos de carbonização da madeira. In: PENEDO, W. R. **Gaseificação de madeiras e carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 35-43.
- MELO, V. P. S. **Produção de briquetes de carvão vegetal com alcatrão de madeira**. Viçosa: UFV, 53 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, 2000.
- MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle da qualidade do carvão vegetal. In: **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC. 1982. p. 281-318.
- MESSMAN, H. C.; TIBBETTS, T. E. **Elements of briquetting and agglomeration**. Canadá: Institute for Briquetting and Agglomeration, 1977. 105 p.

- MORO, J. P.. Briquetagem de finos de carvão vegetal. In: **Anais da 2ª Jornada de Engenharia dos Países de Língua Oficial Portuguesa**. Rio de Janeiro, 1987. v. 1. p. 1-14.
- MOTTER, C. Aproveitamento dos finos de carvão vegetal para produção de briquetes de uso siderúrgico. In: **CONGRESSO ANUAL DA ABM**. 34. Porto Alegre, 1979.
- OLIVEIRA, J. B.; FILHO, A. V.; MENDES, M. G.; GOMES, P. A. Produção de carvão vegetal - aspectos técnicos. In PENEDO, W. R. **Produção e utilização do carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 52-74.
- PASA, V. M. D. **Piche de alcatrão de *eucalyptus*: Obtenção, caracterização e desenvolvimento de aplicações**. Belo Horizonte: UFMG. (Dissertação de Mestrado em Química). Universidade Federal de Minas Gerais, 1994. 227 p.
- QUIRINO, F. Q.; DIAS, H. A. Teste de acendimento de briquetes de carvão vegetal para uso doméstico. In: **Congresso Brasileiro de Energia**, 5. Rio de Janeiro, 1986.
- QUIRINO, W. F. **Característica e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Piracicaba: ESALQ. (Dissertação de Mestrado em Ciência Florestal). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1991. 64 p.
- SALEME, J. E. F. **Estudo básico para briquetagem do carvão vegetal**. Ouro Preto: Escola de Minas e Metalurgia, s.d. 19 p.
- SILVEIRA, R.C.; CAMPOS, V.F. Utilização de finos de carvão vegetal. In: Simpósio sobre Siderurgia Brasileira e Matérias Primas, 1977, Salvador. **Anais...** Salvador: Acesita, 1977. Não paginado.
- SIQUEIRA, A. B.; SCHARLE, E. A. Processos de recuperação de alcatrão em fornos de alvenaria. In: PENEDO, W. R. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p.181-88.
- WENZL, H. F. J. **The chemical technology of wood**. New York: Academic Press, 1970. 692 p.
- YANTORNO, J.A. La industria de la distilación de leña y sus derivados. **Aires. Imp. Iseley**. 1933. 661 p.

APÊNDICE

Quadro 1A. Resumo da análise de variância

FV	GL	Quadrado Médio							
		MV	CF	DA	DV	PO	CR	PC	
PICHE (P)	3	2,5595 **	10,2049 **	$1,7254 \cdot 10^{-2}$ **	$2,4784 \cdot 10^{-2}$ *	233,4175 **	5.015,7770 **	25.290,91 **	
GRAN. (G)	1	2,5661 *	2,3800 ns	$4,2160 \cdot 10^{-3}$ **	$2,0228 \cdot 10^{-1}$ **	162,4330 **	325,1250 *	21.899,60 **	
PROP. (R)	1	0,2801 ns	3,4181 *	$1,0036 \cdot 10^{-1}$ **	$1,2211 \cdot 10^{-1}$ **	67,6971 *	20.200,5000 **	2.802,01 ns	
TEMP. (T)	1	2.805,2880 **	2.734,5800 **	$3,2400 \cdot 10^{-5}$ **	$4,9149 \cdot 10^{-1}$ **	850,3094 **	47.124,5000 **	1.144.976 **	
P x G	3	1,7862 *	9,0394 **	$1,7847 \cdot 10^{-3}$ **	$1,5471 \cdot 10^{-2}$ ns	22,8583 ns	1.477,4860 **	47.431,83 **	
P x R	3	0,5692 ns	2,4297 *	$7,1533 \cdot 10^{-4}$ **	$7,9750 \cdot 10^{-3}$ ns	29,7186 ns	926,9443 **	2.051,64 ns	
P x T	3	6,1796 **	7,8007 **	$5,0493 \cdot 10^{-3}$ **	$1,4042 \cdot 10^{-2}$ ns	18,8907 ns	5.287,1670 **	3.929,36 *	
G x R	1	0,0690 ns	4,1160 *	$1,3450 \cdot 10^{-3}$ **	$2,0027 \cdot 10^{-2}$ ns	70,8225 *	325,1250 *	34.301,24 **	
G x T	1	16,7320 **	14,7730 **	$9,4300 \cdot 10^{-4}$ **	$6,9670 \cdot 10^{-2}$ **	135,5355 **	861,1250 **	128.524,10 **	
R x T	1	0,3425 ns	4,4360 **	$6,8800 \cdot 10^{-4}$ **	$1,5298 \cdot 10^{-1}$ **	354,9850 **	2.450,0000 **	199,09 ns	
P x G x R	3	2,4500 *	0,8588 ns	$7,1500 \cdot 10^{-4}$ **	$1,1237 \cdot 10^{-3}$ ns	10,9529 ns	627,9307 **	2.473,66 ns	
P x G x T	3	4,7180 **	8,7115 **	$2,1040 \cdot 10^{-3}$ **	$7,6459 \cdot 10^{-2}$ **	218,4974 **	522,7083 **	38.537,50 **	
P x R x T	3	0,9671 ns	1,2288 ns	$4,2800 \cdot 10^{-4}$ **	$8,9603 \cdot 10^{-3}$ ns	29,5266 ns	900,4443 **	6.417,54 **	
G x R x T	1	2,1529 ns	0,0240 ns	$2,0200 \cdot 10^{-4}$ **	$1,2018 \cdot 10^{-2}$ ns	16,8641 ns	1.225,1250 **	356,74 ns	
PxGRxT	3	1,5501 ns	0,3489 ns	$1,1233 \cdot 10^{-4}$ **	$5,6567 \cdot 10^{-4}$ ns	3,1545 ns	345,1527 **	1.837,72 ns	
RESÍDUO	96	0,6102	0,6347	$7,3479 \cdot 10^{-7}$	$6,2156 \cdot 10^{-3}$	15,6814	67,1873	1,029.78	
CV (%)		3,12	1,10	1,62	6,29	6,85	15,72	2,00	

* F significativo a 5% de probabilidade.

** F significativo a 1% de probabilidade.

ns não significativo.

Quadro 2A. Efeito da temperatura sobre a interação P x G x R

FV	GL	Quadrado médio									
		MV	CF	DA	DV	PO	CR	PC			
T/P _{LP} G ₄₀ R ₁	1	173,4485 **	204,7454 **	5,13.10 ⁻³ ns	0,2214 ns	207,6961 **	19.404,50 **	94.408,71 **			
T/P _{B2} G ₄₀ R ₁	1	308,4688 **	317,6071 **	7,19.10 ⁻⁴ ns	7,62.10 ⁻³ ns	0,2582 ns	1.200,50 **	23.226,70 **			
T/P _{B3} G ₄₀ R ₁	1	64,9745 **	51,4608 **	3,18.10 ⁻³ ns	3,59.10 ⁻² ns	136,8419 **	1.012,50 **	3.119,37 ns			
T/P _{MA} G ₄₀ R ₁	1	262,7316 **	212,3335 **	3,60.10 ⁻³ ns	1,17.10 ⁻² ns	60,0166 ns	12,50 ns	26.576,00 **			
T/P _{LP} G ₆₀ R ₁	1	175,9252 **	56,4103 **	2,60.10 ⁻² ns	3,96.10 ⁻² ns	380,4227 **	66.978,00 **	21.612,23 **			
T/P _{B2} G ₆₀ R ₁	1	187,0372 **	252,7914 **	2,14.10 ⁻³ ns	5,82.10 ⁻² ns	124,2800 **	1.458,00 **	224.102,80 **			
T/P _{B3} G ₆₀ R ₁	1	105,4722 **	119,5485 **	3,65.10 ⁻³ ns	4,41.10 ⁻² ns	6,0020 ns	84,50 ns	336.355,30 **			
T/P _{MA} G ₆₀ R ₁	1	157,4216 **	147,7287 **	1,52.10 ⁻³ ns	3,23.10 ⁻² ns	75,5175 *	612,50 **	54.265,00 **			
T/P _{LP} G ₄₀ R _{0,8}	1	248,7470 **	277,8132 **	7,77.10 ⁻⁴ ns	0,6779 ns	1.603,391 **	6.844,50 **	199.183,70 **			
T/P _{B2} G ₄₀ R _{0,8}	1	237,1984 **	254,3219 **	1,15.10 ⁻³ ns	8,41.10 ⁻² ns	188,9783 **	1.458,00 **	19.758,64 **			
T/P _{B3} G ₄₀ R _{0,8}	1	85,7310 **	85,5247 **	3,29.10 ⁻³ ns	2,04.10 ⁻² ns	96,9488 *	112,50 ns	28.191,53 **			
T/P _{MA} G ₄₀ R _{0,8}	1	348,7885 **	273,3943 **	7,70.10 ⁻³ ns	4,39.10 ⁻² ns	1,30.10 ⁻² ns	1.740,50 **	105.994,80 **			
T/P _{LP} G ₆₀ R _{0,8}	1	82,0731 **	75,5833 **	5,45.10 ⁻³ ns	5,29.10 ⁻⁴ ns	49,0499 ns	12.168,00 **	79.466,59 **			
T/P _{B2} G ₆₀ R _{0,8}	1	172,9465 **	222,7766 **	2,49.10 ⁻³ ns	0,2635 ns	667,5724 **	760,50 **	307.321,90 **			
T/P _{B3} G ₆₀ R _{0,8}	1	192,4440 **	228,5185 **	1,05.10 ⁻³ ns	1,1710 ⁻² ns	0,1660 ns	1.200,50 **	180.530,80 **			
T/P _{MA} G ₆₀ R _{0,8}	1	141,8403 **	136,0627 **	3,25.10 ⁻³ ns	0,1131 ns	191,1617 **	112,50 ns	26.441,02 **			
Resíduo	96	0,6102	0,6347	0,7054	0,6215	15,6814	67,1873	1.029,78			

* F significativo a 5% de probabilidade.

** F significativo a 1% de probabilidade.

^{ns} não significativo.

Quadro 3A. Efeito da granulometria sobre a interação T x P x R

FV	GL	Quadrado médio								
		MV	CF	DA	DV	PO	CR	PC		
G/T ₄₀₀ P _{LP} R ₁	1	0,5177 ^{ns}	0,1345 ^{ns}	2,27.10 ⁻³ ^{ns}	0,2970 ^{ns}	341,0600 ^{**}	8,0000 ^{ns}	20.499,38 ^{**}		
G/T ₄₀₀ P _{B2} R ₁	1	7,3739 ^{**}	0,6878 ^{ns}	3,97.10 ⁻⁴ ^{ns}	2,92.10 ⁻² ^{ns}	51,6707 ^{ns}	4,5000 ^{ns}	84.338,63 ^{**}		
G/T ₄₀₀ P _{B3} R ₁	1	8,41.10 ⁻³ ^{ns}	0,9396 ^{ns}	1,72.10 ⁻³ ^{ns}	8,54.10 ⁻² ^{ns}	57,6664 ^{ns}	3042,0000 ^{**}	1.817,47 ^{ns}		
G/T ₄₀₀ P _{MA} R ₁	1	0,1898 ^{ns}	0,3894 ^{ns}	8,20.10 ⁻⁵ ^{ns}	4,16.10 ⁻² ^{ns}	49,1222 ^{ns}	6160,5000 ^{**}	18.509,48 ^{**}		
G/T ₄₀₀ P _{LP} R _{0,8}	1	0,3941 ^{ns}	0,2406 ^{ns}	6,72.10 ⁻⁵ ^{ns}	0,4580 ^{ns}	1373,5430 ^{**}	2,0000 ^{ns}	50.479,32 ^{**}		
G/T ₄₀₀ P _{B2} R _{0,8}	1	3,3718 [*]	0,267 ^{ns}	1,26.10 ⁻³ ^{ns}	2,87.10 ⁻³ ^{ns}	81,6062 [*]	40,5000 ^{ns}	97.087,16 ^{**}		
G/T ₄₀₀ P _{B3} R _{0,8}	1	1,85.10 ⁻³ ^{ns}	0,06399 ^{ns}	8,00.10 ⁻⁴ ^{ns}	9,67.10 ⁻² ^{ns}	147,4574 ^{**}	144,5000 ^{ns}	59.638,74 ^{**}		
G/T ₄₀₀ P _{MA} R _{0,8}	1	24,1613 ^{**}	22,1956 ^{**}	3,34.10 ⁻³ ^{ns}	9,28.10 ⁻⁴ ^{ns}	10,6396 ^{ns}	98,0000 ^{ns}	11.592,39 ^{**}		
G/T ₅₀₀ P _{LP} R ₁	1	0,6613 ^{ns}	51,3381 ^{**}	1,88.10 ⁻² ^{ns}	1,55.10 ⁻² ^{ns}	238,6495 ^{**}	13612,500 ^{**}	92.066,76 ^{**}		
G/T ₅₀₀ P _{B2} R ₁	1	1,3727 ^{ns}	1,1942 ^{ns}	1,59.10 ⁻⁷ ^{ns}	2,49.10 ⁻² ^{ns}	19,9633 ^{ns}	2,0000 ^{ns}	935,19 ^{ns}		
G/T ₅₀₀ P _{B3} R ₁	1	5,2946 ^{**}	7,7889 ^{**}	1,41.10 ⁻³ ^{ns}	1,32.10 ⁻³ ^{ns}	2,7364 ^{ns}	1058,0000 ^{**}	231.821,30 ^{**}		
G/T ₅₀₀ P _{MA} R ₁	1	10,4107 ^{**}	3,2158 [*]	8,10.10 ⁻³ ^{ns}	7,09.10 ⁻³ ^{ns}	88,8947 [*]	2520,5000 ^{**}	42.426,34 ^{**}		
G/T ₅₀₀ P _{LP} R _{0,8}	1	37,0213 ^{**}	71,6457 ^{**}	2,93.10 ⁻³ ^{ns}	2,87.10 ⁻² ^{ns}	99,6920 [*]	840,5000 ^{**}	151.381,60 ^{**}		
G/T ₅₀₀ P _{B2} R _{0,8}	1	0,1715 ^{ns}	0,2551 ^{ns}	3,79.10 ⁻⁴ ^{ns}	2,88.10 ⁻² ^{ns}	9,3445 ^{ns}	18,0000 ^{ns}	10.447,42 ^{**}		
G/T ₅₀₀ P _{B3} R _{0,8}	1	21,6810 ^{**}	31,5384 ^{**}	1,09.10 ⁻⁵ ^{ns}	3,62.10 ⁻³ ^{ns}	3,5702 ^{ns}	144,5000 ^{ns}	121.509,40 ^{**}		
G/T ₅₀₀ P _{MA} R _{0,8}	1	3,4254 [*]	0,02522 ^{ns}	7,56.10 ⁻³ ^{ns}	2,47.10 ⁻² ^{ns}	109,2062 [*]	1800,0000 ^{**}	3.057,37 ^{ns}		
Resíduo	96	0,6102	0,6347	0,7054	0,6215	15,6814	67,1873	1.029,78		

* F significativo a 5% de probabilidade.

** F significativo a 1% de probabilidade.

^{ns} não significativo.

Quadro 4A. Efeito da proporção sobre a interação T x P x G

FV	GL	Quadrado médio							
		MV	CF	DA	DV	PO	CR	PC	
R/T ₄₀₀ P _{LP} G ₄₀	1	0,9589 ^{ns}	1,6730 ^{ns}	1,66.10 ⁻³ ^{ns}	0,1190 ^{ns}	366,5363 ^{**}	40,5000 ^{ns}	1.698,92 ^{ns}	
R/T ₄₀₀ P _{B2} G ₄₀	1	0,4514 ^{ns}	0,2699 ^{ns}	2,47.10 ⁻³ ^{ns}	0,1380 ^{ns}	92,2104 [*]	4,5000 ^{ns}	832,81 ^{ns}	
R/T ₄₀₀ P _{B3} G ₄₀	1	0,8173 ^{ns}	0,9148 ^{ns}	3,70.10 ⁻³ ^{ns}	6,48.10 ⁻⁴ ^{ns}	36,1977 ^{ns}	512,0000 ^{**}	37.421,46 ^{**}	
R/T ₄₀₀ P _{MA} G ₄₀	1	12,8999 ^{**}	10,8738 ^{**}	1,36.10 ⁻² ^{ns}	9,08.10 ⁻² ^{ns}	0,1633 ^{ns}	6160,5000 ^{**}	0,44 ^{ns}	
R/T ₄₀₀ P _{LP} G ₆₀	1	0,7877 ^{ns}	1,3683 ^{ns}	6,43.10 ⁻³ ^{ns}	4,52.10 ⁻² ^{ns}	0,3043 ^{ns}	4,5000 ^{ns}	1.622,64 ^{ns}	
R/T ₄₀₀ P _{B2} G ₆₀	1	4,30.10 ⁻² ^{ns}	4,28.10 ⁻² ^{ns}	1,16.10 ⁻³ ^{ns}	0,6450 ^{ns}	131,0568 ^{**}	40,5000 ^{ns}	2.503,54 ^{ns}	
R/T ₄₀₀ P _{B3} G ₆₀	1	0,9077 ^{ns}	5,76.10 ⁻² ^{ns}	1,71.10 ⁻² ^{ns}	1,95.10 ⁻³ ^{ns}	111,6366 ^{**}	8064,5000 ^{**}	66,13 ^{ns}	
R/T ₄₀₀ P _{MA} G ₆₀	1	0,7887 ^{ns}	0,6235 ^{ns}	4,63.10 ⁻³ ^{ns}	4,48.10 ⁻³ ^{ns}	11,1741 ^{ns}	98,0000 ^{ns}	843,59 ^{ns}	
R/T ₅₀₀ P _{LP} G ₄₀	1	12,8235 ^{**}	13,3388 ^{**}	7,15.10 ⁻³ ^{ns}	6,78.10 ⁻⁵ ^{ns}	42,0626 ^{ns}	3960,5000 ^{**}	32.492,97 ^{**}	
R/T ₅₀₀ P _{B2} G ₄₀	1	2,2205 ^{ns}	1,8346 ^{ns}	3,22.10 ⁻³ ^{ns}	3,81.10 ⁻⁵ ^{ns}	21,6456 ^{ns}	2,0000 ^{ns}	1.656,17 ^{ns}	
R/T ₅₀₀ P _{B3} G ₄₀	1	8,67.10 ⁻² ^{ns}	1,2497 ^{ns}	3,82.10 ⁻³ ^{ns}	4,53.10 ⁻⁴ ^{ns}	17,3453 ^{ns}	1922,0000 ^{**}	918,60 ^{ns}	
R/T ₅₀₀ P _{MA} G ₄₀	1	1,2651 ^{ns}	1,7811 ^{ns}	7,93.10 ⁻³ ^{ns}	2,78.10 ⁻⁴ ^{ns}	55,6073 ^{ns}	1104,5000 ^{**}	26.206,36 ^{**}	
R/T ₅₀₀ P _{LP} G ₆₀	1	11,0006 ^{**}	5,5362 ^{**}	2,81.10 ⁻² ^{ns}	1,34.10 ⁻³ ^{ns}	142,7849 ^{**}	22684,5000 ^{**}	8.950,15 ^{**}	
R/T ₅₀₀ P _{B2} G ₆₀	1	0,5367 ^{ns}	0,5879 ^{ns}	1,42.10 ⁻³ ^{ns}	3,21.10 ⁻⁴ ^{ns}	10,5062 ^{ns}	18,0000 ^{ns}	9570,02 ^{ns}	
R/T ₅₀₀ P _{B3} G ₆₀	1	7,0209 ^{**}	15,5467 ^{**}	1,05.10 ⁻² ^{ns}	6,36.10 ⁻⁶ ^{ns}	59,4207 ^{ns}	4140,5000 ^{**}	26.635,74 ^{**}	
R/T ₅₀₀ P _{MA} G ₆₀	1	6,30.10 ⁻² ^{ns}	8,99.10 ⁻² ^{ns}	7,40.10 ⁻³ ^{ns}	8,06.10 ⁻³ ^{ns}	71,8902 [*]	648,0000 ^{**}	9.877,62 ^{**}	
Resíduo	96	0,6102	0,6347	0,7054	0,6215	15,6814	67,1873	1,029,78	

* F significativo a 5% de probabilidade.

** F significativo a 1% de probabilidade.

^{ns} não significativo.