

VICENTE DE PAULA SIMÕES DE MELO

**PRODUÇÃO DE BRIQUETES DE CARVÃO VEGETAL COM ALCATRÃO
DE MADEIRA**

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
JUNHO - 2000

VICENTE DE PAULA SIMÕES DE MELO

**PRODUÇÃO DE BRIQUETES DE CARVÃO VEGETAL COM ALCATRÃO
DE MADEIRA**

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: 15 de setembro de 1999.

Prof. Benedito Rocha Vital
(Conselheiro)

Prof. Osvaldo Ferreira Valente
(Conselheiro)

Prof. Juarez Benigno Paes

Prof. Ricardo Marius Della Lucia

Prof. Alexandre Santos Pimenta
(Orientador)

A Deus.

A meus pais, Simão Alves de Melo (“*in memoriam*”) .
e Inácia Simões de Melo.

À minha noiva Francisca Carvalho Leite.

A meus irmãos.

A meus primos.

A meus amigos.

AGRADECIMENTO

A Deus, pela ajuda concedida, principalmente, nos momentos mais difíceis, pois sem Ele eu não teria chegado onde estou.

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

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos.

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

Aos Professores conselheiros Benedito Rocha Vital e Osvaldo Ferreira Valente, pelas sugestões e pelos esclarecimentos para este trabalho.

Aos Professores Ricardo Marius Della Lucia e Juarez Benigno Paes, integrantes da comissão examinadora.

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

Aos funcionários do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira Aristeu, Hésio e Maninho, pelos trabalhos prestados durante a coleta dos dados.

À secretária do Curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal Rita de Cássia Silva Alves, pelos serviços prestados, pela amizade e por seu exemplo de vida.

Em especial, à minha noiva Francisca Carvalho Leite, pelo amor, pela compreensão e por estar a meu lado em todas as circunstâncias.

Ao meu pai Simão Alves de Melo (*“in memoriam”*), cujo exemplo ensinou-me a ser um sobrevivente, e à minha mãe, pelo exemplo de humildade.

Aos amigos de república Aderbal Gomes, Nelson Carminate e Manoel Brum, pela compreensão e pela amizade.

Aos amigos do curso de Pós-Graduação Cristina, Adelson, Adriana, Crístian, Adalberto, Ademar, Zé Luiz, Cássia, Euzimar, Fábio Akira, Álvaro Shimada, Glauco, Aderlan, Luizinho, Elcione, Fernando, Kátia, Rosane, Cristovão e Daniel, pela amizade que sempre me dedicaram.

BIOGRAFIA

VICENTE DE PAULA SIMÕES DE MELO, filho de Simão Alves de Melo e Inácia Simões de Melo, nasceu em 21 de agosto de 1962, em Patos - PB.

Em março de 1983, ingressou no curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal da Paraíba, graduando-se em janeiro de 1989.

Em 1992/93, trabalhou como prestador de serviços na Caixa Econômica Federal, e, no período de junho de 1994 a abril de 1995, no Banco do Brasil, em Patos-PB.

No período de junho de 1994 a abril de 1995, estagiou no Banco do Brasil como Operador de Microfilmagem, em Patos-PB.

Em maio de 1995, iniciou o Curso de Especialização em Tecnologia da Madeira no Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, em Manaus - AM, tendo concluído em dezembro de 1995.

No período entre março de 1996 e março de 1997, trabalhou como Professor Substituto (concurado) na área de Tecnologia de Produtos Florestais, na Universidade Federal da Paraíba, em Patos-PB.

Em março de 1997, ingressou no Curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG, defendendo tese em março de 2000.

CONTEÚDO

	Página
EXTRATO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Briquetagem	3
2.1.1. Definição e histórico	3
2.1.2. Briquetagem com a utilização de aglutinantes	4
2.2. Tipos de aglutinantes	6
2.3. Equipamentos utilizados na confecção dos briquetes.....	7
2.3.1. Prensas de extrusão.....	7
2.3.2. Prensas de cilindros giratórios.....	8
2.4. Qualidade e uso dos briquetes.....	9
2.5. Alcatrão vegetal.....	12
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1. Destilação do alcatrão	14
3.2. Amostragem do carvão para a confecção dos briquetes	15
3.3. Confecção dos briquetes.....	15
3.4. Tratamento térmico dos briquetes.....	16
3.5. Características dos briquetes produzidos.....	17
3.5.1. Resistência à compressão.....	17
3.5.2. Densidade relativa aparente.....	17
3.5.3. Densidade verdadeira	17
3.5.4. Análise química imediata.....	17
3.5.5. Porosidade	18

	Página
3.5.6. Poder calorífico.....	18
3.5.7. Delineamento experimental e análise estatística.....	18
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4.1. Teor de matérias voláteis	20
4.2. Teor de cinzas.....	22
4.3. Teor de carbono fixo	23
4.4. Densidade relativa aparente.....	26
4.5. Densidade verdadeira	28
4.6. Porosidade	30
4.7. Resistência à compressão	31
4.8. Poder calorífico	33
5. RESUMO E CONCLUSÕES	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39
APÊNDICES	42
APÊNDICE A	43
APÊNDICE B	46

EXTRATO

MELO, Vicente de Paula Simões de, M.S., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2000. **Produção de briquetes de carvão vegetal com alcatrão de madeira.** Orientador: Alexandre Santos Pimenta. Conselheiros: Benedito Rocha Vital e Osvaldo Ferreira Valente.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade dos briquetes produzidos utilizando os finos de carvão vegetal e como aglutinante o alcatrão de madeira anidro. Foram utilizados os seguintes parâmetros para a produção dos briquetes: cinco granulometrias (14; 20; 40; e 60 “mesh” e uma mista, sendo que esta foi obtida por meio da mistura de partes iguais das demais granulometrias), quatro proporções de alcatrão (0,3; 0,5; 0,7; e 0,9 partes de alcatrão para uma parte de carvão vegetal) e três pressões de compactação (195; 260 e 325 kgf/cm²). A avaliação da qualidade dos briquetes foi feita por meio da análise química imediata, determinando-se os teores de matérias voláteis, cinzas e carbono fixo e propriedades físico-mecânicas, determinando-se a densidade aparente, a densidade verdadeira, a porosidade, a resistência à compressão e o poder calorífico. Os resultados mostraram que os briquetes produzidos com os finos de carvão vegetal na granulometria de

60 “mesh”, com proporção de alcatrão de 0,7 e pressão de compactação de 325 kgf/cm², foram os que apresentaram os melhores resultados, ou seja, maior teor de carbono fixo, menor teor de matérias voláteis, menor teor de cinzas e maiores densidade aparente e verdadeira, maior poder calorífico, maior tensão de ruptura e maior porosidade.

ABSTRACT

MELO, Vicente de Paula Simões de, M.S. Universidade Federal de Viçosa, June, 2000. **Production of charcoal briquettes with wood tar.** Adviser: Alexandre Santos Pimenta. Committee Members: Benedito Rocha Vital and Osvaldo Ferreira Valente.

The objective of the present work was to evaluate the quality of the briquettes produced using the charcoal residues, and, as agglutinant the anhydrous wood tar. The following parameters were used for the production of the briquettes: five granulometries (14; 20; 40; 60 mesh and one was a mixture of these in equal parts); four proportions of tar (0.3; 0.5; 0.7 and 0.9 parts of tar to each part of charcoal), and three compactation pressures (195; 260 and 325 kgf/cm²). The evaluation of the their quality was made by means of an immediate chemical analysis, the contents of volatile matters, ashes and fixed carbon were verified, and also the actual and apparent densities, porosity, compression resistance and heat capacity. The results showed that the briquettes produced with the charcoal residues of the 60 mesh granulometry with a proportion of 0.7 of tar and a compactation pressure of 325 kgf/cm² were those that presented the best performances, or, a greater content of fixed carbon, smaller contents of volatile matters and ashes and a greater actual and apparent densities, a greater heat capacity, greater rupture tension and porosity.

1. INTRODUÇÃO

Os combustíveis sólidos sempre foram uma fonte energética de grande importância na história da humanidade. A lenha é utilizada desde os períodos pré-históricos, enquanto que os carvões vegetal e mineral foram utilizados em grande escala nos séculos XVIII e XIX durante a revolução industrial. Já no século XX, ao lado desses combustíveis sólidos tradicionais, novas formas de energia tomaram grandes proporções em termos de consumo, como os derivados de petróleo, energia hidráulica e nuclear (MARTINS, 1980).

Dentre os combustíveis sólidos renováveis, a lenha e o carvão vegetal apresentam consumo relativamente elevado, principalmente nos setores residencial e industrial, em que a lenha aparece com respectivamente 28 e 8% do consumo total do setor e o carvão vegetal com um valor de 7% do consumo no setor industrial onde, ao lado do coque redutor importado é utilizado principalmente em siderúrgicas como redutor na produção de aço (BEZZON, 1994).

Em decorrência das maiores dimensões de seu parque industrial, a Região Sudeste é a maior consumidora e produtora de lenha e carvão vegetal, o que leva à exploração da madeira em áreas próximas aos grandes centros. Essa retirada contínua de madeira durante vários anos consumiu grande parte da mata nativa, principalmente dos Estados de São Paulo e Minas Gerais, forçando os consumidores a buscar madeira nativa em lugares distantes, resultando em maiores custos financeiros e prejuízos ecológicos para as regiões de exploração.

Uma das soluções para este problema é o reflorestamento, cultivando-se florestas em áreas já desmatadas com árvores que apresentam um ciclo de corte entre 7 e 10 anos, uma vez que uma floresta nativa possui um tempo de regeneração muito longo, normalmente, entre 50 e 80 anos (BRASIL, 1984). O reflorestamento já é praticado em áreas da Região Sudeste, mas ainda não em suficientes proporções para substituir totalmente a exploração de matas nativas.

Segundo dados da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS RENOVÁVEIS - ABRACAVE (1998), o Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal, produzindo, segundo o Balanço Energético Nacional, 33 milhões de toneladas por ano. Este insumo energético é, em grande parte, utilizado pelo setor industrial brasileiro, principalmente o segmento siderúrgico com 83% do consumo nacional. De acordo com FONTES et al. (1989), o carvão vegetal, apesar de ser um excelente combustível e de larga aplicação, possui algumas características e propriedades desfavoráveis tais como a baixa densidade, a friabilidade e a desuniformidade granulométrica que restringem sua utilização em certos casos.

O carvão vegetal gera na fase de produção, no transporte, no manuseio e no peneiramento nas usinas siderúrgicas uma quantidade elevada de finos, podendo chegar a 25% do total produzido e, em alguns casos, apresenta dificuldade e, ou, inviabilidade de seu aproveitamento. Esses finos representam hoje mais de 2 milhões de toneladas por ano. Através do processo de briquetagem do carvão vegetal com uso de aglutinantes, ou seja, técnica que envolve balanceamento granulométrico, mistura proporcional de aglutinantes, compactação, coqueificação e, ou, secagem, consegue-se o aproveitamento dos finos de carvão na forma de um combustível de melhor densidade, mais homogêneo, granulometria uniforme, mantendo-se as características do carvão, facilitando o manuseio, a estocagem e a utilização do mesmo, permitindo o seu transporte a maiores distâncias (FONTES et al., 1989).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da granulometria, da pressão de compactação e da proporção de aglutinantes na qualidade química e em algumas propriedades físico-mecânicas dos briquetes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em geral, a utilização do resíduo agroflorestal como combustível possui baixa eficiência energética, sendo necessário na maioria dos casos a utilização de processos industriais para corrigir algumas propriedades tais como baixa densidade, elevada umidade e baixo poder calorífico.

O carvão vegetal, em virtude da sua alta friabilidade, gera finos provenientes de sua quebra durante a produção, o transporte e o manuseio e que podem chegar a 25% do total produzido (ANTUNES, 1982). Os finos abaixo de 6mm não são carregados no alto-forno e em muitas siderúrgicas se acumulam como resíduos. Dessa forma, para ser possível a utilização desses finos em siderurgias é necessário compactá-los para dar-lhes a forma e a resistência necessárias.

2.1. Briquetagem

2.1.1. Definição e histórico

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

A aglomeração manual de finos teve início com o carvão mineral na China e na Inglaterra, com a utilização de ligantes de origem mineral, vegetal e até mesmo animal. A fabricação comercial mecanizada de briquetes de carvão mineral originou-se na França, em 1842. Até a Segunda Guerra Mundial foram produzidas grandes quantidades em diversos países da Europa, sendo utilizados em fornos e caldeiras. Em 1915 foi realizada pela primeira vez a briquetagem do carvão vegetal em uma fábrica no Tennessee, EUA, que produzia metanol pela destilação destrutiva da madeira, em que os finos de carvão vegetal, subprodutos do processo, eram briquetados usando-se alcatrão de madeira como aglutinante.

Outra usina de briquetagem foi construída muitos anos depois pela “Ford Motor Co”, em Michigan, EUA, em que as matérias-primas eram aparas de madeira. As aparas eram carbonizadas, o carvão moído e briquetado, utilizando como ligante amido e água (ANTUNES, 1982).

Atualmente, ocorre em larga escala a produção de briquetes de finos de carvão mineral e vegetal e de resíduos agroflorestais nos EUA e nos países da Europa e do Sudeste Asiático.

2.1.2. Briquetagem com a utilização de aglutinantes

Esse processo pode ser utilizado para a briquetagem de finos de carvão vegetal ou carvão proveniente da carbonização de resíduos agroflorestais tais como bagaço, palha de cana, serragem, entre outros.

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

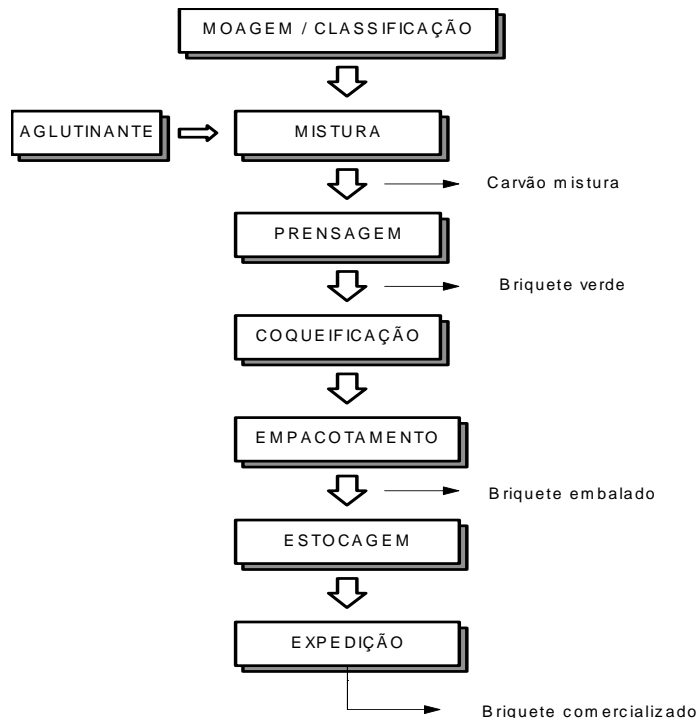
- **Moagem do carvão:** a moagem é necessária para evitar partículas muito grandes que prejudiquem a ação dos materiais ligantes. Normalmente, são utilizados moinhos de martelo e a faixa granulométrica ideal, geralmente, é abaixo de 3 mm, sendo função da natureza do carvão, do tipo de prensa, da forma e do tamanho do briquete.

- **Mistura com o aglutinante:** o aglutinante é um material que tem a função de unir as partículas do carvão. A escolha do tipo e da quantidade de aglutinante é o ponto mais crítico na manufatura dos briquetes, sendo a etapa mais sensível aos custos do processo.

- **Prensagem:** a briquetagem propriamente dita resulta da aplicação de pressão, em que prensas sobre a massa de carvão e o ligante fazem com que o briquete adquira resistência e formato geométrico definidos. Deve ser realizado o aquecimento simultâneo de acordo com o ligante utilizado.

- **Secagem:** alguns ligantes são adicionados com água ao briquete, proporcionando uma umidade alta ao produto final. Por esse motivo eles devem ser secos, o que geralmente é conseguido com a passagem de ar quente e seco.

- **Estocagem e embalagem:** os briquetes são armazenados em silos de estocagem dimensionados para manter um estoque intermediário entre a produção e a distribuição. Em seguida, são empacotados para consumo. Um fluxograma da produção de briquetes de finos de carvão vegetal é apresentado na Figura 1.



Fonte: MARSOLLA (1998).

Figura 1 - Fluxograma da produção de briquetes de finos de carvão vegetal.

2.2. Tipos de aglutinantes

A escolha do aglutinante a ser utilizado é função do custo e do uso a ser dado ao briquete. Geralmente, os aglutinantes são bem mais caros que o carvão, sendo necessário um balanço entre as quantidades destes componentes, a fim de se conseguir um produto economicamente viável.

Segundo SALEME (19--), as principais características dos aglutinantes devem ser: alta taxa aglomerante; inexistência de material inerte em sua composição; barato e abundante; simplicidade de uso; alta resistência mecânica; resistência à umidade; e boas condições de operacionalidade.

Em alguns aglutinantes podem ocorrer reações químicas com o material compactado que conferem boas características ao briquete, como é o caso da cal e do melão que reagem com o carvão formando uma camada de proteção à água. Outros aglutinantes podem ter propriedades lubrificantes e funcionam reduzindo a fricção entre partículas aumentando a compactação, servindo também como um agente intermediário entre o briquete e as ferramentas. Alguns exemplos são: óleos, amido seco, talco, ceras e grafite (SALEME, 19--).

Segundo Kural, citado por BEZZON (1994), os aglutinantes mais utilizados no processo de briquetagem são: piche, fração mais pesada resultante da destilação do alcatrão mineral ou vegetal, é uma matéria-prima indispensável com numerosas aplicações na briquetagem, possui composição complexa com massas moleculares que variam de poucas centenas a milhares de unidades. Deve-se ressaltar que o alcatrão mineral também é usado em plantas de briquetagem; betumes e asfaltos, que são uma fração pesada resultante da destilação do petróleo, têm boas propriedades ligantes, sendo os briquetes produzidos à prova de intempéries com a desvantagem de aumentar um pouco a quantidade de cinzas. Toleram maior umidade que o piche. Os principais problemas de utilização são as suas propriedades cancerígenas e de poluição do ar; Licor Kraft é o resíduo obtido em grande quantidade quando a celulose é produzida usando processos sulfíticos. Este aglutinante produz briquetes com alta resistência por causa das consideráveis propriedades adesivas da lignina, tendo como principais desvantagens alta concentração de enxofre, baixa resistência à água e difícil ignição; amido, o grande poder

adesivo deste aglutinante 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 do amido seco torna-se possível o uso de briquetes com matéria-prima com alta umidade, já que aproximadamente 8% de água é usado para a produção da suspensão de amido. A desvantagem desse ligante é o seu alto preço, o que limita a sua utilização industrial. A cal possui grande aplicação porque é relativamente barato e abundante. A produção de briquetes com cal envolve a conversão do hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 e do dióxido de carbono CO_2 a carbonato de cálcio (CaCO_3), endurecendo os briquetes.

2.3. Equipamentos utilizados na confecção dos briquetes

O principal equipamento em uma unidade de briquetagem é a prensa, que tem a função de realizar a união do carvão com o aglutinante. Com isso, o briquete adquire resistência mecânica, formato geométrico definido que na maioria dos casos é acompanhado de um aumento na densidade em relação ao material inicial.

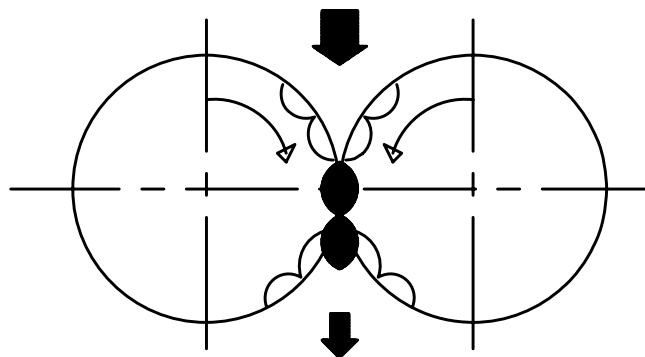
Segundo Kural, citado por BEZZON (1994), os principais tipos de prensas utilizadas são as prensas de extrusão e as de rolos.

2.3.1. Prensas de extrusão

As 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 vinda do virabrequim. O pistão serve como uma ferramenta de pressão com a função de pressionar o briquete no canal molde (matriz). Cada golpe compacta a mistura carvão-aglutinante ao longo do canal. Atualmente, a Alemanha utiliza este tipo de prensa na produção de briquetes, mas sua utilização data da Segunda Guerra Mundial, em virtude da escassez de combustível naquele período, em que houve a necessidade de se procurar novas alternativas para o problema energético do país.

2.3.2. Prensas de cilindros giratórios

Provavelmente, representam os mais conhecidos tipos de prensa, sendo utilizadas em países industrializados para briquetes com ligante e uma 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 panela de distribuição e um alimentador ou por 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 formas dos briquetes nesse 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, gerando baixo índice de vazios na estocagem e permitindo a fácil manutenção dos cilindros. O maior produtor de briquetes que utiliza este equipamento são os EUA, principalmente nos Estados da Carolina do Norte e Carolina do Sul, que visam basicamente o mercado comercial e doméstico (ANTUNES, 1982). Um esquema da prensa de cilindros giratórios é apresentado na Figura 2.



FONTE: BEZZON (1994)

Figura 2 - Esquema da prensa de cilindros giratórios com diâmetros iguais.

Na indústria de briquetagem, além da prensa, há vários outros equipamentos importantes como secadores da matéria-prima, secadores para o briquete, misturadores, correias transportadoras, sistemas de suprimento do carvão e carregamento do produto final, sistemas de moagem e pátio de armazenamento da matéria-prima e dos briquetes produzidos.

De acordo com BHATTACHARYA (1990), a produção e o consumo de briquetes de finos de carvão já estão consolidados nos EUA e em alguns países da Europa, que possuem um mercado específico para esses combustíveis, bem como para alguns países do Sudeste Asiático que produzem briquetes de resíduos agroflorestais em escala industrial. No Brasil, a situação é favorável por causa das grandes quantidades desses resíduos que são desperdiçados anualmente e que se processados pela compactação poderiam competir no mercado com outros combustíveis semelhantes. Já é realizada a compactação de serragem proveniente de indústria madeireira em escala industrial, visando o mercado doméstico e comercial tais como padarias, pizzarias, restaurantes, entre outros, e a geração de vapor em algumas indústrias têxteis e alimentícias, principalmente nos estados do Sul do país. As principais vantagens do briquete estão no fornecimento regular, no formato geométrico definido, na facilidade de armazenamento e nas propriedades uniformes (umidade e poder calorífico).

2.4. Qualidade e uso dos briquetes

A idéia de briquetar finos de carvão vegetal no Brasil começou com o desenvolvimento do setor industrial no país e com a expansão da siderurgia a carvão vegetal.

Com a prática da seleção da granulometria do carvão vegetal, antes da utilização nos fornos de redução siderúrgica, um volume considerável de finos é acumulado. Além da baixa granulometria, esses finos possuem restrições qualitativas pelas impurezas contidas e pela própria natureza do material de origem, carvões frágeis e de cascas, que, no entanto, não inviabilizam sua utilização na briquetagem, porém constituem mais uma fonte de variação na qualidade do briquete produzido (BRITO, 1986).

A briquetagem é uma das opções de aproveitamento do expressivo volume de finos gerados no transporte e no peneiramento do carvão vegetal. Segundo SILVEIRA e CAMPOS (1977), essa quantidade pode variar em função da qualidade do carvão e da exigência de granulometria mínima característica de cada tipo de equipamento de redução.

Um dos primeiros trabalhos no Brasil com briquetagem, publicado por Oliveira et al., citado por QUIRINO (1991), obteve interessantes resultados utilizando como ligante alcatrão vegetal natural e destilado, ao qual denominou BOP (breu + óleos pesados). Observaram a necessidade de adequar a distribuição granulométrica da moinha ou pó de carvão vegetal e a importância do tratamento térmico durante e após prensagem, o qual influencia a qualidade do briquete.

BROSCH e FURUNO (1968) testaram a briquetagem de finos de carvão vegetal utilizando o melaço como aglomerante. Concluíram que a proporção de 40% de melaço para 60% de carvão mineral era satisfatória e que a separação hidrogravimétrica permite apreciável enriquecimento da “moinha” em carbono, reduzindo a porcentagem de cinzas.

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 sintetização de minério de ferro. Uma das opções mencionadas seria a de compactação usando o briquete como redutor. Ressaltaram que a uniformidade granulométrica do briquete permitiria uma distribuição do fluxo gasoso mais uniforme na carga e que a maior densidade do briquete conduziria a um menor consumo específico de carbono. O briquete deveria ter, entretanto, 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 em Minas Gerais, chegou às seguintes conclusões:

- O melaço torna o briquete muito higroscópico, causando problemas na estocagem e necessitando de tratamento térmico;
- A desvolatilização da moinha antes da briquetagem diminui o consumo de aglutinante na produção de briquetes; e

- O briquete de maior resistência à compressão, maior teor de carbono fixo e menos higroscópico foi conseguido com melação em pó, no entanto, apresentou menor reatividade.

Foram testados, em diferentes fornos de redução, 340 toneladas de briquetes, conseguindo-se, segundo MOTTER (1979), 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 interessante, considerando-se que a geração de finos está próxima dessa proporção em relação ao carvão vegetal. Esse mesmo autor estabeleceu que o briquete siderúrgico deveria satisfazer aos seguintes requisitos: teor de cinzas abaixo de 12%; teor de matérias voláteis abaixo de 15%; teor de carbono fixo acima de 73%; teor de enxofre abaixo de 0,5%; e resistência mecânica à compressão superior a 70 kg/cm².

Segundo QUIRINO (1991), os briquetes aglutinados com amido não são adequados para uso industrial. Os briquetes, usando 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, estes briquetes possuem um custo mais elevado de produção. O mesmo autor comenta que é possível adicionar materiais tais como ceras, nitrato de sódio, argila, sílica e outros na composição dos briquetes, objetivando diminuir custos, melhorar a combustão, assim como algumas características físico-químicas dos briquetes. MESSMAN e TIBBETTS (1977) afirmam que é possível adicionar produtos combinados aos aglomerantes com os objetivos de facilitar a ignição, prolongar a queima e aumentar a densidade e a resistência do briquete.

A qualidade dos briquetes, segundo Komarek Research (s.d.), citado por QUIRINO (1991), é avaliada por algumas propriedades peculiares dos mesmos ou com base em algumas de suas características de comportamento durante o uso, como por exemplo a capacidade de ignição dos briquetes, que é avaliada segundo a norma ASTM - D 2677. QUIRINO (1986) sugere uma adaptação dessa norma, afirmando ser a ignição uma das propriedades que representa um item de fundamental importância na utilização doméstica do briquete, justificando que a norma americana restringe-se a briquetes em forma de almofada.

QUIRINO (1991) ressalta, também, que os briquetes podem ser avaliados quanto a sua resistência a absorção de umidade e soluções salinas, podendo também ser quantificada a reatividade dos mesmos. Entretanto, testes que avaliam as propriedades mecânicas são usualmente os mais empregados. A resistência à compressão determina a capacidade de empilhamento na estocagem. O teste de tamboramento ou índice de quebra e abrasão determina a resistência à abrasão provocada durante o transporte e o manuseio natural dos briquetes. Todos estes testes medem certos aspectos de qualidade dos briquetes, mas estes resultados devem ser interpretados com cuidado, pois 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 da briquetagem sempre esteve voltado para o aproveitamento dos finos de carvão vegetal oriundos da siderurgia, levando a maioria das pesquisas para o desenvolvimento de briquetes para usos nessa atividade.

2.5. Alcatrão vegetal

Segundo Mc. Neil, citado por PASA (1994), o alcatrão vegetal é uma mistura complexa contendo constituintes que possuem as mais variadas funções químicas, sendo que funcionam mais comumente como intermediários químicos em sínteses orgânicas. O termo alcatrão é utilizado para uma grande variedade de líquidos viscosos de coloração preta ou marrom, obtidos da destilação destrutiva de materiais orgânicos como alcatrão mineral, petróleo ou madeira. Sua composição química é complexa e constitui-se de uma mistura de compostos fenólicos e não-fenólicos.

Ainda, PASA (1994), em seus trabalhos, menciona que os processos utilizados para obtenção do alcatrão vegetal baseiam-se no aproveitamento das fumaças expelidas pelos fornos durante a carbonização da madeira. As fumaças dos fornos são aspiradas para o interior dos recuperadores de alcatrão e processadas por ciclonegens ou resfriamento. Uma parte da fumaça se condensa formando o líquido pirolenhoso e a outra escapa sob a forma de

gases. O líquido pirolenhoso, por sua vez, separa-se em duas fases, formando o ácido pirolenhoso e o alcatrão.

Com a crise energética mundial, as principais concessionárias florestais das siderurgias a carvão vegetal passaram a recuperar os destilados da carbonização, principalmente o alcatrão para fins energéticos. Porém, passada a crise, com a redução do preço do petróleo, essas empresas deixaram de recuperar esses destilados. Assim, considerando a produção nacional de carvão vegetal, existe uma infra-estrutura para a recuperação do alcatrão, o qual apresenta múltiplos usos de caráter renovável. Dependendo da tecnologia de carbonização e recuperação, obtém-se um rendimento em alcatrão de 300 kg/t de carvão para o sistema de carbonização contínua e de 70 -140 kg/t de carvão para o sistema de carbonização em fornos de alvenaria. Portanto, o potencial nacional de geração para as usinas integradas é de 140.000 - 800.000 t/ano de alcatrão para cada tonelada de carvão produzida, sem prejuízo para o rendimento gravimétrico do carvão (VALENTE e PEREIRA, 1982; PASA, 1994).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa.

3.1. Destilação do alcatrão

O alcatrão usado no presente trabalho originou-se das carbonizações dos fornos de alvenaria produzidos pela MANNESMANN FLORESTAL LTDA, no município de Curvelo, no Estado de Minas Gerais. As destilações do alcatrão foram feitas em balões de vidro com capacidade para 1,5 litro e, em uma manta aquecedora e um condensador “Liebig” de 40 cm de comprimento, refrigerados com água. Foram realizadas 15 destilações do alcatrão, com 2 horas e 30 minutos de duração cada.

Durante as destilações do alcatrão, pode-se observar que a fração aquosa contida no mesmo foi destilada na faixa de temperatura de 115 a 120 °C. Essas temperaturas foram coletadas com auxílio de um termômetro imerso nos balões de vidro. A manta aquecedora era desligada quando a temperatura do alcatrão atingia 180 °C, pois a esta temperatura, o destilado cessava de fluir. As águas ácidas e os óleos leves foram descartados, enquanto que o alcatrão anidro foi recolhido e armazenado e, posteriormente, usado como aglutinante na confecção dos briquetes.

3.2. Amostragem do carvão para a confecção dos briquetes

O carvão vegetal utilizado foi o da espécie *Eucalyptus urophylla*, com idade entre 7 e 8 anos, originário de carbonizações em retortas elétricas realizadas no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira. Foram selecionados 3 sacos de carvão vegetal num universo de 15 sacos. As amostras de carvão foram despejadas sobre uma lona plástica e homogeneizadas. Após a homogeneização foram retiradas amostras por meio de sucessivos quarteamentos. Essas amostras foram colocadas em uma caixa metálica e fragmentadas com auxílio de uma barra de ferro.

O carvão depois de fragmentado foi colocado em uma seqüência de peneiras, cada uma apresentando dimensões de 10, 14, 20, 40 e 60 “mesh”, para ser peneirado. Os finos de carvão vegetal que ficavam retidos na peneira de 10 mesh eram novamente colocados na caixa metálica para que fossem submetidos a uma nova quebra. Já os finos que ficavam retidos nas peneiras de 14, 20, 40 e 60 “mesh” foram coletados em sacos plásticos para serem usados na confecção dos briquetes. A granulometria mista foi obtida por meio da retirada de partes iguais das granulometrias de 14; 20; 40; e 60 “mesh”, usadas na pesquisa.

3.3. Confecção dos briquetes

A mistura carvão/alcatrão foi feita com auxílio de um misturador manual. Essa etapa é muito importante para que haja uma homogeneização uniforme entre as partículas de carvão e o alcatrão que foi usado como aglutinante.

Os briquetes foram produzidos em um tubo de aço medindo 30 cm de comprimento e 5,42 cm de diâmetro. A prensagem aplicada nos briquetes foi feita em uma máquina do tipo SCHWING SIWA, com capacidade para 15 toneladas. As pressões usadas na confecção dos mesmos foram de 4,5, 6,0 e 7,5 toneladas. Assim, como a área interna dos tubos de aço utilizados é igual a 23,01 cm², obtiveram-se pressões iguais a 195, 260 e 325 kgf/cm².

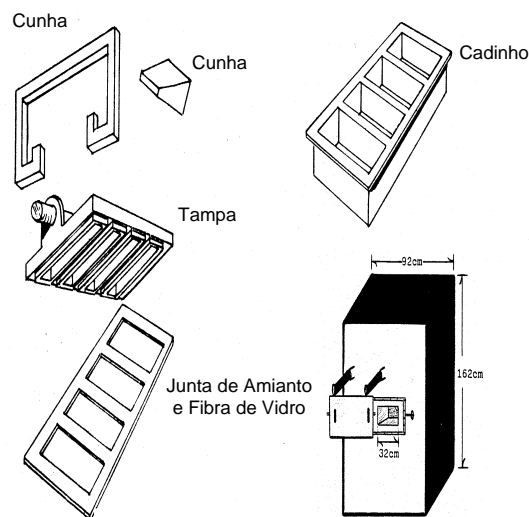
3.4. Tratamento térmico dos briquetes

Foram realizados sete tratamentos térmicos em retorta elétrica e conduzidos segundo a marcha apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 - Marcha dos tratamentos térmicos dos briquetes na retorta elétrica

Tempo (horas)	Temperatura (°C)
0 - 1,0	150
1,0 - 2,0	200
2,0 - 3,0	350
3,0 - 4,0	450

Os briquetes foram acondicionados em um cadinho metálico dotado de quatro divisões internas para que fossem submetidos a tratamentos térmicos na retorta elétrica. Um esquema da retorta elétrica e do cadinho metálico é apresentado na Figura 3.



Fonte: ANDRADE (1993)

Figura 3 - Esquema do cadinho metálico e da retorta elétrica utilizados nos tratamentos térmicos dos briquetes.

3.5. Características dos briquetes produzidos

3.5.1. Resistência à compressão

A resistência dos briquetes à compressão foi determinada para se prever o seu comportamento mecânico quando submetido a uma determinada carga ou esforço.

O teste de carga para avaliar a resistência à compressão dos briquetes foi realizado no Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira em máquina de testes universal do tipo LOSENHAUSEN. A carga foi aplicada na parte superior dos briquetes numa área de 5,1 cm². Esta área foi obtida ao usar uma forma com diâmetro de 2,60 cm nas partes superior e inferior. Os briquetes eram acondicionados na forma e lixados no sentido perpendicular, até atingir as extremidades do molde ou da forma.

3.5.2. Densidade relativa aparente

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

3.5.3. Densidade verdadeira

Para a determinação da densidade verdadeira utilizou-se o método do picnômetro, seguindo os passos das normas ASTM D-167/1973 e ISO 1014. As determinações foram feitas em duplicata respeitando-se as duas últimas casas decimais.

3.5.4. Análise química imediata

Foram realizadas análises imediatas com as determinações de umidade, matérias voláteis, teor de cinzas e carbono fixo, através da metodologia expressa na norma ASTM D - 1762/1964.

Para a análise química imediata é necessário determinar o teor de umidade dos briquetes, que foi calculado de acordo com a seguinte fórmula:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_f}$$

em que

U = Teor de umidade em base seca, em %;

m_i = Massa inicial da amostra de briquete, em gramas; e

m_f = Massa anidra da amostra de briquete, em gramas.

A determinação do teor de umidade foi feita em duplicata e os resultados não diferiram entre si, em valores absolutos, em mais de 5%.

3.5.5. Porosidade

A porosidade em porcentagem foi obtida pela relação entre as densidades aparente e verdadeira, pelo emprego da fórmula:

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

3.5.6. Poder calorífico

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

3.5.7. Delineamento experimental e análise estatística

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial, em que foram analisados o efeito de cinco granulometrias (14, 20, 40, 60 “mesh” e mista) e quatro proporções de alcatrão

(0,3; 0,5; 0,7; e 0,9) na qualidade dos briquetes produzidos nas pressões de compactação (195, 260 e 325 kgf/cm²). Utilizaram-se quatro repetições para a análise química imediata e duas para a análise físico-mecânica dos briquetes.

Os dados foram submetidos à análise de variância em nível de 5% de probabilidade e analisados pelo teste F e, quando significativo, ajustaram-se modelos de regressão para as granulometrias e as proporções de alcatrão para cada pressão de compactação. Nesse caso, o efeito das pressões de compactação para cada granulometria e proporção de alcatrão foi estudado por meio do teste F e, quando significativo, analisados pelo teste T. As médias para as análises realizadas foram observadas pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

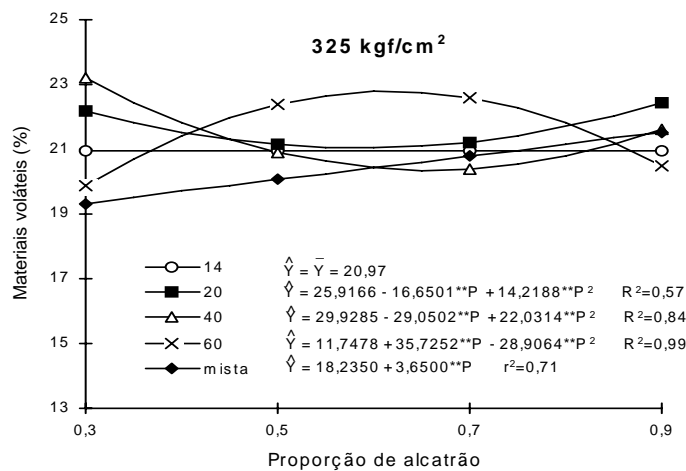
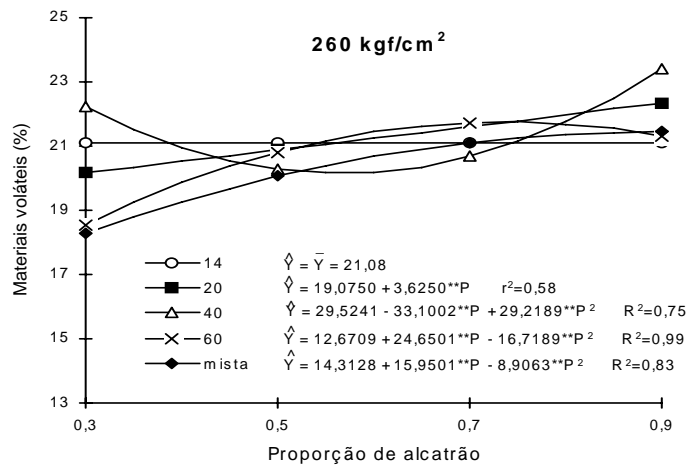
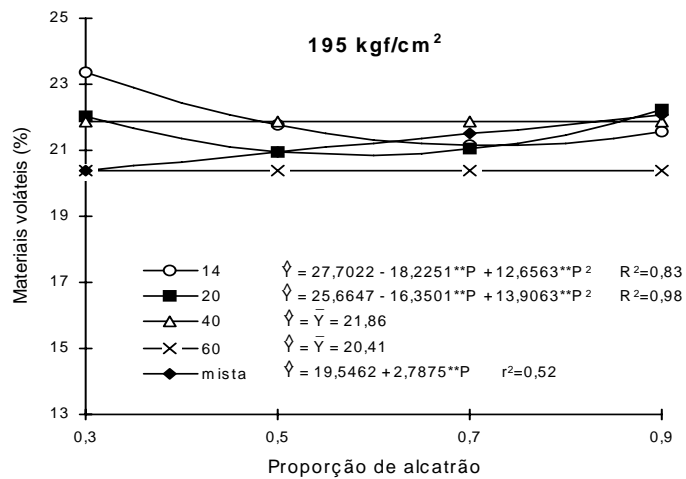
Serão apresentados e discutidos os resultados das análises química imediata (teor de matérias voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo) e das físico-mecânicas (densidade relativa aparente, densidade verdadeira, porosidade, poder calorífico e resistência à compressão) dos briquetes produzidos.

4.1. Teor de matérias voláteis

O resumo da análise de variância para o teor de matérias voláteis para as variáveis estudadas para cada pressão de compactação é apresentado no Quadro 1A. Observa-se neste quadro que o efeito da granulometria, da proporção de alcatrão e o efeito da interação entre granulometria *versus* proporção de alcatrão foram significativos em nível de 1% de probabilidade para todas as pressões de compactação analisadas.

Os valores médios do teor de matérias voláteis para todas as granulometrias, proporções de alcatrão e pressão de compactação são apresentados no Quadro 1B.

A Figura 4 mostra o efeito da proporção de alcatrão sobre o teor de matérias voláteis, estimado e médio nas pressões de compactação de 195, 260 e 325 kgf/cm² para todas as granulometrias.



** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Figura 4 - Estimativas e médias do teor de materiais voláteis nas pressões de compactação de 195, 260 e 325 kgf/cm², em função da proporção de alcatrão para todas as granulometrias.

Observou-se que na pressão de compactação de 195 kgf/cm², a proporção de alcatrão não afetou significativamente o teor de matérias voláteis na granulometria de 40 “mesh”. Porém, quando se usou as granulometrias de 14 e 20 “mesh”, o teor de matérias voláteis caiu até quando a proporção de alcatrão atingiu 0,5, aumentando-se a partir desse ponto. Para a granulometria mista, nessa mesma pressão de compactação, observou-se que o teor de matérias voláteis aumentou com o aumento da proporção de alcatrão.

Efeitos distintos das proporções de alcatrão e das granulometrias foram observados quando se utilizou a pressão de compactação de 260 kgf/cm². Nessa pressão, a proporção de alcatrão não afetou significativamente o teor de matérias voláteis na granulometria de 14 “mesh”, que apresentou média igual a 21,08%. Já para as granulometrias de 20 e 60 “mesh” e mista, o teor de matérias voláteis aumentou com o aumento da proporção de alcatrão, observando-se menores estimativas quando se utilizou uma proporção de alcatrão de 0,3. Para a granulometria de 40 “mesh”, o teor de matérias voláteis diminuiu até quando a proporção de alcatrão atingiu 0,5, aumentando-se a partir dessa proporção.

A proporção de alcatrão não afetou significativamente o teor de matérias voláteis quando se utilizou a pressão de compactação de 325 kgf/cm². Entretanto, observou-se que o menor teor de matérias voláteis, 19,38%, foi obtido quando se usou na mistura uma proporção de alcatrão de 0,3 na granulometria mista.

Com base nas discussões, observou-se que as menores estimativas para o teor de matérias voláteis, 20,38, 18,31 e 19,38%, foram obtidas na granulometria mista usando uma proporção de alcatrão de 0,3 para as pressões de compactação de 195, 260 e 325 kgf/cm², respectivamente. Entre essas pressões estatisticamente diferentes entre si, a de 260 kgf/cm² apresentou o menor teor de matérias voláteis com 18,31%.

4.2. Teor de cinzas

O resumo da análise de variância do teor de cinzas para as variáveis estudadas para cada pressão de compactação é apresentado no Quadro 2A. Observa-se neste quadro que o efeito da granulometria, da proporção de

alcatrão e a interação entre granulometria *versus* proporção de alcatrão foram significativos em nível de 1% de probabilidade para todas as pressões de compactação analisadas.

São apresentados no Quadro 2B os valores médios do teor de cinzas para todas as granulometrias, proporções de alcatrão e pressão de compactação.

Analisando a Figura 5, onde são mostradas as estimativas e as médias do teor de cinzas para todas as pressões de compactação, em função da proporção de alcatrão nas granulometrias analisadas, pode-se observar que a pressão de compactação de 195 kgf/cm² foi a que apresentou o menor valor (0,13%) para o teor de cinzas. Esse valor foi obtido quando se utilizou uma proporção de alcatrão de 0,43 na granulometria de 40 “mesh”.

4.3. Teor de carbono fixo

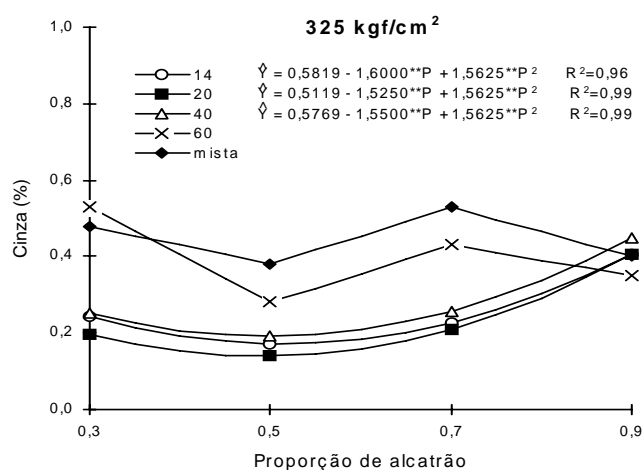
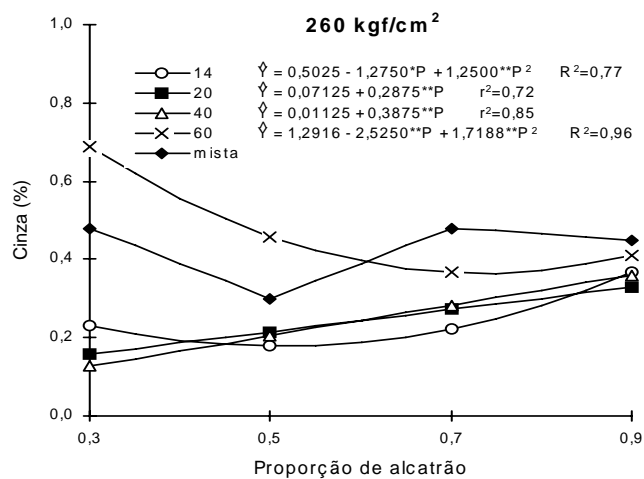
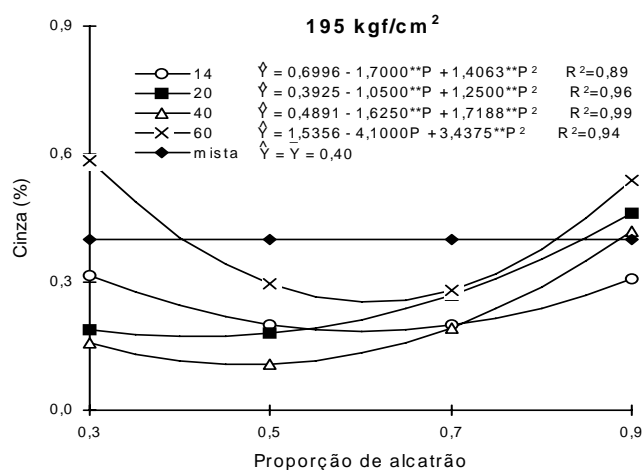
O resumo da análise de variância do teor de carbono fixo para as variáveis estudadas para cada pressão de compactação é apresentado no Quadro 3A. Observa-se neste quadro que o efeito da granulometria, da proporção de alcatrão e a interação entre granulometria *versus* proporção de alcatrão foram significativos em nível de 1% de probabilidade para todas as pressões de compactação analisadas.

Os valores médios do teor de carbono fixo para todas granulometrias, proporções de alcatrão e pressão de compactação são apresentados no Quadro 3B.

A Figura 6 expressa o efeito da proporção de alcatrão sobre o teor de carbono fixo estimado e médio para todas as pressões de compactação e todas as granulometrias

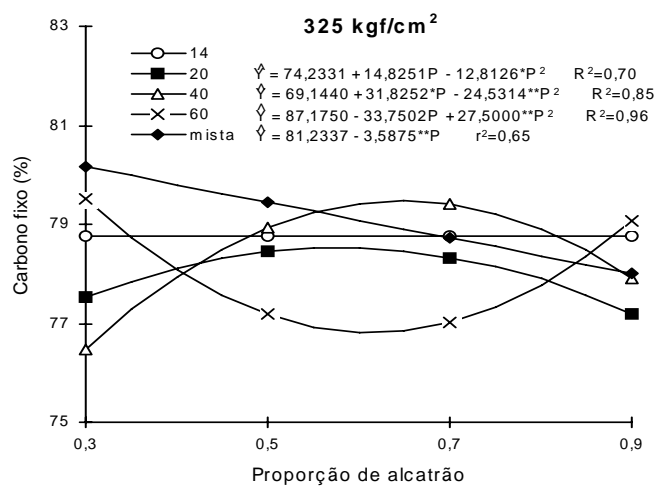
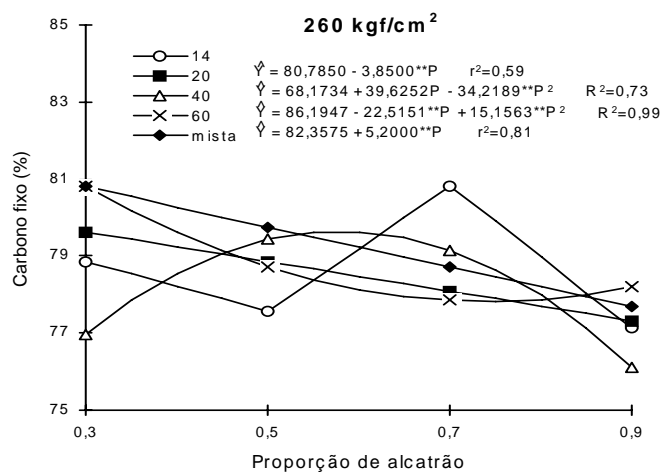
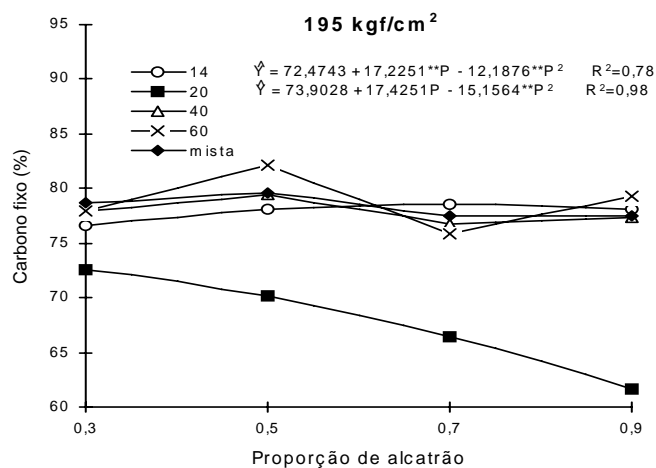
Analisando as médias da granulometria de 60 “mesh”, (Quadro 3B), observa-se que o maior valor encontrado (82,08%) foi obtido quando a proporção de alcatrão atingiu 0,5 na pressão de compactação de 195 kgf/cm².

Na pressão de compactação de 260 kgf/cm², Figura 6, pode-se observar que a maior concentração de carbono fixo encontrado para o briquete (80,80%) foi obtida quando se usou a granulometria de 60 “mesh” e proporção de alcatrão de 0,3.



** e * Significativos a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

Figura 5 - Estimativas e médias do teor de cinzas nas pressões de compactação de 195, 260 e 325 kgf/cm², em função da proporção de alcatrão para todas as granulometrias.



** e * Significativos a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

Figura 6 - Estimativas e médias do teor de carbono fixo nas pressões de compactação de 195, 260 e 325 kgf/cm², em função da proporção de alcatrão para todas as granulometrias.

Ainda, pelos dados da Figura 6, na pressão de compactação de 325 kgf/cm², pode-se observar, também, que na granulometria de 60 “mesh”, o maior valor encontrado para o teor de carbono fixo (79,52%) foi obtido quando se usou uma proporção de alcatrão de 0,3. Com base nessas discussões, pode-se afirmar que a melhor condição para se produzir briquetes com alto teor de carbono fixo foi quando se utilizou a pressão de compactação de 195 kgf/cm², na proporção de alcatrão de 0,5 com a granulometria de 60 “mesh”.

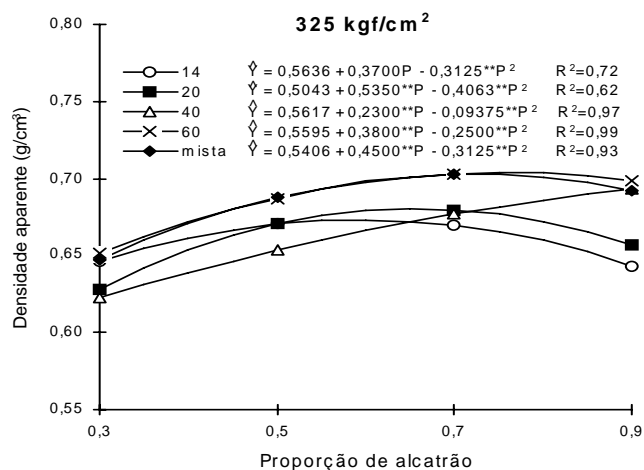
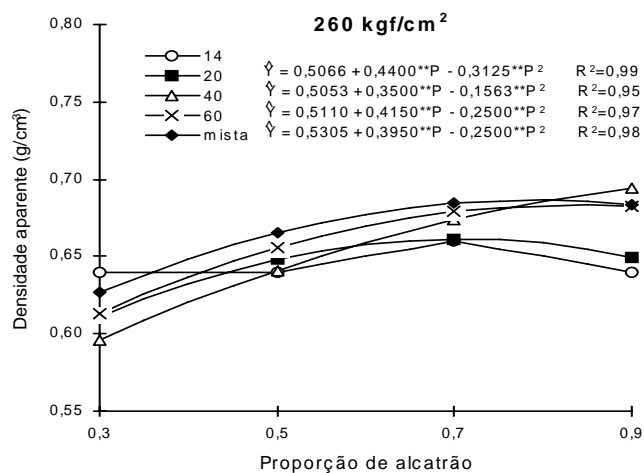
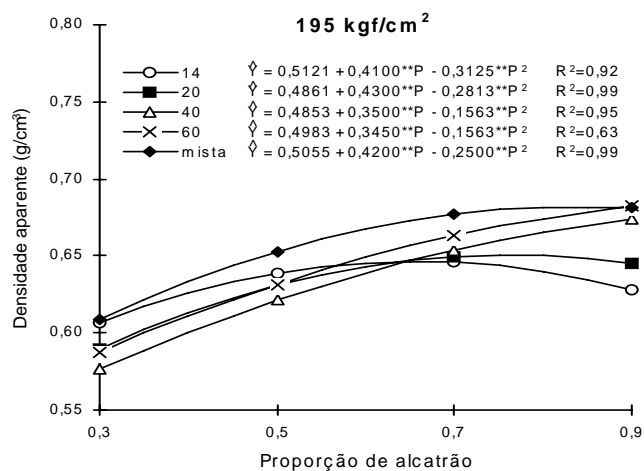
4.4. Densidade relativa aparente

O resumo da análise de variância da densidade relativa aparente para as variáveis estudadas para cada pressão de compactação é apresentado no Quadro 4A. Observa-se neste quadro que o efeito da granulometria, da proporção de alcatrão e a interação entre granulometria *versus* proporção de alcatrão foram significativos em nível de 1% de probabilidade para todas as pressões de compactação analisadas.

Os valores médios da densidade relativa aparente para todas granulometrias, proporções de alcatrão e pressão de compactação são apresentados no Quadro 4B.

A Figura 7 mostra o efeito da proporção de alcatrão sobre a densidade relativa aparente, estimado e médio para as pressões de compactação em todas as granulometrias.

Observa-se que o ponto máximo para a densidade relativa aparente (0,77 g/cm³) obtido foi quando se utilizou a pressão de compactação de 325 kgf/cm² e uma proporção de alcatrão de 0,87 na granulometria de 60 “mesh”. A provável explicação para esse fato deve-se, principalmente, à pressão de compactação máxima aplicada aos briquetes, o que resultou no total preenchimento do alcatrão nos espaços vazios existentes entre as partículas de carvão.



** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Figura 7 - Estimativas da densidade relativa aparente nas pressões de compactação de 195, 260 e 325 kgf/cm², em função da proporção de alcatrão para todas as granulometrias.

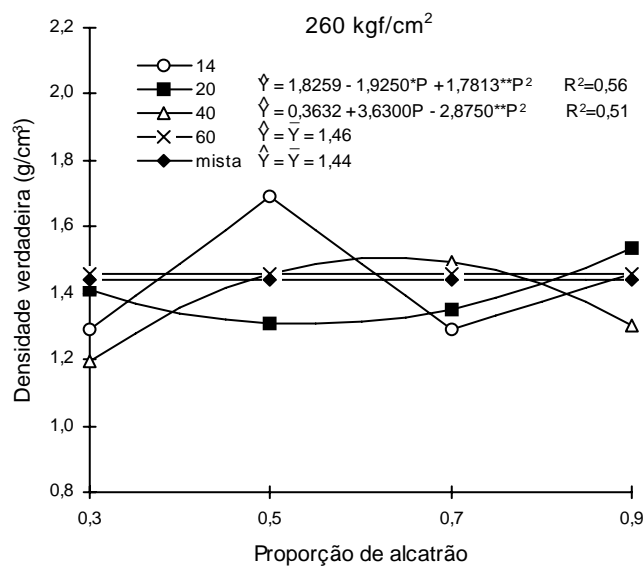
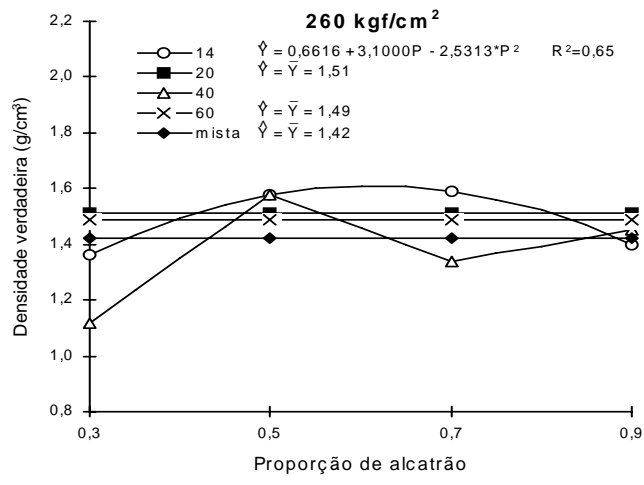
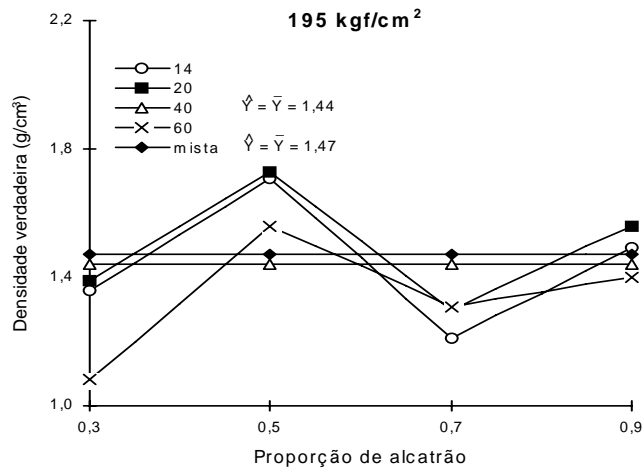
4.5. Densidade verdadeira

O resumo da análise de variância da densidade verdadeira para as variáveis estudadas para cada pressão de compactação é apresentado no Quadro 5A. Observa-se neste quadro que o efeito da granulometria não foi significativo em nível de 5% de probabilidade quando utilizaram-se as pressões de compactação de 195 e 260 kgf/cm². Na pressão de compactação de 325 kgf/cm², a granulometria foi significativa em nível de 1% de probabilidade. Pode-se observar, ainda, que o efeito da proporção de alcatrão foi significativo em nível de 1% de probabilidade para todas as pressões analisadas. Para o efeito da interação granulometria *versus* proporção de alcatrão, pode-se observar que houve efeito significativo em nível de 1% de probabilidade para a pressão de compactação de 325 kgf/cm².

No Quadro 5B são apresentados os valores médios da densidade verdadeira para todas granulometrias, proporções de alcatrão e pressões de compactação.

Observou-se na pressão de compactação de 195 kgf/cm², Figura 8, que a proporção de alcatrão não afetou significativamente a densidade verdadeira quando se usou as granulometrias de 40 “mesh” e a mista. Já na granulometria de 60 “mesh”, a densidade verdadeira atingiu o seu ponto máximo de 1,47 g/cm³ a uma proporção de alcatrão de 0,67. Entretanto, o maior valor encontrado para a densidade verdadeira foi quando se observou as médias da granulometria de 20 “mesh”, mostrado no Quadro 5B, em que o ponto máximo 1,73 g/cm³ foi obtido quando se utilizou uma proporção de alcatrão de 0,5 a essa mesma pressão de compactação.

Quando se utilizou a pressão de compactação de 260 kgf/cm², observa-se que a mesma não afetou significativamente a densidade verdadeira nas granulometrias de 20 e 60 “mesh” e na mista. Na granulometria de 14 “mesh”, o ponto máximo atingido pela densidade verdadeira, 1,61 g/cm³, foi obtido quando se utilizou uma proporção de alcatrão de 0,61 nessa mesma pressão de compactação. Para a granulometria de 40 “mesh”, pode-se observar que a maior densidade verdadeira (1,49 g/cm³) encontrada foi quando a proporção de alcatrão atingiu 0,69.



** e * Significativos a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

Figura 8 - Estimativas e médias da densidade verdadeira nas pressões de compactação de 195, 260 e 325 kgf/cm², em função da proporção de alcatrão para todas as granulometrias.

A proporção de alcatrão não afetou significativamente a densidade verdadeira quando se utilizou a pressão de 325 kgf/cm², onde a mesma apresentou média igual a 1,46 e 1,44 g/cm³ nas granulometrias de 60 “mesh” e na mista, respectivamente. Com a granulometria de 40 “mesh”, a densidade verdadeira atingiu o seu ponto máximo de 1,51 g/cm³ quando a proporção de alcatrão foi de 0,50.

Analisando a Figura 8, em que relaciona as estimativas e as médias da densidade verdadeira nas pressões de compactação de 195, 260 e 325 kgf/cm², em função da proporção de alcatrão para todas as granulometrias, pode-se afirmar que a granulometria de 20 “mesh” na pressão de compactação de 195 kgf/cm² foi a que apresentou a maior densidade verdadeira, que chegou a atingir 1,73 g/cm³ com uma proporção de alcatrão de 0,50.

4.6. Porosidade

O resumo da análise de variância da porosidade para as variáveis estudadas em cada pressão de compactação é apresentado no Quadro 6A. Observa-se neste quadro que o efeito da granulometria foi significativo em nível de 1% de probabilidade quando se utilizou as pressões de compactação de 195 e 325 kgf/cm². O efeito da granulometria não foi significativo em nível de 5% de probabilidade na pressão de 260 kgf/cm². Para o efeito da proporção de alcatrão, a mesma foi significativa em nível de 1% de probabilidade para todas as pressões de compactação analisadas. Para o efeito da interação granulometria *versus* proporção de alcatrão, pode-se observar que houve significância em nível de 1% de probabilidade quando se utilizou as pressões de compactação de 195 e 325 kgf/cm², o mesmo não havendo efeito significativo em nível de 5% de probabilidade para a interação granulometria *versus* proporção de alcatrão na pressão de compactação de 260 kgf/cm².

No Quadro 6A, são apresentados os valores médios da porosidade para as granulometrias, proporções de alcatrão e pressões de compactação.

Observando o Quadro 6B, onde são mostradas as médias da granulometria de 20 “mesh”, constatou-se que o maior valor encontrado para a porosidade (63,50%) foi obtido quando a proporção de alcatrão atingiu 0,50 a uma pressão de compactação de 195 kgf/cm². Nas granulometrias de 14 e 60 “mesh” houve uma pequena queda na porosidade, chegando a atingir 62,25

e 61,85% respectivamente, com proporção de alcatrão de 0,50 para essa mesma pressão de compactação. Para a granulometria mista, a porosidade diminui com o aumento da proporção de alcatrão. Entretanto, quando se utilizou a granulometria de 40 “mesh”, observou-se que a proporção de alcatrão não afetou significativamente a porosidade nessa pressão de compactação.

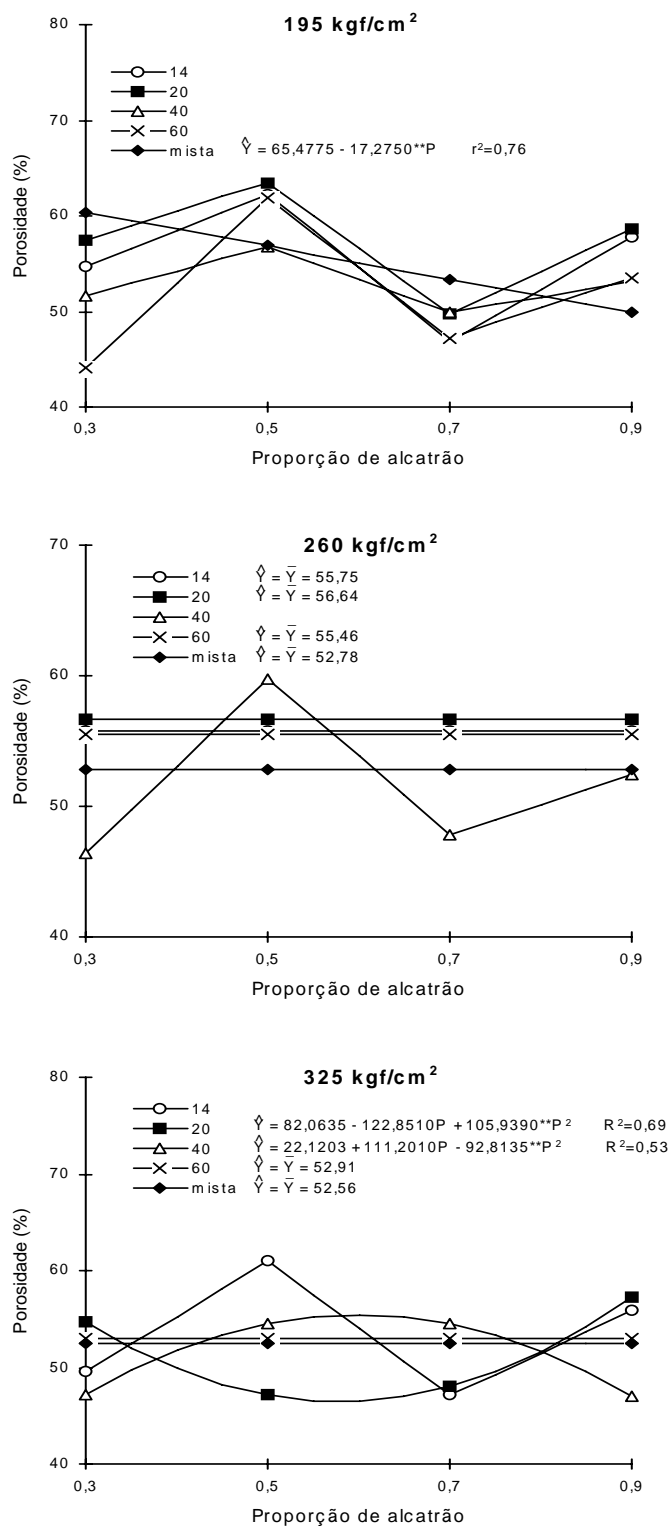
Com relação à pressão de compactação de 260 kgf/cm², observando as médias (Quadro 6B) da granulometria de 14 “mesh”, a mesma obteve valor máximo de 61,90% para a porosidade quando se utilizou uma proporção de alcatrão de 0,50. Já para as granulometrias de 20 “mesh” e mista observou-se que a proporção de alcatrão não afetou a porosidade. No entanto, usando uma granulometria de 40 “mesh”, a porosidade tende a cair um pouco quando comparada com a granulometria de 14 “mesh”.

Na pressão de compactação de 325 kgf/cm² para a porosidade, a maior média foi de 60,95% (Quadro 6B), e a mesma foi obtida quando se usou a granulometria de 14 “mesh” com uma proporção de alcatrão de 0,50. Já para as granulometrias de 60 “mesh” e mista observa-se que a proporção não teve efeito significativo na mesma.

Analisando a Figura 9, em que são mostradas as estimativas e as médias da porosidade nas pressões de compactação de 195, 260 e 325 kgf/cm², em função da proporção de alcatrão em todas as granulometrias, pode-se observar que a melhor porosidade encontrada (63,50%) para os briquetes produzidos foi obtida quando se utilizou a granulometria de 14 “mesh” a uma proporção de alcatrão de 0,50 e pressão de compactação de 195 kgf/cm². A provável explicação para essa característica, provavelmente, teria sido o tamanho das partículas de carvão usadas na confecção dos briquetes.

4.7. Resistência à compressão

O resumo da análise de variância da resistência à compressão para as variáveis estudadas para cada pressão de compactação é apresentado no Quadro 7A. Observa-se neste quadro que o efeito da granulometria, da proporção de alcatrão e a interação entre granulometria *versus* proporção de alcatrão foram significativos em nível de 1% de probabilidade para todas as pressões de compactação analisadas.



** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Figura 9 - Estimativas e médias da porosidade nas pressões de compactação de 195, 260 e 325 kgf/cm², em função da proporção de alcatrão para todas as granulometrias.

Os valores médios da resistência à compressão para todas granulometrias, proporções de alcatrão e pressão de compactação são apresentados no Quadro 7B.

A Figura 10 mostra o efeito da proporção de alcatrão para a resistência à compressão, estimado e médio para as pressões de compactação em todas as granulometrias.

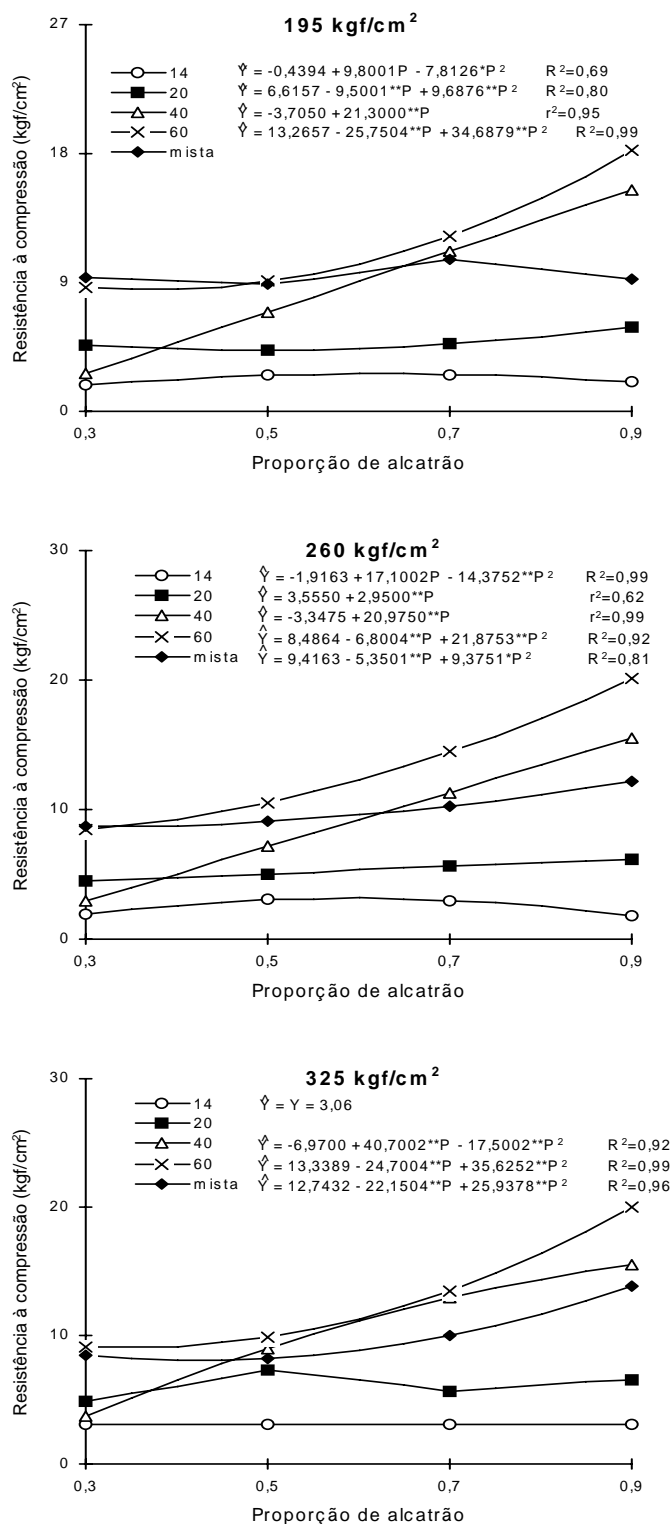
Pode-se observar, na Figura 10, que as pressões de compactação de 195, 260 e 325 kgf/cm², aplicadas na confecção dos briquetes, influenciaram a resistência à compressão dos mesmos. Observa-se que, aumentando-se a proporção de alcatrão, a resistência também aumenta. Dessa forma, usando a proporção de alcatrão de 0,90 e a pressão de compactação máxima, ou seja, 325 kgf/cm² na granulometria de 60 “mesh”, os briquetes produzidos suportariam uma carga máxima de até 19,96 kgf/cm².

4.8. Poder calorífico

O resumo da análise de variância do poder calorífico para as variáveis estudadas para cada pressão de compactação é apresentado no Quadro 8A. Observa-se neste quadro que o efeito da granulometria e da proporção de alcatrão foi significativo em nível de 1% de probabilidade para todas as pressões de compactação analisadas. Com relação ao efeito da interação granulometria *versus* proporção de alcatrão, a mesma foi significativa, em nível de 5% de probabilidade, quando se usou a pressão de compactação de 195 kgf/cm² e em nível de 1% de probabilidade, para as pressões de compactação de 260 e 325 kgf/cm².

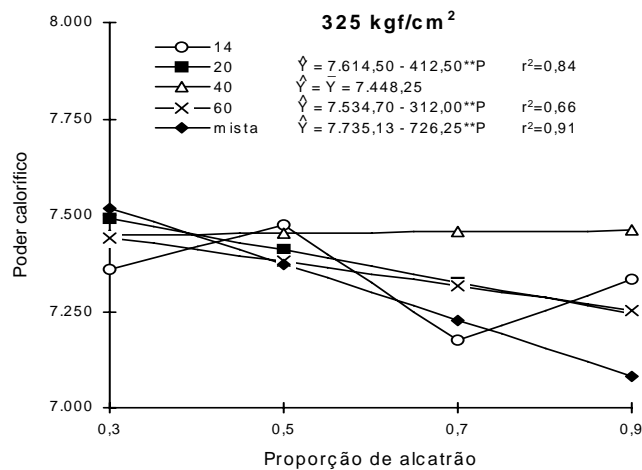
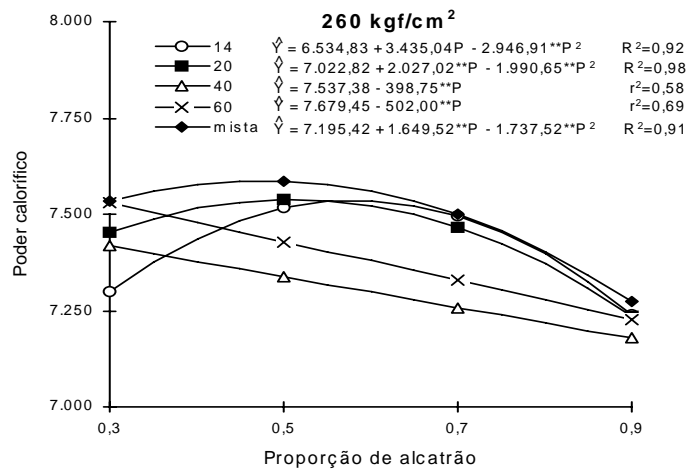
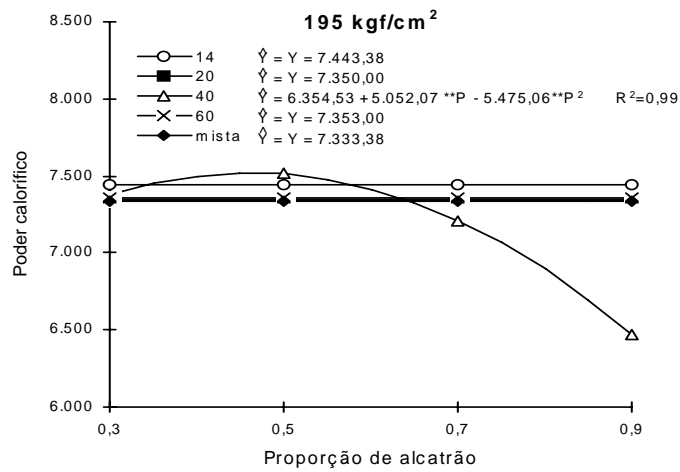
São apresentados no Quadro 8B os valores médios do poder calorífico para todas granulometrias, proporções de alcatrão e pressões de compactação.

Verifica-se na Figura 11 que, usando as pressões de compactação de 195 e 325 kgf/cm², variando ou não a proporção de alcatrão, o poder calorífico é relativamente baixo quando comparado com a pressão de compactação de 260 kgf/cm². Pode-se observar que a maior estimativa obtida (7639 kcal/kg) para o poder calorífico foi quando se usou na mistura uma proporção de alcatrão de 0,45 na granulometria mista, com pressão de compactação de 260 kgf/cm².



** e * Significativos a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

Figura 10 - Estimativas e médias da resistência à compressão nas pressões de compactação de 195, 260 e 325 kgf/cm², em função da proporção de alcatrão para todas as granulometrias.



** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Figura 11 - Estimativas e médias do poder calorífico nas pressões de compactação de 195, 260 e 325 kgf/cm², em função da proporção de alcatrão para todas as granulometrias.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Em geral, a utilização do resíduo agroflorestal como combustível possui baixa eficiência energética, sendo necessário na maioria dos casos a utilização de processos industriais para corrigir algumas propriedades tais como, baixa densidade, elevada umidade e baixo poder calorífico.

O carvão vegetal gera nas fases de produção, transporte, manuseio e peneiramento nas usinas siderúrgicas uma quantidade elevada de finos, podendo chegar a 25% do total produzido e, em alguns casos, apresenta, dificuldade e, ou, inviabilidade de seu aproveitamento. Esses finos representam hoje mais de 2 milhões de toneladas por ano. Por meio do processo de briquetagem do carvão vegetal com uso de aglutinantes, ou seja, técnica que envolve balanceamento granulométrico, mistura proporcional de aglutinantes, compactação, coqueificação e, ou, secagem, consegue-se o aproveitamento dos finos de carvão na forma de um combustível de melhor densidade, mais homogêneo, granulometria uniforme, mantendo-se as características do carvão, facilitando o manuseio, a estocagem e a utilização do mesmo, permitindo o seu transporte a maiores distâncias (FONTES et al., 1989).

Esta pesquisa visou avaliar a influência da granulometria, da pressão de compactação e da proporção de aglutinantes na qualidade química (teor de matérias voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo) e propriedades físico-mecânicas (densidade relativa aparente, densidade verdadeira, porosidade, poder calorífico e resistência à compressão) dos briquetes produzidos.

O alcatrão usado no presente trabalho originou-se das carbonizações dos fornos de alvenaria produzidos pela MANNESMANN FLORESTAL LTDA, no município de Curvelo, no Estado de Minas Gerais.

O carvão vegetal utilizado foi o da espécie *Eucalyptus urophylla*, com idade entre 7 e 8 anos, originário de carbonizações em retortas elétricas realizadas no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira.

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

- Sobre as características dos briquetes produzidos:

- A granulometria de 60 “mesh” foi a que produziu briquetes de melhor qualidade em termos de composição química e características físico-mecânicas.

- A densidade aparente, a porosidade e a resistência mecânica dos briquetes produzidos foram influenciadas principalmente pela pressão de compactação, seguida da proporção de alcatrão.

- Os briquetes produzidos possuem alto teor de carbono fixo, baixo teor de cinzas, baixo teor de umidade, alta resistência mecânica e baixa suscetibilidade à formação de finos e densidade aparente três vezes superior à do carvão vegetal utilizado, apresentando, também, composição química, poder calorífico, densidade aparente e forma geométrica constantes.

- Sobre as características do processo utilizado:

- O processo desenvolvido foi capaz de produzir briquetes com uniformidade de propriedades. Desde que haja uma pressão mínima para a aglutinação, aumentos na mesma não influenciarão na composição química imediata dos briquetes.

- Utiliza como aglutinante um resíduo da indústria florestal que está sendo pouco aproveitado até o momento e está disponível no mercado nacional e emprega os mesmos equipamentos da briquetagem convencional.

- Possibilita produzir briquetes em lotes de composição química pré-definida, pode-se utilizar alcatrão vegetal de qualquer procedência, não importando o seu processo de recuperação (fornos de alvenaria ou outros tipos) e emprega-se, como matéria-prima, tanto o carvão vegetal como a moinha que se acumula nas carvoarias.

- Possibilita emitir laudo de composição química na embalagem, uma vez que os briquetes são praticamente idênticos dentro de um mesmo lote, permitindo a sua produção para usos diferenciados tais como domésticos, em siderurgias e metalurgias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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).
- ANDRADE, A.M. **Efeitos da fertilização mineral e da calagem na produção e na qualidade da madeira e do carvão de eucalipto**. Viçosa: UFV, 1993. 105p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1993.
- ANTUNES, R.C., Briquetagem de carvão vegetal In: PENEDO, W.R. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. v.1, p.197-206.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS RENOVÁVEIS - ABRACAVE. **Anuário estatístico**. Belo Horizonte/MG. 1995. 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Método de Ensaio para a Determinação do Poder Calorífico**. Rio de Janeiro, 1966. 31p. (ABNT - NBR 2015).
- BEZZON, G. **Síntese de novos combustíveis a partir de resíduos agroflorestais e possíveis contribuições no cenário energético brasileiro**. Campinas: FEM/UNICAMP, 1994. 108p. 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. Local de edição: SHELL, 1990. v.1, p.1-9.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Proposta de utilização energética de florestas e resíduos agrícolas**. Brasília - DF. CARG. 1984. v.1.
- BRITO, J.O. **Estudo sobre a produção de carvão e briquetes de carvão de pinnus**. Piracicaba: ESALQ. 1986. p.58.
- BROSCH, C.D., FURUNO, J.K. Aproveitamento de finos de carvão vegetal. Divisão de metalurgia do Instituto de Pesquisas de São Paulo. In: **CONGRESSO ANUAL DA ABM**. 12, 1968, Vitória, ES.
- FONTES, P.J., 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.
- MARSOLLA, A. **Planta de briquetagem de carvão vegetal**. [s. l.]: Rosa medeira Ltda. 1998.
- MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. In: PENEDO, W.R. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. v.1, p.9-26.
- MESSMAN, H.C., TIBBETTS, T.E. **Elements of briquetting and agglomeration**. Canadá: Institute for briquetting and agglomeration, 1977. 105p.
- MORO, J.P. **Briquetagem de finos de carvão vegetal**. In: Anais da 2ª jornada de engenharia dos Países de língua Portuguesa. Rio de Janeiro. 1987. v.1. p.1-14.
- MOTTER, C. Aproveitamento dos finos de carvão vegetal para produção de briquetes para uso siderúrgico. In: **CONGRESSO ANUAL DA ABM**. 34. 1979. Porto Alegre, RS.
- PASA, V.M.D. **Piche de alcatrão de eucaliptos: Obtenção, caracterização e desenvolvimento de aplicações**. Belo Horizonte, UFMG. 227p. (Dissertação de Mestrado em Química) - Universidade Federal de Minas Gerais, 1994.
- QUIRINO, F.Q., DIAS, H.A. **Teste de acendimento de briquetes de carvão vegetal para uso doméstico**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 5. 1986. Rio de Janeiro 1986.

- QUIRINO, W.F. **Briquetagem de carvão vegetal e resíduos agrícolas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 5, 1987, Rio de Janeiro. **Anais...** Brasília: LPF, 1987. p.9.
- QUIRINO, W.F. **Característica e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Piracicaba: ESALQ, 1991, 64p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1991.
- SALEME, J. E. F. **Estudo básico para briquetagem do carvão vegetal**. Ouro Preto. Escola de Minas e Metalurgia. [19--]. 19p.
- 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.
- VALENTE, O.F., PEREIRA, A.R. **Produção de madeira, carbonização, subprodutos e transporte de carvão para abastecimento de indústria no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: COBRAPI. 1982. 207p.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Quadro 1A - Resumo da análise de variância do teor de matérias voláteis para todas as pressões de compactação

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado Médio		
		195 kgf/cm ²	260 kgf/cm ²	325 kgf/cm ²
Granulometria (G)	4	6,2495 *	4,8842 *	4,3736 *
Proporção (P)	3	11,8511 *	18,3735 *	3,5465 *
G x P	12	4,6805 *	6,7534 *	4,8112 *
Resíduo	60	0,5102	0,4165	0,7417

* F significativo a 1% de probabilidade.

Quadro 2A - Resumo da análise de variância do teor de cinzas para todas as pressões de compactação

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado Médio		
		195 kgf/cm ²	260 kgf/cm ²	325 kgf/cm ²
Granulometria (G)	4	0,1304 *	0,2127 *	0,1272 *
Proporção (P)	3	0,1718 *	0,0901 *	0,1063 *
G x P	12	0,0300 *	0,0342 *	0,0260 *
Resíduo	60	0,0070	0,0085	0,0042

** F significativo a 1% de probabilidade.

Quadro 3A - Resumo da análise de variância do teor de carbono fixo para todas as pressões de compactação

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado Médio		
		195 kgf/cm ²	260 kgf/cm ²	325 kgf/cm ²
Granulometria (G)	4	2,4648 *	3,8786 *	3,8452 *
Proporção (P)	3	16,0288 *	17,7898 *	3,9411 *
G x P	12	6,6046 *	7,5457 *	4,5723 *
Resíduo	60	0,4399	0,4605	0,7710

* F significativo a 1% de probabilidade.

Quadro 4A - Resumo da análise de variância da densidade relativa aparente para todas as pressões de compactação

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado Médio		
		195 kgf/cm ²	260 kgf/cm ²	325 kgf/cm ²
Granulometria (G)	4	0,9837.10 ⁻³ *	0,6775.10 ⁻³ *	0,9088.10 ⁻³ *
Proporção (P)	3	0,1035.10 ⁻¹ *	0,6483.10 ⁻² *	0,4060.10 ⁻² *
G x P	12	0,7971.10 ⁻³ *	0,5242.10 ⁻³ *	0,7537.10 ⁻³ *
Resíduo	60	0,2250.10 ⁻⁴	0,2250.10 ⁻⁴	0,3499.10 ⁻⁴

* F significativo a 1% de probabilidade.

Quadro 5A - Resumo da análise de variância da densidade verdadeira para todas as pressões de compactação

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado Médio		
		195 kgf/cm ²	260 kgf/cm ²	325 kgf/cm ²
Granulometria (G)	4	0,0291 ns	0,0274 ns	0,0204 *
Proporção (P)	3	0,1452 *	0,0856 *	0,0894 *
G x P	12	0,0346 ns	0,0206 ns	0,0224 *
Resíduo	60	0,1076	0,0141	0,0039

* F significativo a 1% de probabilidade.

ns F não-significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 6A - Resumo da análise de variância da porosidade para todas as pressões de compactação

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado Médio		
		195 kgf/cm ²	260 kgf/cm ²	325 kgf/cm ²
Granulometria (G)	4	39,2871*	36,8566 ns	30,7927*
Proporção (P)	3	223,7442*	110,6883*	69,8461*
G x P	12	28,9453*	21,2215 ns	33,1131*
Resíduo	60	5,9582	15,7075	6,3365

* F significativo a 1% de probabilidade.

ns F não-significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 7A - Resumo da análise de variância da resistência à compressão para todas as pressões de compactação

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado Médio		
		195 kgf/cm ²	260 kgf/cm ²	325 kgf/cm ²
Granulometria (G)	4	123,3509*	145,0887*	74,5391*
Proporção (P)	3	45,0249*	65,9442*	136,1409*
G x P	12	14,9780*	14,6793*	13,9161*
Resíduo	60	0,1053	0,2282	0,3378

* F significativo a 1% de probabilidade.

Quadro 8A - Resumo da análise de variância do poder calorífico para todas as pressões de compactação

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado Médio		
		195 kgf/cm ²	260 kgf/cm ²	325 kgf/cm ²
Granulometria (G)	4	98.688,34 *	32.989,04 *	33.124,46 *
Proporção (P)	3	292.301,10 *	139.653,30 *	74.535,96 *
G x P	12	67.140,87 **	16.031,27 *	18.205,14 *
Resíduo	60	22.268,59	4.666,57	3.393,53

* F significativo a 5% de probabilidade.

** F significativo a 1% de probabilidade.

ns F não-significativo a 5% de probabilidade.

APÊNDICE B

Quadro 1B - Valores médios do teor de matérias voláteis (%) para todas as granulometrias, proporções de alcatrão e pressões de compactação

Proporção	Granulometria	Pressão (kgf/cm ²)		
		195	260	325
0,3	14	23,20 a	20,88 b	21,15 bc
	20	22,05 ab	20,20 b	22,43 ab
	40	21,88 ab	22,55 a	23,40 a
	60	21,50 b	18,58 c	19,93 c
	mista	20,85 b	18,05 c	19,78 c
0,5	14	22,28 a	22,03 a	20,78 b
	20	20,85 b	21,40 a	20,48 bc
	40	20,50 b	19,30 b	20,30 bc
	60	17,68 c	20,78 a	22,20 a
	mista	19,98 b	20,80 a	19,20 c
0,7	14	20,63 c	18,88 b	20,93 b
	20	21,15 bc	20,48 a	21,90 ab
	40	23,00 a	21,65 a	21,00 b
	60	22,23 ab	21,78 a	22,78 a
	mista	22,03 abc	20,38 a	21,18 b
0,9	14	21,73 a	22,53 ab	21,00 ab
	20	22,18 a	22,93 a	22,23 a
	40	22,05 a	23,08 a	21,43 ab
	60	20,23 b	21,30 b	20,43 b
	mista	22,03 a	21,70 ab	21,55 ab

- Em cada proporção e pressão, médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Quadro 2B - Valores médios do teor de cinzas (%) para todas as granulometrias, proporções de alcatrão e pressões de compactação

Proporção	Granulometria	Pressão (kgf/cm ²)		
		195	260	325
0,3	14	0,33 a	0,25 a	0,25 a
	20	0,20 a	0,20 a	0,20 a
	40	0,15 a	0,15 a	0,25 a
	60	0,60 a	0,70 a	0,53 a
	mista	0,45 a	0,48 a	0,48 a
0,5	14	0,18 a	0,13 a	0,15 a
	20	0,15 a	0,15 a	0,13 a
	40	0,13 a	0,15 a	0,20 a
	60	0,25 a	0,43 a	0,28 a
	mista	0,30 a	0,30 a	0,38 a
0,7	14	0,23 a	0,28 a	0,25 a
	20	0,30 a	0,28 a	0,23 a
	40	0,18 a	0,33 a	0,25 a
	60	0,33 a	0,40 a	0,43 a
	mista	0,43 a	0,48 a	0,53 a
0,9	14	0,30 a	0,35 a	0,40 a
	20	0,45 a	0,35 a	0,40 a
	40	0,43 a	0,35 a	0,45 a
	60	0,53 a	0,40 a	0,35 a
	mista	0,40 a	0,45 a	0,40 a

- Em cada proporção e pressão, médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Quadro 3B - Valores médios do teor de carbono fixo (%) para todas as granulometrias, proporções de alcatrão e pressões de compactação

Proporção	Granulometria	Pressão (kgf/cm ²)		
		195	260	325
0,3	14	76,73 b	78,85 c	78,63 ab
	20	77,73 ab	79,58 bc	77,38 bc
	40	77,90 ab	76,60 d	76,28 c
	60	77,88 ab	80,77 ab	79,43 a
	mista	78,65 a	81,30 a	79,68 a
0,5	14	77,50 c	77,58 b	79,05 ab
	20	78,95 bc	78,35 b	78,90 ab
	40	79,38 b	80,58 a	79,55 a
	60	82,08 a	78,80 b	77,48 b
	mista	79,65 b	78,83 b	80,40 a
0,7	14	79,10 a	80,83 a	78,80 a
	20	78,55 a	79,27 ab	77,88 ab
	40	76,80 b	78,00 b	78,78 a
	60	75,88 b	77,78 b	76,73 b
	mista	77,48 ab	79,08 b	78,25 ab
0,9	14	77,93 ab	77,13 ab	78,60 ab
	20	77,35 b	76,70 ab	77,35 b
	40	77,35 b	76,50 b	78,13 ab
	60	79,28 a	78,23 a	79,18 a
	mista	77,52 b	77,75 ab	78,00 ab

- Em cada proporção e pressão, médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Quadro 4B - Valores médios da densidade relativa aparente (g/cm^3) para todas as granulometrias, proporções de alcatrão e pressões de compactação

Proporção	Granulometria	Pressão (kgf/cm^2)		
		195	260	325
0,3	14	0,61 a	0,64 a	0,65 a
	20	0,59 bc	0,61 cd	0,64 ab
	40	0,58 c	0,60 d	0,62 b
	60	0,60 ab	0,62 bc	0,65 a
	mista	0,61 a	0,63 b	0,65 a
0,5	14			
	20	0,65 a	0,64 bc	0,66 b
	40	0,63 b	0,65 b	0,65 b
	60	0,61 c	0,63 c	0,66 b
	mista	0,60 d	0,65 b	0,69 a
0,7	14	0,65 a	0,67 a	0,68 a
	20	0,64 d	0,66 b	0,68 b
	40	0,65 d	0,66 b	0,70 a
	60	0,67 c	0,69 a	0,67 b
	mista	0,70 a	0,69 a	0,70 a
0,9	14	0,68 b	0,68 a	0,71 a
	20	0,63 c	0,64 b	0,64 b
	40	0,65 b	0,65 b	0,65 b
	60	0,67 a	0,69 a	0,70 a
	mista	0,67 a	0,68 a	0,70 a
		0,68 a	0,69 a	0,69 a

- Em cada proporção e pressão, médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Quadro 5B - Valores médios da densidade verdadeira (g/cm^3) para todas as granulometrias, proporções de alcatrão e pressões de compactação

Proporção	Granulometria	Pressão (kgf/cm^2)		
		195	260	325
0,3	14	1,36 ab	1,33 ab	1,29 ab
	20	1,39 ab	1,58 a	1,38 a
	40	1,56 a	1,12 b	1,14 b
	60	1,08 b	1,53 a	1,41 a
	mista	1,58 a	1,42 ab	1,42 a
0,5	14	1,71 a	1,68 a	1,69 a
	20	1,73 a	1,61 a	1,41 c
	40	1,42 a	1,58 a	1,62 ab
	60	1,56 a	1,54 a	1,52 abc
	mista	1,51 a	1,50 a	1,49 bc
0,7	14	1,21 a	1,49 a	1,29 ab
	20	1,30 a	1,40 a	1,25 b
	40	1,33 a	1,34 a	1,34 ab
	60	1,31 a	1,35 a	1,45 a
	mista	1,36 a	1,32 a	1,43 ab
0,9	14	1,49 a	1,44 a	1,46 ab
	20	1,56 a	1,45 a	1,57 a
	40	1,43 a	1,45 a	1,36 b
	60	1,40 a	1,53 a	1,46 ab
	mista	1,43 a	1,42 a	1,43 ab

- Em cada proporção e pressão, médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Quadro 6B - Valores médios da porosidade (%) para todas as granulometrias, proporções de alcatrão e pressões de compactação

Proporção	Granulometria	Pressão (kgf/cm ²)		
		195	260	325
0,3	14	54,75 ab	50,80 ab	49,60 ab
	20	57,45 ab	57,80 ab	53,45 a
	40	51,65 b	46,35 b	45,55 b
	60	44,15 c	59,60 a	53,70 a
	mista	61,40 a	55,70 ab	54,05 a
0,5	14	62,25 a	61,90 a	60,95 a
	20	63,50 a	59,50 a	51,00 b
	40	56,80 a	59,80 a	59,25 a
	60	61,85 a	57,80 a	54,45 ab
	mista	56,95 a	55,30 a	54,35 ab
0,7	14	46,90 a	54,95 a	47,10 a
	20	49,75 a	54,10 a	44,10 a
	40	49,95 a	47,85 a	49,75 a
	60	47,25 a	49,00 a	51,60 a
	mista	49,85 a	48,00 a	50,35 a
0,9	14	57,70 a	55,35 a	55,95 ab
	20	58,55 a	55,15 a	58,60 a
	40	53,10 a	52,40 a	48,60 b
	60	53,50 a	55,45 a	51,90 ab
	mista	52,25 a	52,10 a	51,50 ab

- Em cada proporção e pressão, médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Quadro 7B - Valores médios da resistência à compressão (kgf/cm²) para todas as granulometrias, proporções de alcatrão e pressões de compactação

Proporção	Granulometria	Pressão (kgf/cm ²)		
		195	260	325
0,3	14	1,70 d	1,95 c	2,90 c
	20	4,50 b	4,05 b	4,85 b
	40	3,10 c	3,00 bc	4,25 bc
	60	8,70 a	9,00 a	8,90 a
	mista	9,40 a	8,95 a	8,65 a
0,5	14	2,80 c	2,95 d	3,45 c
	20	4,70 b	5,85 c	7,30 b
	40	5,60 b	7,00 bc	7,25 b
	60	8,95 a	8,80 a	10,60 a
	mista	8,85 a	8,20 ab	7,50 b
0,7	14	2,30 d	3,10 d	3,50 e
	20	4,30 c	5,15 c	5,70 d
	40	12,65 a	11,45 b	14,70 a
	60	12,35 a	16,20 a	12,80 b
	mista	10,60 b	11,15 b	10,60 c
0,9	14	2,15 e	1,80 e	2,40 d
	20	6,05 d	6,25 d	6,60 c
	40	14,95 b	15,50 b	14,90 b
	60	18,15 a	19,50 a	20,20 a
	mista	9,25 c	11,90 c	13,60 b

- Em cada proporção e pressão, médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Quadro 8B - Valores médios do poder calorífico (kcal/kg) para todas as granulometrias, proporções de alcatrão e pressões de compactação

Proporção	Granulometria	Pressão (kgf/cm ²)		
		195	260	325
0,3	14	7.322,50 a	7.284,50 b	7.360,50 b
	20	7.307,50 a	7.458,50 ab	7.448,00 ab
	40	7.393,50 a	7.380,50 ab	7.433,50 ab
	60	7.367,50 a	7.519,50 a	7.424,00 ab
	mista	7.369,50 a	7.517,00 a	7.549,00 a
0,5	14	7.625,50 a	7.562,50 ab	7.474,50 a
	20	7.483,00 a	7.518,50 ab	7.474,50 a
	40	7.463,50 a	7.443,00 ab	7.508,50 a
	60	7.485,00 a	7.380,00 b	7.362,50 ab
	mista	7.395,00 a	7.636,50 a	7.294,50 b
0,7	14	7.444,50 a	7.448,50 a	7.174,50 b
	20	7.319,00 a	7.486,50 a	7.321,50 ab
	40	7.256,50 a	7.160,00 b	7.454,50 a
	60	7.395,00 a	7.453,00 a	7.400,00 a
	mista	7.431,00 a	7.448,00 a	7.286,50 ab
0,9	14	7.381,00 a	7.255,00 a	7.331,50 ab
	20	7.290,50 a	7.228,00 a	7.424,00 abc
	40	6.450,50 b	7.209,00 a	7.396,50 a
	60	7.164,50 a	7.160,50 a	7.203,50 bc
	mista	7.138,00 a	7.289,50 a	7.067,50 c

- Em cada proporção e pressão, médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).