

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CÂMPUS DE SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

JOÃO LÚCIO DE BARROS

**CARACTERIZAÇÃO DE BLENDS E BRIQUETES DE CARVÕES
VEGETAL E MINERAL**

Sorocaba
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CÂMPUS DE SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

JOÃO LÚCIO DE BARROS

**CARACTERIZAÇÃO DE BLENDS E BRIQUETES DE CARVÕES
VEGETAL E MINERAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, para obtenção do título de mestre em Ciência dos Materiais. Área de concentração em Materiais Funcionais e Polímeros de Fontes Renováveis. Universidade Federal de São Carlos. Sorocaba, 25 de março de 2014.

Orientação: Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji

Sorocaba
2014

Barros, João Lúcio

S00t Blendas de carvão vegetal e carvão mineral para a produção de briquetes / João Lúcio de Barros. -- Sorocaba, 2014

125 f: il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, *Campus Sorocaba*, 2014

Orientador: Fábio Minoru Yamaji

Banca examinadora: Alessandra Luzia Da Róz, Leandro Cardoso de Morais

Bibliografia

1. Biomassa. 2. Bioenergia. 3. Briquete. I. Título. II. Sorocaba-Universidade Federal de São Carlos.

CDD 662.88

FOLHA DE APROVAÇÃO

JOÃO LÚCIO DE BARROS

**“CARACTERIZAÇÃO DE BLENDS E BRIQUETES DE CARVÕES MINERAL
E VEGETAL”.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais - PPGCM, para obtenção do título de mestre em Ciência dos Materiais. Área de concentração Materiais Funcionais e Polímeros de Fontes Renováveis, da Universidade Federal de São Carlos. Sorocaba, 25 de março de 2014.

Orientador(a)



Prof (a). Dr. (a) Fábio Minoru Yamaji
UFSCar – Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba

Examinador(a)



Prof (a). Dr.(a) Alessandra Luzia da Róz
UFSCar – Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba

Examinador(a)



Prof (a). Dr.(a) Leandro Cardoso de Moraes
Unesp – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, campus Sorocaba





**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS DE SOROCABA**

Rodovia João Leme dos Santos, km 110
Bairro Itinga
Telefone: (15) 3229-5941
CEP 18052-780 - Sorocaba - São Paulo - Brasil
<http://www.provcca.ufscar.br>; ppgcm@ufscar.br



**ATA GERAL DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE JOÃO LÚCIO DE BARROS,
DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS
MATERIAIS, CURSO DE MESTRADO, DO CCTS - CENTRO DE CIÊNCIAS E
TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE - UFSCAR / CAMPUS
SOROCABA.**

Aos vinte e cinco do mês de março de 2014, às 08:30h na Sala AT 11A – Prédio da Biblioteca, do Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade, UFSCar - campus Sorocaba, reuni-se a Comissão Examinadora composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji, da Universidade Federal de São Carlos/campus Sorocaba, Prof^ª. Dr^ª. Alessandra Luzia da Róz, da Universidade Federal de São Carlos/campus Sorocaba, Prof. Dr. Leandro Cardoso de Moraes, da Unesp – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, campus Sorocaba; sob a presidência do primeiro, para a Defesa de Dissertação de **JOÃO LÚCIO DE BARROS**, intitulada: **“Caracterização de Blendas e Briquetes de Carvões Mineral e Vegetal”**, de acordo com o regulamento do Programa, tendo o(a) candidato(a) recebido o conceito final: aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. FÁBIO MINORU YAMAJI

Prof.ª. Dr.ª. ALESSANDRA LUZIA DA RÓZ

Prof. Dr. LEANDRO CARDOSO DE MORAIS



“Nenhum homem realmente produtivo pensa como se estivesse escrevendo uma dissertação.”

Albert Einstein

Dedico esta dissertação aos meus pais, João e Mara, à minha esposa Luciana, aos meus irmãos Anerise, Evelise, Lindsay e Jesler e ao Prof. Fábio Yamaji.

AGRADECIMENTO

Aos meus pais João Batista e Mara Lúcia pela educação, carinho e incentivo para busca constante à informação e ao conhecimento.

À minha esposa Luciana Franciosi, pelo apoio, dedicação e compreensão e companheirismo durante toda esta jornada.

Ao Prof. Fábio Minoru Yamaji, por acreditar, incentivar e investir longas horas de orientações, conversas, e dedicações a todos os seus alunos, especialmente a mim, sendo além de um excelente mestre, um grande amigo.

Aos meus irmãos Anerise, Evelise, Lindsay e Jesler por toda convivência, amizade e carinho.

A todos os familiares por estarem sempre ao meu lado, com os braços abertos e prontos para me ajudarem em todos os momentos.

A todos os amigos de laboratório, em especial ao Walbert, pela convivência e pelas trocas de informações e experiências importantíssimas para nosso conhecimento.

Às professoras Alessandra Da Róz, Ana Lucia Pincelli, Mariana Provedel e ao prof. Leandro Moraes, por se dedicarem na correção e contribuírem nas sugestões e correções das metodologias práticas, na apresentação, dissertação, qualificação e defesa.

Aos professores Fábio M. Yamaji, Jane M. F. Paiva, Vagner R. Botaro, Antonio Riul Jr, Tersio G. S. Cruz, Ana L. Brandl, Nilson C. Cruz, Eliane A. R. Duek, Andrea M. Kliauga, José B. Rubert, Antonio J. C. Félix e Walter R. Waldman, pelos conhecimentos repassados nas palestras ministradas e disciplinas lecionadas.

A todos os professores e técnicos da UFSCar Sorocaba e em especial aos professores dos cursos de Engenharia Florestal e do curso de Engenharia de Produção da UFSCar Sorocaba que direta ou indiretamente, incentivaram e

apoiaram o meu ingresso no programa de pós-graduação, não medindo esforços para me ajudarem no meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos professores Antonio J. C. Félix da EESC-USP, e José Caraschi da UNESP-Itapeva, pela disponibilização de recursos materiais e pessoais para a execução de ensaios termoquímicos nos laboratórios.

À comunidade da UFSCar Sorocaba e ao IFSP – Itapetininga por propiciar um ótimo ambiente de trabalho, estudos e amizades, fundamentais para a conclusão e sequência deste trabalho.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudo e apoio financeiro.

A todas as eventuais pessoas que me esqueci, agradeço e lhes ofereço um muito obrigado.

SUMÁRIO

RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVOS GERAIS	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 CARVÃO MINERAL.....	23
2.2 CARVÃO VEGETAL	25
2.3 BRIQUETAGEM	28
2.4 BRIQUETES.....	30
2.5 AGLUTINANTES	32
3 MATERIAIS	35
3.1 FINOS DE CARVÃO VEGETAL	35
3.2 FINOS DE CARVÃO MINERAL.....	36
3.3 AMIDO DE MILHO	37
4 METODOLOGIA	39
4.1 PRODUÇÃO DAS BLENDA.....	40
4.2 FORMAÇÃO DOS BRIQUETES	42
4.3 CLASSIFICAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DAS PARTÍCULAS	44
4.4 TEOR DE UMIDADE.....	45
4.5 ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA	47
4.5.1 Teor de Matérias Voláteis	48
4.5.2 Teor de Cinzas	49
4.5.3 Teor de Carbono Fixo	50
4.6 DENSIDADES	51

4.6.1	Densidade a Granel	51
4.6.2	Densidade Verdadeira	52
4.6.3	Densidade Relativa Aparente (Pós-briquetagem)	54
4.6.4	Densidade Energética	55
4.7	POROSIDADE.....	55
4.8	REDUÇÃO VOLUMÉTRICA	56
4.9	EFICIÊNCIA DE COMPACTAÇÃO	57
4.10	ESTABILIDADE DIMENSIONAL.....	57
4.11	PODER CALORÍFICO SUPERIOR	58
4.12	RESISTÊNCIA MECÂNICA	59
4.12.1	Ensaio de Tração por Compressão Diametral	59
4.12.2	Friabilidade	61
4.13	TERMOGRAVIMETRIA	62
4.14	DELINEAMENTO ESTATÍSTICO.....	64
4.14.1	Número Mínimo de Repetições	64
4.14.2	Análise de Homogeneidade (Bartlett), Variância (Anova) e Tuckey	64
4.15	MATRIZ DE DECISÃO.....	65
5	RESULTADOS	67
5.1	MATERIAIS PARTÍCULADOS (PRÉ-BRIQUETAGEM)	67
5.1.1	Classificação Granulométrica	67
5.1.2	Teor de Umidade e Análise Química Imediata	70
5.1.3	Termogravimetria	73
5.1.4	Densidade a Granel e Densidade Verdadeira	76
5.1.5	Poder Calorífico e Densidade Energética	78
5.2	MATERIAIS COMPACTADOS (PÓS-BRIQUETAGEM)	79

5.2.1	Formação dos Briquetes.....	79
5.2.2	Teor de Umidade e Análise Imediata.....	82
5.2.3	Densidades a Granel, Verdadeira e Relativa Aparente	89
5.2.4	Porosidade, Redução Volumétrica e Eficiência de Compactação.	93
5.2.5.	Poder Calorífico Superior e Densidade Energética.....	99
5.2.6	Estabilidade dimensional.....	104
5.2.7	Resistência Mecânica estática.....	104
5.2.8	Resistência Mecânica dinâmica	108
5.2.9	Seleção do tratamento para produção do briquete.....	109
6	CONCLUSÕES	113
	REFERÊNCIAS.....	115
	APÊNDICE A	123

RESUMO

BARROS, João Lúcio. Caracterização de Blendas e Briquetes de Carvões Vegetal e Mineral. Ano. 2014 f. 125. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Centro de Ciências e Tecnologias para Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Câmpus Sorocaba, 2014.

O Brasil produz aproximadamente 37 milhões de metros cúbicos de carvão vegetal por ano, e o crescimento tende a aumentar devido à gradativa substituição do uso de carvão mineral, uma vez que o carvão mineral extraído no Brasil não possui níveis de carbono adequados para diversas finalidades, como por exemplo, a geração de energia. Porém, a grande quantidade de carvão mineral encontrada em praticamente toda a crosta terrestre faz com que esse produto tenha um custo extremamente baixo. Diante disto, objetivou-se agregar valor ao carvão mineral e proporcionar uma destinação adequada ao subproduto (finos) do carvão vegetal, com a produção de briquetes de blendas de carvão. Para a produção dos briquetes foram utilizados os finos de carvão mineral e carvão vegetal, além do amido de milho e água fervente em diferentes proporções, totalizando 25 tratamentos. Para cada tratamento foram confeccionadas dez amostras, totalizando 250 corpos de prova. Foram realizadas as análises de umidade, análise imediata, densidades, resistências mecânicas e análise térmica. Os tratamentos sem a adição de aglutinante foram descartados, pois não houve a formação dos briquetes. Os demais tratamentos obtiveram boas características, atingindo resultado considerado satisfatório esperado em relação à formação dos briquetes (resistência mecânica média de 0,2 MPa). De acordo com o aumento da proporção de carvão vegetal na blenda, o briquete atingiu melhores resultados, principalmente em relação às propriedades térmicas, devido ao maior teor de carbono fixo (em relação ao carvão mineral) e diminuição de teores de cinzas, comportamento adequado para diversas aplicações industriais e até residenciais. Concluiu-se que a utilização dos subprodutos de carvões vegetal e mineral na forma de briquetes foi tecnicamente viável, com características físicas vantajosas para o armazenamento e transporte.

Palavras-chave: Briquetagem. Carvão. Resíduos.

ABSTRACT

BARROS, João Lúcio. Characterization of blends and briquettes of charcoal and coals .Year. 2014 f. 125. Thesys (Master in Materials Science) – Center for Science and Technology Sustainability. Federal University of São Carlos, Câmpus Sorocaba, 2014.

Brazil produces about 37 million cubic meters of charcoal per year whit an increasing due to the gradual coal replacement, once the coal mined in Brazil does not have adequate levels of carbon for some purposes, such as power generation. However, the large amount of coal found in all terrestrial crust propitiates an extremely low cost this product. Regarding to it, whit the intent to add value to the coal and provide an adequate destination to by-product (fine) of the charcoal, it was made briquettes of coal blends. For briquettes production it was used coal and charcoal fines, corn starch and boiling water at different proportions, summing up 25 treatments. Ten samples were made for each treatment, summing 250 specimens, wich were analyzed by the moisture content, proximate analysis, density, mechanical strength and thermal analysis. The treatments without the addition of binder were discarded because briquettes could not be formed from them. Other treatments had good features, reaching satisfactory results expect in relation to the formation briquettes (average mechanical strength of 0,2 MPa), presenting good mechanical strength for commercial application. According to the increased proportion of charcoal in the blend, the produced briquette achieved better results, mainly to thermal properties due to higher fixed carbon content (compared to coal) and reduced ash content, an appropriate behavior for various industrial and even residential applications. It was concluded that the use of by-products from vegetable and coal briquettes was technically feasible, providing advantageous physical characteristics for storage and transportation.

Keywords: Briquetting press. Coal. Waste.

1 INTRODUÇÃO

O carvão mineral é o principal combustível sólido utilizado para a geração de energia mundial. O seu baixo custo e a grande quantidade disponível por praticamente toda a crosta terrestre, justificam sua importância dentre os principais combustíveis na demanda energética mundial. (BRASIL, 2008)

O carvão mineral além de ser um recurso fóssil não renovável, é o principal agente causador do efeito estufa na atualidade, pois, em sua oxidação (queima) é liberado e emitido à atmosfera um grande volume de gases, como o monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano e o óxido nitroso, dentre outros (LICKS, 2010).

Para Goldemberg e Lucon (2007), o carvão mineral é um dos principais causadores do efeito *smog* - camada de névoa escura e altamente tóxica, que reagem com a atmosfera e a luz solar formando composições secundárias, como o dióxido de enxofre, óxidos e dióxidos de nitrogênio, além de compostos orgânicos voláteis.

Diante deste aspecto, vários países pesquisam metodologias a fim de diminuir estas emissões à atmosfera, sem prejudicar o crescimento tecnológico e industrial, e principalmente atender a demanda energética. Um grande exemplo desta preocupação é o Protocolo de Quioto, que preconiza a mitigação das emissões dos gases de efeito estufa, para retardar e diminuir o aquecimento global e amenizar os impactos ambientais causados pela poluição do ambiente (SANTIN, 2007; MOREIRA e GIOMETTI, 2008).

Neste contexto, pesquisadores e organizações investigam alternativas de suprimento da demanda energética com melhor aproveitamento da energia utilizada em cada recurso, para prolongar os recursos energéticos e principalmente desenvolver o aproveitamento de outras fontes energéticas, como por exemplo, as matérias-primas de fontes renováveis (GOLDEMBERG, 2000).

A energia solar, eólica, marítima, geotérmica e outras como a energia proveniente da biomassa, consideradas fontes de energias limpas por se tratarem de fontes renováveis, atualmente estão subutilizadas (BRASIL, 2013). As biomassas,

principalmente originária da cana-de-açúcar, lenha e carvão são uma das mais importantes e promissoras fontes de energia na atualidade, principalmente nos países tropicais. A transformação da energia pode ser realizada por diferentes processos industriais, destacando-se a queima direta de combustíveis sólidos, como a cana-de-açúcar, madeira e o carvão (SANTOS e HATAKEYAMA, 2012).

O carvão vegetal possui diversas características semelhantes ao carvão mineral, colocando-o como um dos principais substitutos ao carvão mineral. Este se destaca por contribuir com a mitigação da emissão de poluentes, devido à necessidade de captação de CO₂ para o processo de fotossíntese. O CO₂ liberado na combustão do carvão é o elemento essencial para o crescimento da matéria-prima (madeira) necessária para a produção do carvão vegetal, favorecendo a continuação do ciclo de vida da matéria. Com este ciclo, o carvão vegetal é considerado uma fonte de energia renovável com características sustentáveis (MACHADO, OSÓRIO e VILELA, 2010).

De acordo com Sater (2011), na produção do carvão vegetal uma grande quantidade de subprodutos ou resíduos são gerados, principalmente por sua característica de baixa resistência à abrasão do material, sendo que o mesmo acontece no processo de extração ou em qualquer outro processamento industrial do carvão mineral (SIQUEIRA, SOUZA e SOUZA, 2012).

Os resíduos, denominados finos, geram problemas ambientais, pois, normalmente não possuem características que atendam totalmente às necessidades industriais, diminuindo drasticamente o seu valor comercial, e conseqüentemente, inviabilizando a comercialização, transporte e estocagem do mesmo. O descarte desses finos são feitos frequentemente de forma inadequada, tornando-se um resíduo com alto impacto socioambiental, principalmente com a contaminação do solo (KRAY *et al.*, 2008).

O processo de briquetagem corrobora com o aproveitamento dos resíduos de diversas matérias primas, sobretudo as de baixa densidade, para agregar valor ao subproduto, transformando os resíduos em produtos com características sólidas, compactas e de alta densidade, com geometrias, formas e dimensões definidas e com propriedades físicas adequadas para a utilização em escala residencial e industrial. Deste modo, a transformação dos finos, originados no processo de

extração e produção dos carvões em um produto com maior valor agregado, como os briquetes, poderá tornar-se uma opção para o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, geração de empregos, redução no custo de descartes, dentre outros benefícios para o planeta. Esta transformação promove suas aplicações industriais na geração de energia térmica e ou elétrica, podendo ser utilizado como agente redutor do minério de ferro e fonte de carbono para obtenção do aço em processos siderúrgicos. (ASSIS, 2010).

O processo de briquetagem contribui para a elevação do valor comercial do produto, e aumenta o valor monetário em até quatro vezes em comparação ao valor do carvão *in natura*. (Lucon 2009).

Portanto, conhecer as características e propriedades físico-químicas dos produtos obtidos a partir dos fins de carvão, possibilitará uma alternativa ao descarte, gerará um melhor aproveitamento da energia disponível e contribuirá com a descentralização do fornecimento de energia, com o uso dos recursos disponíveis em cada região.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Utilizar os resíduos gerados pela extração e produção de carvão vegetal e carvão mineral para a produção de briquetes.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Possibilitar a produção de novos produtos a partir do resíduo de carvões;

Analisar as propriedades mecânicas, físicas e químicas das blendas e dos briquetes, em relação às proporções de materiais usados;

Proporcionar alternativas de substituição parcial e/ou total ao carvão mineral;

Minimizar o impacto ambiental causado pelo descarte dos resíduos de carvões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARVÃO MINERAL

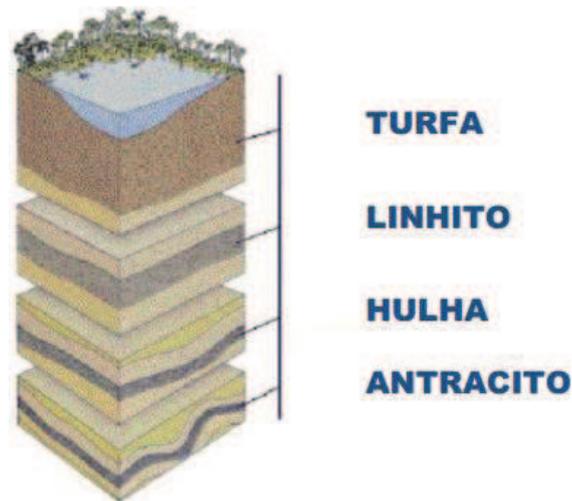
O carvão mineral é um minério rochoso de coloração negra ou amarronzada originado pela sedimentação de materiais orgânicos e minerais condicionados às altas pressões e temperaturas, transformados por processos biológicos, físicos e químicos, tornando-se um material composto basicamente por moléculas de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre (BORBA, 2001).

Por convenção, o carvão mineral é classificado¹ é subdividido em quatro classes comerciais, conhecidos como antracito, betuminoso e sub-betuminoso, ambos identificados também por hulha, o linhito e a turfa. O antracito possui maior idade geológica, conseqüentemente possui melhores parâmetros de carbonização, sucessivamente esse parâmetro decresce sendo a turfa de menor idade e com maiores depreciações em seus parâmetros de carbonização quando comparados aos anteriores (fig. 1) (MONTEIRO 2001).

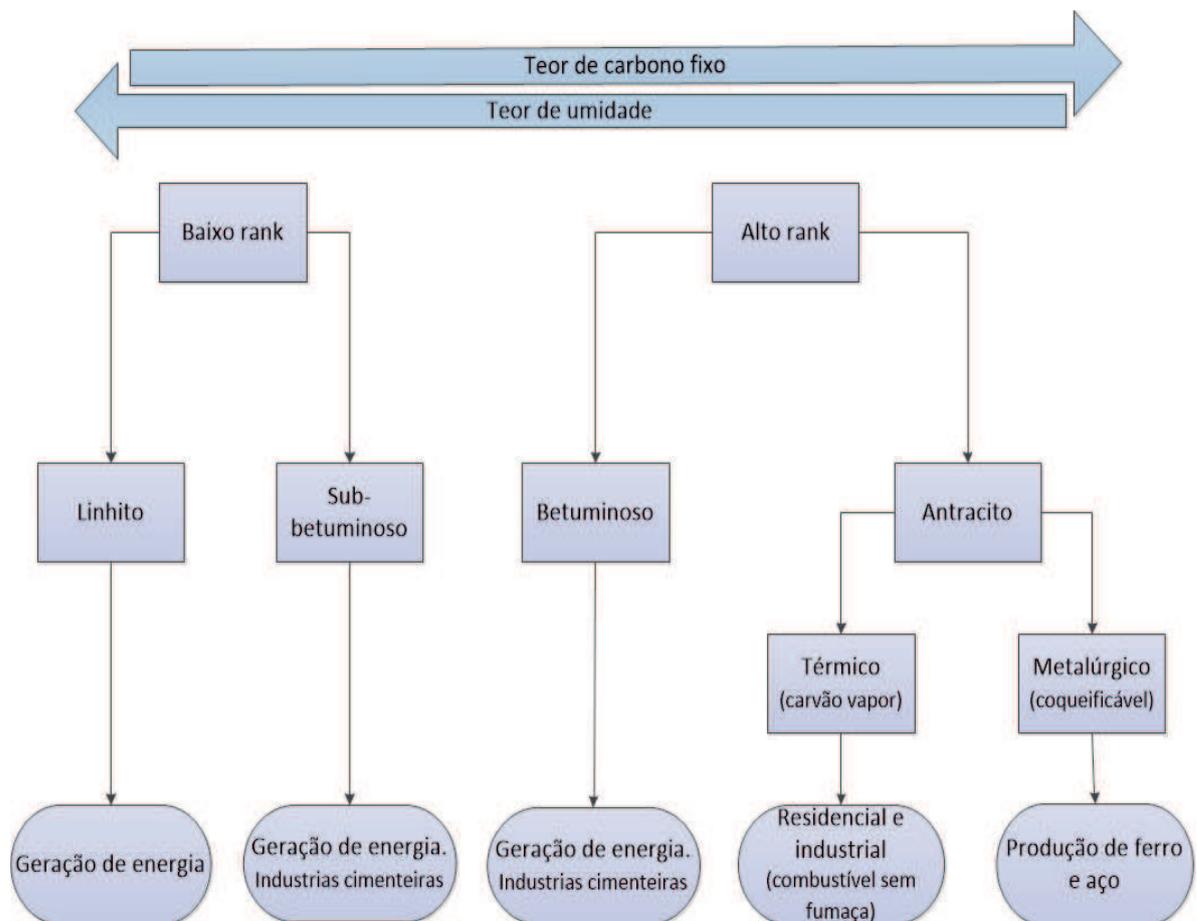
Segundo Silva (2012) e ASTM (1999), o carvão mineral é classificado internacionalmente conforme seu *rank*, que definido principalmente por sua a idade geológica segundo parâmetros físicos, químicos e físico-químicos, onde o maior grau *rank* representa o carvão de melhor característica principalmente em sua combustão (fig. 2).

Atualmente, a principal utilização mundial do carvão mineral é sua combustão direta em termelétricas, sendo responsável por 45% do abastecimento de toda energia elétrica mundial (Brasil, 2013). Contudo, o carvão mineral não se restringe apenas para a utilização em termelétricas, tendo um importante papel na geração de calor em fornos e caldeiras industriais.

¹ Outras denominações são utilizadas para a classificação do carvão, dependendo da fonte consultada.

FIGURA 1 – Estágios de evolução do carvão mineral

Fonte: The Coal Resource: A Comprehensive Overview of Coal (2009)

FIGURA 2 – Classificação do Rank do carvão mineral

Fonte: The Coal Resource: A Comprehensive Overview of Coal (2009)

Segundo Oliveira e Martins (2003), outra grande destinação do carvão é nos processos siderúrgicos para a redução do minério de ferro e obtenção do ferro gusa, ferro fundido e aço, devido a sua grande quantidade de carbono armazenado e suas características de resistência mecânicas em altas temperaturas.

Seus maiores consumidores para geração de eletricidade são os países industrializados como China e Estados Unidos, que juntas, consomem cerca de 60% do carvão mineral produzido mundialmente. Esses mesmos países, também são os maiores detentores de reserva de carvão mineral, sendo os Estados Unidos o país que possui maior concentração de reservas de carvão mineral em seu território. (BRASIL, 2008)

No Brasil em 2009, a energia obtida pela combustão do carvão mineral representou apenas 4,6% do total da matriz energética, enquanto que a energia da biomassa representou mais de 30%. (BRASIL, 2013)

2.2 CARVÃO VEGETAL

O carvão vegetal é um produto orgânico de coloração negra, composto basicamente por carbono, gerado a partir da pirólise da madeira, lenha ou qualquer outra biomassa sólida.

O carvão pode ser classificado segundo sua utilização, apresentando diferentes propriedades de acordo com sua finalidade, e pode ser utilizado para uso doméstico, metalúrgico, para produção de gás, para indústria química, dentre outras aplicações (BRITO, 1990; GOLDEMBERG e LUCON, 2008).

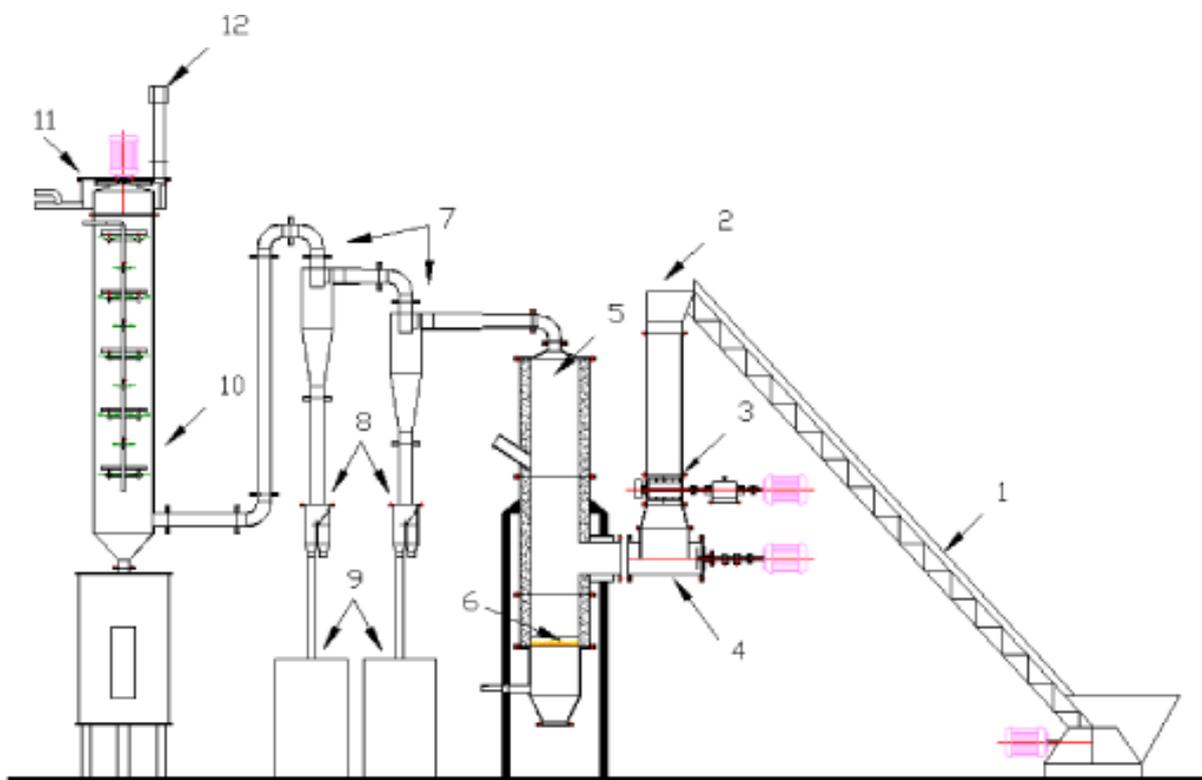
A obtenção do carvão vegetal se dá através da pirólise da biomassa em ambiente com temperatura controlada e atmosfera com ausência ou pouca presença de oxigênio, além disso, na pirólise há a geração de subprodutos como vapores e gases condensáveis, dentre eles destaca-se o líquido pirolenhoso e a formação de gases não condensáveis com alto poder calorífico. (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2008)

Um agravante na produção de carvão vegetal é o subproduto gerado na sua produção, mais conhecido como finos. Esse resíduo é responsável por grande

impacto ambiental, pois seu descarte e/ou armazenagem gera altos custos e transtornos ambientais (FONTES, QUIRINO e PASTORE JUNIOR, 1984).

A figura 3 mostra uma representação de um sistema de produção do carvão semi-automatizado por pirólise rápida com separação de finos, onde (1) é a esteira transportadora, (2) silo, (3) dosador, (4) rosca alimentadora, (5) reator, (6) injeção de ar, (7) ciclones de separação dos finos de carvão, (8) válvula para coleta de amostras, (9) tambores para armazenamento dos finos, (10) sistema de recuperação de finos (via úmida), (11) sistema de recuperação de bio-óleo e (12) chaminé.

FIGURA 3 – Esquema de planta de pirólise rápida



Fonte: Pérez *et. al.* (2006)

O Brasil é responsável pela produção de 33% de todo o carvão vegetal comercializado mundialmente, com isso, é considerado o maior produtor e exportador de carvão vegetal do mundo. Com o consumo de 25% de sua própria produção, destaca-se também como o um dos principais consumidores. (BRITO, 1991)

Segundo Goldemberg (2009), o cenário previsto para o futuro, indica o aumento de até 20% da utilização do combustível de biomassa para suprimento da demanda energética. Fato importante, pois mostra o potencial do Brasil na produção e utilização da biomassa como fonte energética.

O carvão possui grande vantagem em relação à queima direta da madeira por possui maior concentração de carbono e, conseqüentemente, maior poder calorífico superior. Também possui benefícios em relação ao carvão mineral, além de contribuir significativamente com a redução da poluição ambiental. A figura 4 ilustra e compara o ciclo do carvão mineral com o ciclo do carvão vegetal, e o impacto causado no meio ambiente pela liberação de gases poluentes.

FIGURA 4 – Ciclo de produção dos carvões mineral e vegetal.



Fonte: Marques (2008)

A principal vantagem na produção do carvão vegetal, é que para o crescimento da amostra há a captação de gases poluentes, reduzindo-o em aproximadamente três toneladas de CO₂ da atmosfera a cada tonelada de carvão

vegetal produzido, devido a captação de CO₂ realizada pela madeira (MARQUES, 2008).

2.3 BRIQUETAGEM

A briquetagem é o processo de compactação ou prensagem de materiais particulados, com a finalidade de se obter um aglomerado de partículas, resultando em um sólido com formas e dimensões controladas. Este processo possibilita fabricar produtos de diferentes geometrias, de acordo com o molde ou matriz utilizado. (LUCENA *et. al*, 2008)

Em 1789 ocorreu o primeiro registro de patente de briquetagem, realizado por Chavanne na Inglaterra, que compactou o carvão mineral em formatos de blocos. O processo consistiu na mistura dos finos de carvão mineral com diferentes materiais como terra, argila, estrume de vaca, alcatrão, óleos, madeira, resíduos, matérias vegetais, dentre outros. Porém, em 1799, com a mistura de 92% de carvão e 8% de gordura, conseguiu-se um combustível com propriedades térmicas e físicas superiores (FRANKE, 1916).

Em 1832, Marsais patenteou o processo de briquetagem de carvão com alcatrão e pedaços de carvão, mas encontrou dificuldades em produzir briquetes com alta resistência mecânica. Após dez anos Marsais abriu a primeira fábrica de briquetes em Bérard, França. Quatorze anos depois, abriu sua segunda fábrica de briquetes (FRANKE, 1916).

Estes processos de briquetagem continuaram nas décadas seguintes com a inclusão de novos materiais, como por exemplo, os resíduos de madeiras e os resíduos agroflorestais.

No início da década de 1960, a Companhia Siderúrgica Belgo Mineira – CSBM – iniciou os primeiros processos de briquetagens de carvão no Brasil, aproveitando os finos de carvão (PEREIRA, 2009).

Na mesma década, a Companhia Brasileira de Briquetes iniciou sua produção de briquetes de finos de carvão, voltada à utilização nos processos siderúrgicos (CARVALHO e BRINCK, 2010).

De acordo com Carvalho e Brinck (2010), em meados à década de 1970, a empresa Carvel, instalada em Minas Gerais, iniciou a fabricação de prensas para briquetagens, além da produção de briquetes de diversos materiais destinados as empresas siderúrgicas.

Em 1970 o Brasil implantou políticas energéticas para aumentar o uso da utilização de biocombustíveis em sua matriz energética, incentivando o uso de materiais combustíveis de fontes renováveis (FELFLI *et. al.*, 2011).

Na década de 1980, iniciaram-se vários estudos e publicações na área de briquetagem, contribuindo enormemente para com o conhecimento técnico científico dos materiais potencialmente briquetáveis, além dos principais processos de briquetagem.

Atualmente, os processos de briquetagem são realizados com compactação a frio ou a quente, e em baixa ou alta pressão, e são classificados basicamente em briquetagens por impacto com prensas excêntricas (pistão), briquetagens por extrusão com parafuso sem fim e briquetagens por extrusão com rolos (CARVALHO e BRINCK, 2010; CHRISOSTOMO, 2011).

Segundo Moro (1987 *apud* PEREIRA, 2009), o processo de briquetagem de finos de carvão divide-se nas seguintes metodologias:

- Moagem: necessário para evitar partículas muito grandes que, desfavorecem o processo de compactação e perda na eficiência na interação entre o aglutinante.
- Aglutinação: essencial para fazer a interação entre as partículas dos materiais. Para a escolha do material é necessário se levar em consideração o processamento, o poder adesivo nos materiais e o custo.
- Prensagem: fundamental para fazer a densificação das partículas e obter as dimensões e formas desejadas. Normalmente a eficiência da compactação aumenta conforme o aglutinante utilizado.

- Secagem: este processo é necessário para os aglutinantes que utilizam elevada quantidade de água, aumentando a umidade final do briquete.
- Estocagem: após secagem os briquetes devem ser armazenados ou empacotados, e preferencialmente protegidos da umidade.

De acordo com Yamaji *et. al.* (2013) o processo de briquetagem pode reduzir o volume do resíduo em até dez vezes, dependendo do material e da característica das partículas a serem compactadas.

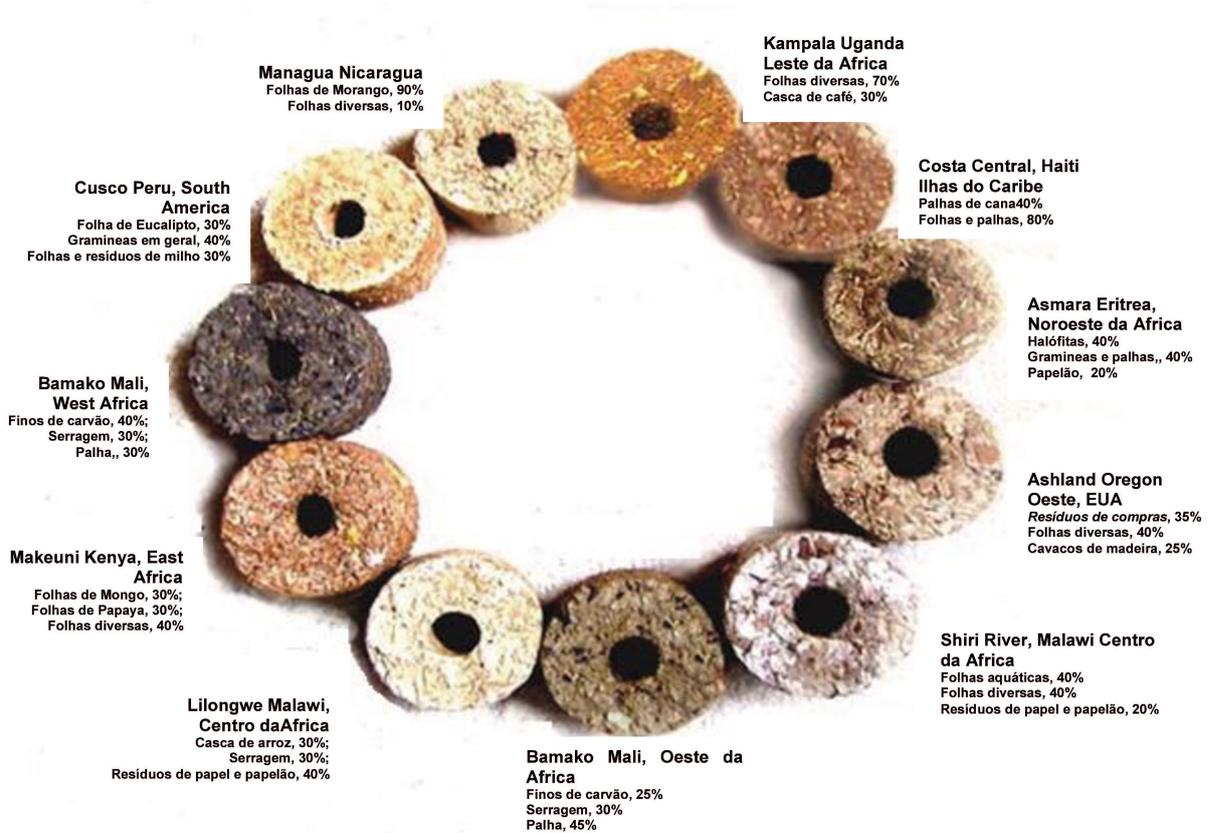
2.4 BRIQUETES

Os briquetes são materiais densificados e sólidos, com diferentes formatos e tamanhos, formados pela aglomeração de materiais finos ou particulados de origem orgânica e vegetal. Geralmente são produzidos a partir de resíduos de origem vegetal (fig. 5), porém, atualmente é comum se encontrar briquetes produzidos com diversos materiais conforme mostrado na figura 6 (LEON, 1985).

Os formatos cilíndricos são os mais comuns, principalmente pela facilidade da produção do conjunto molde/matriz; porém, encontram-se inúmeras formas e geometrias de briquetes, atendendo as necessidades de cada finalidade de aplicação. Na figura 5, os furos centrais nos briquetes aumentam a área superficial, facilitando a liberação de energia de forma mais eficiente na combustão.

De acordo com Yamaji *et. al.* (2010), os briquetes podem ser utilizados para aquecimento de residências, além de fornos em restaurantes e padarias. Porém, o uso não se restringe a pequenas aplicações, sendo utilizados vastamente nos diversos setores industriais.

FIGURA 5 – Briquetes de materiais vegetais produzidos em alguns países do mundo



Fonte: Adaptado de, Natural Building Blog (2014)

FIGURA 6 – Briquetes de materiais diversos



Fonte: Tecnobriq (2014)

Alguns materiais necessitam da utilização de um agente aglutinante em sua composição, dependendo da resistência mecânica à compressão do material, após ser compactado (SAMPAIO, COSTA e ANDRADE, 2007).

De acordo com Gentil (2008), resíduos de madeiras não necessitam de adição de aglutinante devido à capacidade adesiva da lignina encontrada em sua composição; porém, é necessária a elevação da temperatura para ativar o amolecimento e plastificação da lignina. Entretanto, Chrisostomo (2011), atingiu níveis de resistência mecânicos adequados para briquetes de resíduos lignocelulósicos, sem adição de aglutinante e sem elevação da temperatura.

Pereira (2009) destaca a importância sobre a escolha adequada para aglutinar os finos de carvão, uma vez que, os finos de carvão, por ser composto basicamente por carbono, não provoca a interação química entre as partículas.

2.5 AGLUTINANTES

O aglutinante é uma substância natural ou sintética que age nos materiais a serem compactados, de forma a evitar o desprendimento das partículas. De acordo com Oliveira (2013), vários materiais podem ser utilizados como aglutinante, porém, a adição não pode interferir negativamente nas principais propriedades dos briquetes, e seu percentual deve ser limitado a 10% de aglutinante, para não inviabilizar economicamente o briquete.

Pereira (2009) e Bezzon (1994) estudaram diversos materiais naturais e sintéticos para serem usados como aglutinante sendo eles: dextrina, silicato de sódio, alcatrão, amido de milho, farinha de babaçu, dentre outros.

Fontes *et. al.* (1984), Quirino e Brito (1991), Benício *et. al.* (2011), Robetti (2013) afirmam o uso do amido de milho industrial (sem processo de beneficiamento) como principal aglutinante para briquetagem de finos de carvão e serragem de madeira, apesar de citarem e compararem a outros materiais por viabilidade econômica e disponibilidade regional.

Cruz (2008) avaliou alguns materiais para serem usados como aglutinante de finos de carvão e concluiu que ao se usar o amido de milho, o briquete apresentou maior resistência mecânica.

3 MATERIAIS

3.1 FINOS DE CARVÃO VEGETAL

Os finos de carvão mostrados na figura 7 foram obtidos a partir do processamento do carvão vegetal de eucalipto, marca Bom Jesus, adquirido em embalagens com 5,0 kg no comércio local (Sorocaba / SP).

FIGURA 7 – Finos de carvão vegetal.



Fonte: Autoria própria.

Inicialmente, o carvão vegetal passou pelo triturador de resíduos orgânicos, marca Trapp, modelo TR 200 e posteriormente processado em um liquidificador industrial com capacidade de 2 litros, e em seguida moído no moinho de facas tipo Willey marca Marconi, por tempo suficiente para o material passar pela malha da peneira com abertura de 2 milímetros, posicionada no bocal de saída do moinho. A diminuição do tamanho das partículas do carvão possibilitou representar as características dos resíduos gerados e descartados nas carvoarias.

3.2 FINOS DE CARVÃO MINERAL

Os finos de carvão mineral (fig. 8) foram cedidos por uma indústria consumidora do material, localizada na região de Itapeva / SP. O material foi classificado em peneirador vibratório orbital, marca/modelo MA-75, com o auxílio de peneiras com diferentes aberturas de malha, variando progressivamente entre 35 e 200 meshs.

FIGURA 8 – Finos de carvão mineral



Fonte: Autoria própria.

Após a classificação, os materiais foram acondicionados em embalagens plásticas hermeticamente fechadas, com a finalidade de se manter as características das amostras conforme encontradas no ato da coleta, para posterior análise.

3.3 AMIDO DE MILHO

O amido de milho tipo um da marca Yoki, mostrado na figura 9, foi adquirido no comércio local (Sorocaba / SP) em embalagens com um quilograma. Primeiramente o amido passou pelo processo de classificação de partículas no peneirador vibratório, com auxílio das peneiras com diferentes tamanhos de abertura. Posteriormente, foi armazenado em embalagens plásticas hermeticamente fechadas.

FIGURA 9 – Amido de milho

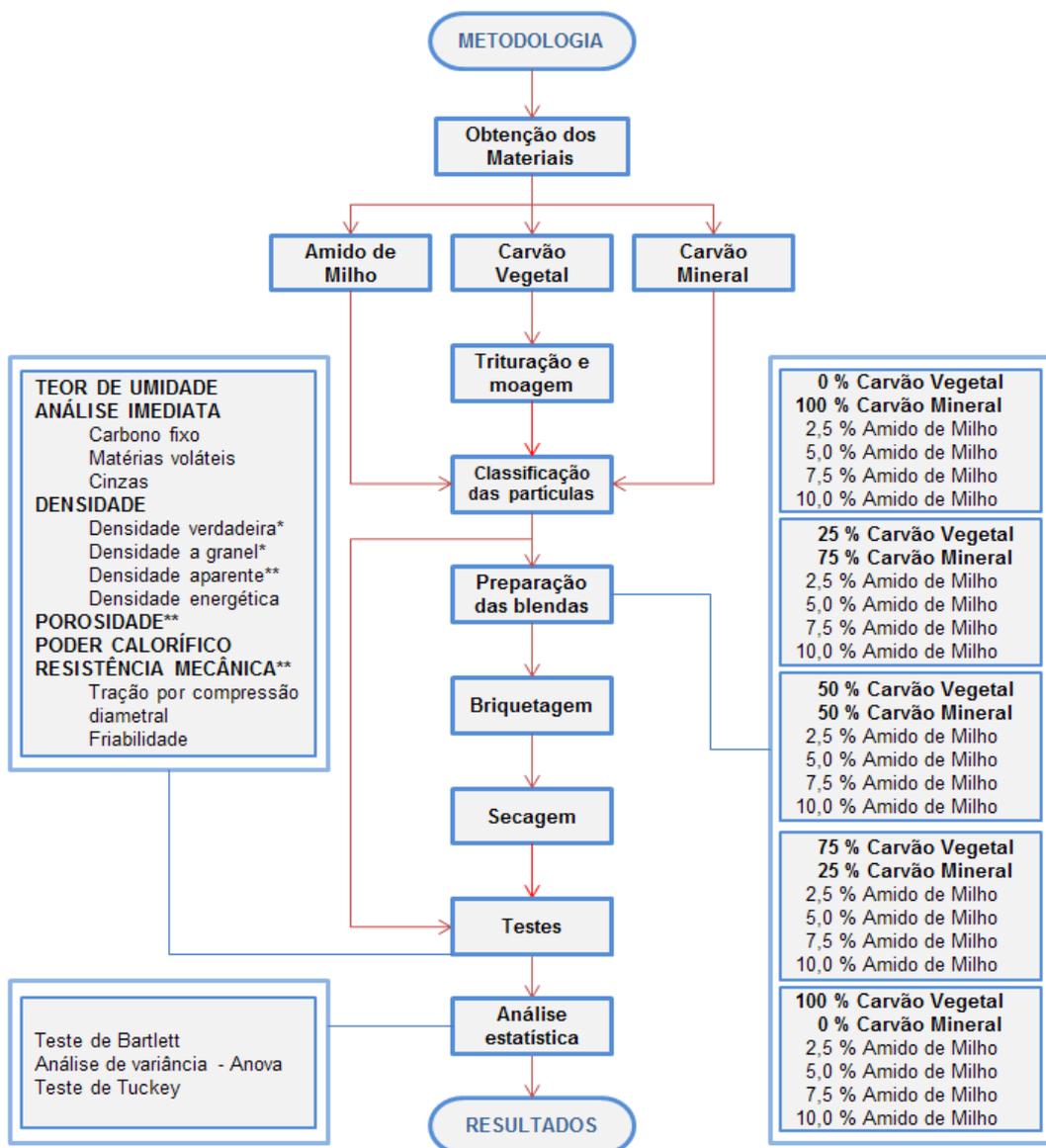


Fonte: Autoria própria.

4 METODOLOGIA

Um fluxograma simplificado representa a sequência metodológica utilizada para a produção e análise das blendas e briquetes (fig. 10).

FIGURA 10 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Autoria própria.

Os testes foram realizados para os materiais pré-briquetagem e pós-briquetagem.

*Testes realizados somente para os materiais particulados.

**Testes realizados somente para os materiais briquetados.

O fluxograma mostrou que apenas o carvão vegetal será triturado devido ao elevado tamanho de partícula.

Após a classificação e distribuição das partículas, parte do material foi separada para se realizar as análises e o restante foi utilizado para a produção das blendas.

Para a composição das blendas, foram considerados as proporções de finos de carvão vegetal e carvão mineral como 100%, enquanto que o amido de milho foi adicionado à porcentagem em relação à massa dos carvões.

Com a preparação das blendas, foram separadas dez porções entre 30 e 35g para ser briquetado individualmente.

Após a secagem em temperatura ambiente, os briquetes foram estudados. Os resultados obtidos nos ensaios foram analisados estatisticamente e apresentados os resultados em formas de gráfico e tabelas.

Todos os testes e ensaios dos materiais foram realizados no Laboratório de Biomassa e Bioenergia da Universidade Federal de São Carlos, *Campus Sorocaba*.

As análises realizadas em outros locais serão descritas na metodologia.

4.1 PRODUÇÃO DAS BLENIDAS

As blendas (mistura de dois ou mais materiais) foram obtidas através da combinação dos materiais (carvão mineral e/ou carvão vegetal, o amido de milho e água – H₂O).

A mistura dos materiais foi realizada em um béquer de vidro de 1.000 mL com auxílio de uma espátula usada para a mistura dos particulados até a completa a homogeneização. Posteriormente foi adicionado água com temperatura de aproximadamente 100°C (em ebulição) no béquer e foram novamente misturados manualmente até que a massa ficasse com textura úmida e homogênea, conforme apresentado na figura 11.

FIGURA 11 – Processamento para obtenção da blenda de carvões.



Fonte: Autoria própria.

Nota – Processamento para obtenção da blenda, onde: a) materiais que compõem a blenda (amido de milho, carvão mineral e carvão vegetal); b) mistura da blenda; c) mistura da blenda com água; d) separação da porção a ser briquetada; e) blenda separada em pequenas porções para briquetagem.

O volume de água adicionada ocorreu em função da composição dos materiais, sendo que para as blendas com maior proporção de carvão vegetal, foi necessário um volume maior em relação às blendas com menor proporção de carvão vegetal (APÊNDICE A).

4.2 FORMAÇÃO DOS BRIQUETES

Os briquetes (fig. 12) foram obtidos individualmente, inserindo pequenas porções (aproximadamente 30 g) da blenda, no interior do conjunto de molde cilíndrico metálico fabricado em aço inoxidável, com dimensões aproximadas de 180 mm de altura por 35 mm de diâmetro, composto por fundo, matriz e punção (fig. 13).

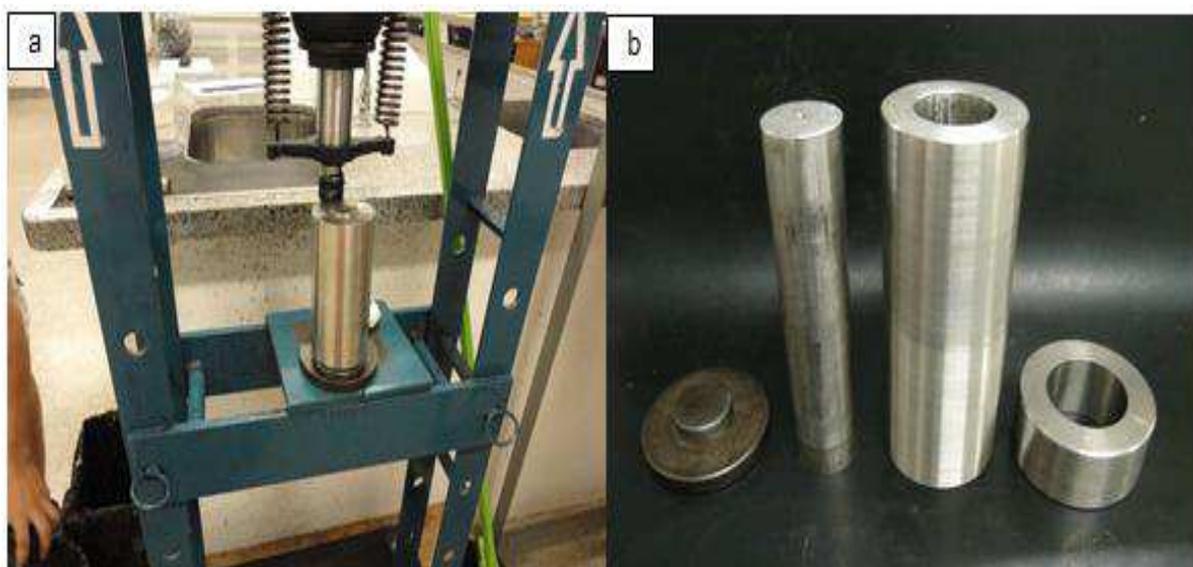
FIGURA 12 – Briquetes



Fonte: Autoria própria.

A compactação foi realizada na prensa hidráulica, marca Marcon com capacidade de 15.000 kgf, conforme mostrado na figura 13.

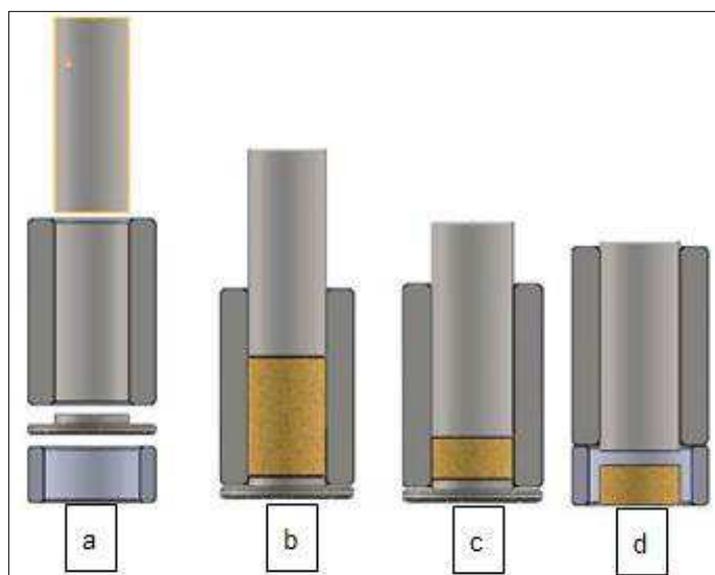
Para a briquetagem aplicou-se a força máxima de 5.000 kgf e a compactação foi realizada em temperatura ambiente sem tempo de permanência sob pressão, aliviando-se a carga imediatamente ao se atingir à força máxima.

FIGURA 13 – Prensa de briquetagem e composição dos moldes

Fonte: Autoria própria.

Nota: (a) Prensa hidráulica manual de 15t; (b) Componentes do molde de briquetagem

A sequência de briquetagem em laboratório está representada na figura 14, onde, (a) Componentes do molde metálico: matriz, pistão, tampa (fundo), anel; (b) 1º estágio da compactação: material particulado; (c) 2º estágio: material compactado; (d) 3º estágio: retirada do material compactado do interior do molde: briquete.

FIGURA 14 – Sequência do processo de briquetagem

Fonte: Autoria própria.

4.3 CLASSIFICAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DAS PARTÍCULAS

A classificação e distribuição das partículas possibilitou a separação das partículas do material de acordo com sua granulometria para ser utilizada separadamente, além de quantificar a proporção de cada tamanho de partícula inserida no briquete.

A classificação das partículas foi realizada segundo norma ASTM D-293, em um peneirador vibratório orbital MA-75 com um conjunto de peneiras com abertura de 20, 35, 60, 100 e 200 meshes (fig. 15). O tempo de vibração e peneiramento foi de aproximadamente 2 segundos para cada grama de material.

FIGURA 15 – Peneirador vibratório com conjunto de peneiras.



Fonte: Autoria própria.

Após pesagem do material retido em cada peneira, utilizou-se a equação (1) para o cálculo da granulometria.

$$gr = \frac{mr}{mt} * 100 \quad (1)$$

Onde:

gr: granulometria, em %;

mr: massa retida na respectiva peneira, em g;

mt: massa total analisada, em g;

100: Fator de conversão de unidade, adimensional.

4.4 TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade expressa, em percentual, à massa de H₂O contida no material, em relação à massa analisada completamente isenta de umidade.

A análise do teor de umidade foi baseada na norma ASTM D-3173, e os resultados foram descritos em porcentual (%) em relação à massa seca do material, também conhecida como base seca.

Para tal verificação, foi introduzido aproximadamente 1,5 g de cada material separadamente no cadinho previamente calcinado, e acondicionado dentro da estufa de secagem com circulação e renovação de ar, marca Marconi (fig. 16) à temperatura de 105 ±2°C. A elevada temperatura e o tempo de permanência possibilitou a eliminação total da umidade contida nos materiais.

Após a retirada dos cadinhos da estufa, foi utilizado um dessecador com sílica gel para armazenar os cadinhos com os materiais, a fim de manter a proporção de umidade dos materiais enquanto ocorreu o resfriamento dos cadinhos. Em aproximadamente 30 minutos após a retirada, a massa dos cadinhos foram verificadas com auxílio de uma balança de precisão marca Shimadzu, modelo BL3200H, com capacidade de 3.200g e precisão de 0,01g.

FIGURA 16 – Estufa de secagem com circulação e renovação de ar

Fonte: Autoria própria

A fim de comprovar os teores de umidade, os materiais também foram inseridos na balança analisadora de umidade marca Shimadzu, modelo And MX-50 (fig. 17), ao qual permitiu visualizar os valores referentes à umidade de forma simples e rápida. Os teores de umidade das blendas pós briquetadas foram analisadas no mesmo equipamento.

O teor de umidade foi calculado conforme equação (2).

$$TU = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

TU: Teor de umidade, em %;

Mu: Massa úmida, em g;

Ms: Massa seca, em g.

FIGURA 17 – Balança determinadora de umidade



Fonte: Autoria própria

4.5 ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA

A análise química imediata consistiu em verificar os teores de matérias voláteis, cinzas e carbono fixo para todos os materiais, antes e após o processo de briquetagem. Os ensaios foram realizados em duplicata e, quando apresentaram variações superiores a 5%, foram refeitos sob o mesmo procedimento.

Para as análises, foram consultadas e seguidas recomendações da norma técnica ASTM D3172.

Os resultados obtidos no método tradicional foram comparados aos valores obtidos pela curva termogravimétrica dos materiais, conforme metodologia mostrada na seção 4.3.

4.5.1 Teor de Matérias Voláteis

O teor de materiais voláteis definiu o percentual de compostos orgânicos de alto e/ou baixo poder calorífico, que estão contidos nos materiais em relação à massa total, isenta de umidade.

A verificação do teor de matérias voláteis foi baseada na norma técnica ASTM D 3175, onde o procedimento foi inserir aproximadamente 1,5 g de material seco, em um cadinho de porcelana previamente calcinado.

Posteriormente, os cadinhos com tampa foram colocados sobre a porta (aberta) de um forno mufla previamente aquecido a $950 \pm 2^\circ\text{C}$, onde permaneceram durante 3 min, em seguida, os cadinhos foram colocados no interior da câmara de aquecimento do forno por tempo de 7 min, mantendo-se a porta do forno aberta (fig. 18).

FIGURA 18 – Forno mufla com cadinhos



Fonte: Autoria própria

A temperatura do forno programada inicialmente para 950°C manteve-se acima de 600°C com a porta aberta, para todas as repetições.

Para verificação do percentual de materiais voláteis utilizou-se a equação (3).

$$TMV = \frac{Mi - Ma}{Mi} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

TMV: Teor de materiais voláteis, em %;

Mi: Massa inicial da amostra, em g;

Ma: Massa após aquecimento da amostra, em g.

4.5.2 Teor de Cinzas

O teor de cinzas expressou a porcentagem de materiais inorgânicos, minerais, contidas nos materiais, em relação à massa do material completamente isenta de umidade.

A análise do teor de cinzas foi determinada em acordo com a norma ASTM D-3174, onde aproximadamente 1,5 g de material seco foram colocados no forno mufla à temperatura de 750 ±10°C durante o período de quatro horas, a fim de oxidar as matérias orgânicas contidas nos materiais.

Após a retirada dos cadinhos do interior do forno, os mesmos foram resfriamento no interior do dessecador com sílica gel por aproximadamente 30 minutos e em seguida a massa do material foi verificada em uma balança semi-analítica marca Shimadzu modelo BL 3200.

A equação (4) possibilitou a verificação do teor de cinzas.

$$TC = \frac{Mi - Mf}{Mi} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

TC: Teor de cinzas, em %;

Mi: Massa inicial da amostra, em g;

Mf: Massa final da amostra, em g.

4.5.3 Teor de Carbono Fixo

O teor de carbono fixo foi o percentual da massa orgânica do material rico em carbono, em relação à massa do material totalmente isenta de umidade. Este elemento é o principal responsável pelo aumento do poder calorífico encontrado nos materiais.

A verificação do teor de carbono fixo foi realizada indiretamente, subtraindo os valores obtidos para os teores de materiais voláteis e teores de cinzas, com o percentual da massa inicial seca (100%).

Portanto, o teor de carbono fixo no material foi dado pela equação (5).

$$TCF = 100 - (TMV + TC) \quad (5)$$

Onde:

TCF: Teor de carbono fixo, em %;

100: Percentual da massa inicial contendo materiais voláteis e cinzas;

TMV: Teor de matérias voláteis, em %;

TC: Teor de cinzas, em %.

4.6 DENSIDADES

A densidade de um material sólido especifica o volume ocupado por uma determinada unidade de massa, independente da sua característica física e geométrica.

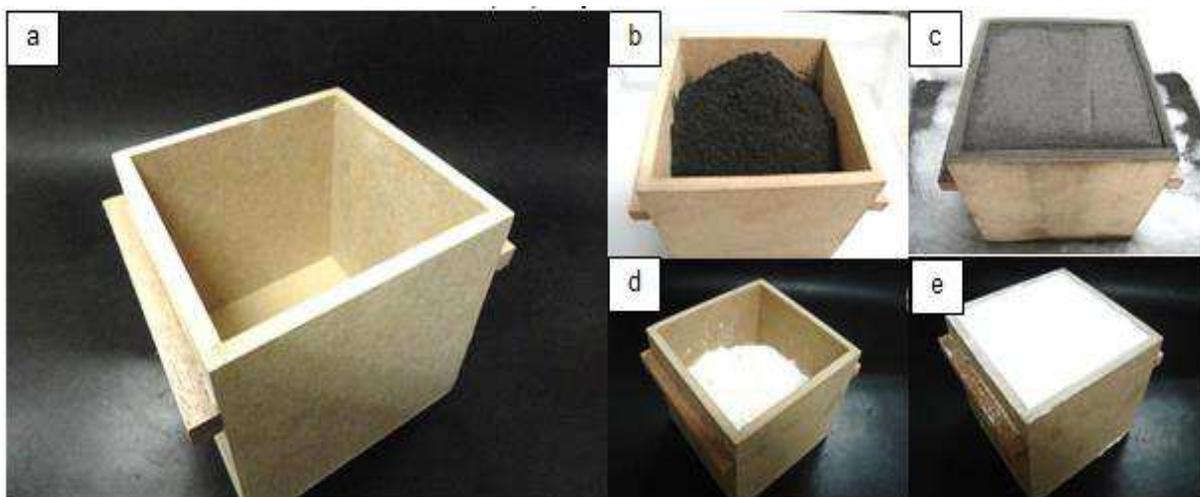
4.6.1 Densidade a Granel

A densidade a granel foi representada pela massa e o volume dos materiais utilizados inicialmente, em seu estado físico, forma e característica, inclusive considerando o teor de umidade contida no momento da obtenção do material.

A densidade a granel foi verificada baseando-se na norma ABNT NBR 6922, colocando-se o material em uma caixa volumétrica com dimensões de 10 x 10 x 10 cm, reduzido e proporcionalmente conforme sugere a norma.

A figura 19 apresenta a caixa volumétrica vazia, parcialmente com material e totalmente completa de material.

FIGURA 19 – Caixa volumétrica



Fonte: Autoria própria.

Nota – Caixa volumétrica, onde: a) caixa volumétrica com 1.000 cm³; b) parcialmente preenchida com carvão; c) completa com carvão; d) parcialmente preenchida com amido de milho; e) completa com amido de milho.

O recipiente foi preenchido com os materiais separadamente e com assistência da balança de precisão marca Shimadzu BL 320, foi possível a verificação da massa inicial e final da caixa volumétrica.

A diferença entre as massas iniciais e finais, sobre o volume interno conhecido da caixa (1.000 cm^3), estabeleceu-se a densidade a granel dos materiais, conforme equação (6)

$$\rho g = \frac{mrm - mr}{vol} \quad (6)$$

Onde:

ρg : Densidade a granel, em g.cm^{-3} ;

mr : Massa do recipiente, em g;

mrm : Massa do recipiente com o material, em g;

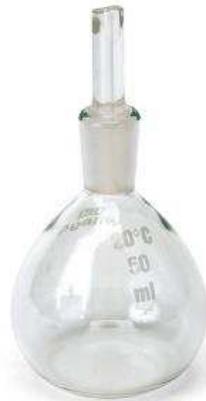
vol : Volume interno da caixa, em cm^3 .

4.6.2 Densidade Verdadeira

A densidade verdadeira mostra a densidade real do material, ou seja, desconsiderando os espaços vazios entre as partículas nos materiais, como se fosse um sólido altamente compactado.

A densidade verdadeira foi verificada com o auxílio de um picnômetro (fig. 20) segundo norma ASTM 167, e consistiu em macerar uma pequena porção de material em um cadinho de cerâmica, com a finalidade de deixar os materiais com o menor tamanho de partícula possível.

Após a maceração, o material foi introduzido no picnômetro de 25 ml e completado com H_2O destilado, em temperatura ambiente.

FIGURA 20 – Picnômetro

Fonte: Autoria própria.

Com auxílio da balança semi-analítica, foi possível verificar as massas e através da equação (7) foi possível calcular as densidades verdadeiras dos materiais.

$$\rho v = \frac{mi.}{mhi - mh} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

ρv : Densidade verdadeira, em g.mm⁻³;

mi : Massa inicial do material, em g;

mh : Massa do picnômetro com H₂O, em g;

mhi : Massa do picnômetro com H₂O e material, em g;

100: Fator de conversão de unidade, adimensional.

Para as blendas, os valores das densidades verdadeiras foram calculados de acordo com a composição dos materiais utilizando-se das médias ponderadas dos resultados das partículas.

4.6.3 Densidade Relativa Aparente (Pós-briquetagem)

A densidade relativa aparente foi expressa pelo volume e massa ocupada pelos materiais após o processo de briquetagem, de forma individual, considerando apenas a geometria do briquete.

Para a averiguação da densidade relativa aparente, os briquetes foram medidos em sua altura e diâmetro com auxílio de um paquímetro digital marca Digimess com precisão de 0,01mm, para obtenção do volume total de cada briquete.

O cálculo do volume foi realizado considerando o formato cilíndrico do briquete, multiplicando sua área circunferencial pela altura, como segue a equação (8).

$$vol_{br} = \left(\frac{\pi * \Phi^2}{4} * l \right) * 10^{-3} \quad (8)$$

Onde:

- vol_{br} : Volume do briquete, (volume do cilindro), em cm^{-3} ;
- π : 3,14 (constante adimensional);
- Φ : Diâmetro, em mm;
- L : Comprimento (altura) do briquete, mm;
- 10^{-3} : Fator de conversão de unidade, adimensional.

Posteriormente foi verificado a massa do briquete em uma balança semi-analítica. Foram realizadas dez repetições para o cálculo do valor da massa média e a densidade aparente foi calculada segundo a equação (9).

$$\rho a = \frac{m}{vol_{br}} \quad (9)$$

Onde:

- ρ_a : Densidade aparente, g.cm^{-3} ;
 m : Massa do briquete, em g;
 vol_{br} : Volume do briquete, em cm^3 .

4.6.4 Densidade Energética

A densidade energética é um importante parâmetro para combustíveis sólidos compactados, pois avalia a quantidade de energia armazenada em um determinado volume de material.

Para a avaliação da densidade energética dos materiais, foram levados em consideração volume do material, bem como o seu poder calorífico. Portanto, para as blendas, foi utilizado o cálculo médio ponderado dos valores do poder calorífico superior (seção 4.8), de acordo com os percentuais de cada material composto na blenda.

A equação (10) possibilitou a obtenção dos valores expressos em kJ.m^{-3} .

$$\rho_e = \rho_a * PCS * 10^{-6} \quad (10)$$

Onde:

- ρ_e : Densidade energética, em $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \times 10^6$;
 ρ_a : Densidade relativa aparente, em g.cm^{-3} ;
 PCS : Poder Calorífico Superior, em kJ.kg^{-1} ;
 10^{-6} : Fator de conversão de unidade, adimensional.

4.7 POROSIDADE

O valor da porosidade de um material compactado determina o percentual de espaços vazios no interior de um material sólido, ou seja, é a comparação entre a densidade relativa aparente e a densidade verdadeira dos materiais, e possui uma

relação inversamente proporcional à densidade aparente do material. A porosidade foi expressa pela equação (11).

$$Por = 100 - \left(\frac{\rho a}{\rho v} * 100 \right) \quad (11)$$

Onde:

Por = Porosidade, em %;

ρa = densidade relativa aparente, em g.cm^{-3} ;

ρv = densidade verdadeira, em g.cm^{-3} .

4.8 REDUÇÃO VOLUMÉTRICA

A redução volumétrica possibilitou verificar o percentual de redução de volume dos materiais após a briquetagem. Este parâmetro comparou a densidade a granel com a densidade relativa aparente do briquete.

A equação (12) mostra a equação utilizada para os cálculos, expressos em %.

$$Rv = \left(\frac{\rho a}{\rho g} * 100 \right) \quad (12)$$

Onde:

Rv = Redução volumétrica, em %;

ρa = densidade relativa aparente, em g.cm^{-3} ;

ρg = densidade a granel, em g.cm^{-3} ;

100 = fator de conversão de unidade, adimensional.

4.9 EFICIÊNCIA DE COMPACTAÇÃO

A eficiência de compactação mostra a capacidade do processo de briquetagem na compactação dos materiais. Para isto, foram analisados os valores das densidades verdadeiras com as densidades aparentes, ou seja, quanto maior a porosidade do briquete, menor a eficiência do processo.

Este parâmetro é inversamente proporcional à porosidade do material, e o cálculo é expresso em %, conforme equação (13)

$$Ec = 100 - Por \quad (13)$$

Onde:

Ec = Eficiência de compactação, em %;

Por = Porosidade, em %;

100= fator de conversão de unidade, adimensional.

4.10 ESTABILIDADE DIMENSIONAL

A estabilidade dimensional do briquete mostra a diferença dimensional linear causada pela expansão ou contração do briquete em relação ao tempo.

Para a verificação, realizaram-se as medições com auxílio de um paquímetro digital, imediatamente após a retirada do briquete do molde de compactação e após o intervalo de tempo de 1, 2, 24, 48, 72 e 96 horas.

Os briquetes foram armazenados para secagem em bandejas plásticas e permaneceram expostas às condições ambientais de temperatura e umidade local no mês de janeiro, fevereiro e março de 2013 em ambiente laboratorial sem ar condicionado, no município de Sorocaba SP, com média de temperatura e umidade aproximada de 23° C.e 55%, respectivamente.

A expansão foi expressa pela diferença de dimensões lineares (altura do briquete) em relação ao tempo, conforme equação (14).

$$ED = \frac{dim_n - dim_i}{dim_i} * 100 \quad (14)$$

Onde:

ED: Estabilidade dimensional, em %;

dim_n: Dimensão linear, em mm;

dim_i: Dimensão linear inicial, em mm;

100: Fator de conversão de unidade, adimensional.

4.11 PODER CALORÍFICO SUPERIOR

O poder calorífico é a energia contida no material e liberada na forma de calor por uma determinada massa em sua completa combustão.

Para a verificação do poder calorífico superior (PCS), foi introduzido aproximadamente 0,5 g de material isento de umidade no interior da bomba calorimétrica (fig. 21 a).

Posteriormente, a bomba calorimétrica foi inserida no calorímetro adiabático marca Ika, modelo C-5000 (fig. 21 b), e de acordo com a norma ASTM D-5865 executou-se o procedimento de determinação do poder calorífico superior do material.

O resultado foi expresso em J/g diretamente no visor do calorímetro, posteriormente foi convertido para kcal.kg⁻¹.

FIGURA 21 – Bomba calorimétrica e calorímetro

Fonte: Autoria própria

4.12 RESISTÊNCIA MECÂNICA

A resistência mecânica de um material é a força resultante do material quando o mesmo é solicitado externamente. As principais características mecânicas de um material briquetado são verificadas na curva tensão (σ) deformação (mm/mm), obtido pelo ensaio de resistência mecânica do material, e o índice de friabilidade, verificado no ensaio de resistência ao impacto e abrasão.

4.12.1 Ensaio de Tração por Compressão Diametral

O ensaio de tração por compressão diametral foi escolhido pela impossibilidade de execução do ensaio de tração direta, devido à geometria e característica do material constituinte do corpo-de-prova (briquete) em análise.

Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios mecânicos marca Emic, modelo DL30000 (fig. 22) com assistência de uma célula de carga de 5kN e transdutor de deslocamento interno.

FIGURA 22 – Máquina de Ensaio Universal



Fonte: Emic (2009)

Nesta análise, adaptou-se a norma ABNT NBR 7222, onde o briquete foi comprimido à velocidade de $3,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ no sentido radial, por ser a posição de menor resistência dos materiais com formatos cilíndricos. Foram ensaiados cinco repetições para cada tratamento.

A força e deformação máxima foram obtidas diretamente pelo programa Tesc, enquanto que a resistência mecânica foi dada pela equação (15).

$$\sigma_{Tx} = 2 * \frac{F}{(\pi * \Phi * l)} \quad (15)$$

Onde:

σ_{Tx} : Resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

Z : Constante, adimensional;

F : Carga aplicada, em kN;

ϕ : Diâmetro do briquete, em mm;

l : Comprimento ou altura do briquete, em mm.

4.12.2 Friabilidade

Friabilidade é o comportamento mecânico e físico do material compactado em se desatar do sólido aglomerado, quando submetido a impactos e/ou processos abrasivos ocasionando a fratura do material em partículas de materiais em pequenas porções de tamanhos e formas irregulares.

A friabilidade do briquete foi verificada no friabilômetro² (fig. 23) com a adaptação da norma ABNT NBR 8740, também sugerido por Oliveira *et. al.* (1982) onde as dimensões internas do tambor foram reduzidas para 30 x 30 x 10 cm, com rotação de 35 rotações por minuto (rpm) durante 15 minutos, totalizando 500 rotações. Após o procedimento, o material foi retirado do interior do friabilômetro e separado por peneira de com abertura de malha de 6,35 mm.

O material retido na peneira foi pesado em balança de precisão, para verificação da massa fragmentada pelo efeito de quedas e abrasão no ensaio de friabilidade, também conhecida por ensaio de tamboreamento. O índice de friabilidade foi determinado pela equação (16)

$$Fr = \frac{mi - mr}{mi} * 100 \quad (16)$$

Onde:

² Equipamento construído e adaptado exclusivamente para realização deste ensaio.

- Fr*: Índice de friabilidade, em %;
- mi*: massa inicial, em g;
- mr*: massa retida na peneira, em g;
- 100*: Fator de conversão de unidades, em %.

FIGURA 23 – Friabilômetro



Fonte: Autoria própria

4.13 TERMOGRAVIMETRIA

A análise termogravimétrica consistiu em verificar a degradação do material em função da temperatura, e possibilitou comparar os teores de umidade, de matérias voláteis, de cinzas e de carbono fixo.

Para a análise, foi inserida uma pequena porção do material no cadinho de platina e inserida no analisador termogravimétrico, marca Perkin Elmer, modelo Pyris 1 (fig. 24), que satisfaz a norma ASTM D-7582.

FIGURA 24 – Analisador termogravimétrico



Fonte: Autoria própria

A faixa de temperatura analisada foi de 50°C a 900°C com taxa de aquecimento de 20°C.min⁻¹ e vazão de ar sintético de 20 ml.min⁻¹. Os resultados foram expressos diretamente no programa Pyris equipamento em formato de planilha e gráfico, porém, posteriormente foram analisados e tratados com auxílio do programa Origin Pró 8.

4.14 DELINEAMENTO ESTATÍSTICO

4.14.1 Número Mínimo de Repetições

A amostragem foi definida respeitando o mínimo de dez graus de liberdade no valor residual para cada tratamento, para as análises estatísticas, como sugere Pereira (2010) na equação 17.

$$I(J - 1) \leq 10 \quad (17)$$

Onde:

- I*: Número de tratamentos, adimensional;
- J*: Número mínimo de repetições, adimensional;
- 10*: Constante, adimensional.

4.14.2 Análise de Homogeneidade (Bartlett), Variância (Anova) e Tuckey

As análises de variância foram realizadas com assistência do programa Excel, e do aplicativo Action.

Foi verificada a homogeneidade das amostras (variância), utilizando a metodologia de Bartlett. Quando p-valor apresentou resultado menor que o nível de significância, constatou-se que as amostras não apresentaram diferenças significativas.

Para as amostras que apresentaram p-valor menor que o nível de significância pelo método de Bartlett, foi verificado as diferenças na variância pelo método de Anova, onde foi possível verificar se houve diferença estatística entre as médias, comparando-se o grau de liberdade, resíduo e valor f, com uma tabela de significância.

Quando os resultados da tabela apresentaram valores menores que o nível de significância usado, os tratamentos foram analisados pelo método Tuckey de comparação aos pares para verificar os tratamentos que não apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

Para todas as análises foi considerado o nível de confiança de 95% ($\alpha=0,05$).

4.15 MATRIZ DE DECISÃO

Para auxiliar na escolha do tratamento mais adequado para cada aplicação, foi utilizada uma matriz de priorização.

De acordo com os aspectos mais relevantes nas propriedades dos briquetes, foram considerados níveis de importância (pontuações) crescentes, conforme relevância do atributo. Para cada tratamento e atributo foi inserida uma numeração referente à sua classificação, posteriormente, com a soma das pontuações multiplicadas pelo peso de cada atributo chegou-se a um valor de referência, onde os maiores resultados apresentam níveis significativos de prioridade em relação aos atributos analisados.

Para os atributos indesejáveis, a pontuação foi definida de forma inversa, ou seja, foi relacionado maior pontuação para características menos importantes (ruins) e maior pontuação para características mais relevantes.

5 RESULTADOS

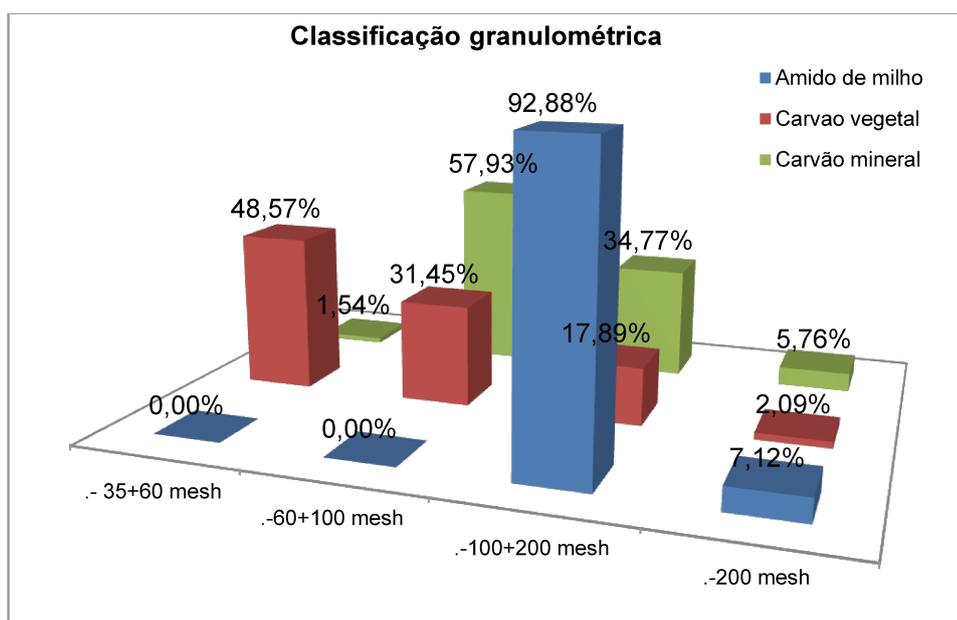
Os resultados apresentados foram divididos em duas etapas, a primeira parte foi relacionada aos resultados dos materiais particulados (antecedendo a compactação) e a segunda parte é referente aos resultados dos materiais pós-briquetagem.

5.1 MATERIAIS PARTÍCULADOS (PRÉ-BRIQUETAGEM)

5.1.1 Classificação Granulométrica

A classificação granulométrica foi realizada para verificar a faixa de tamanho (distribuição) das partículas dos finos dos carvões e do amido de milho, conforme mostrados na figura 25.

FIGURA 25 – Distribuição granulométrica



Fonte: Autoria própria

O amido de milho apresentou boa homogeneidade, mostrando maior concentração, aproximadamente 92% em massa, em partículas que passaram pela peneira de 100 mesh (149 μm) e ficaram retidas na peneira de 200 mesh (74 μm). O tamanho de partícula encontrado difere consideravelmente ao resultado apresentado por Jane *et. al.* (1992), que afirma que a granulometria do amido encontra-se entre 0,5 e 60 μm . Do mesmo modo, Da Róz (2004) por meio de imagens obtidas por meio de microscopia por varredura eletrônica (MEV) e microscopia ótica (SEM) mostra as partículas de amido de milho aglomeradas, porém afirma, com base em outros trabalhos, o tamanho de partículas do amido de milho entre 8 e 15 μm .

Com isto, é possível explicar o alto tamanho das partículas encontrado neste trabalho, uma vez que o grânulo do amido encontra-se dentro desta faixa de granulometria, o resultado encontrado pode ter apresentado divergência devido à aglomeração das partículas, estimuladas tanto pela umidade relativa do ar, ou mesmo pelo tempo de submissão durante o processo de peneiramento.

Os finos de carvão vegetal apresentaram concentração de 48% em massa na peneira de 60 mesh, decrescendo linearmente até permanecer a quantia de 2% que passou pela peneira de 200 mesh.

Os finos de carvão mineral proporcionaram uma pequena quantidade de material retido na peneira de 60 mesh, aproximadamente 1,5%, e alta concentração em partículas retidas na peneira de 100 mesh, 58%. Também apresentaram comportamento de distribuição semelhante ao carvão vegetal, decrescendo linearmente o tamanho da partícula, totalizando 5% de massa que passou através da peneira de 200 mesh.

A tabela 1 mostra os valores equivalentes das aberturas das malhas das peneiras utilizadas, em milímetro e polegada.

Os valores apresentados na distribuição granulométrica foram semelhantes aos valores de tamanho de partículas utilizadas nas blendas de carvão feitas por Jong (2007) que utilizou as partículas entre 0,062 e 0,69 mm para blendas de biomassa com carvão.

TABELA 1 – Conversão de aberturas de malha das peneiras

Aberturas das malhas das peneiras		
Mesh	Micrometro	Polegada
35	500	0,0197
60	250	0,0098
100	149	0,0059
200	074	0,0029

Fonte: Autoria própria

Comparando-se os finos de carvões e o amido de milho, verificou-se que as distribuições do tamanho das partículas diferem minimamente entre si, ou seja, aproximadamente 50% em massa das partículas, considerando os três materiais, encontram-se entre 0,149 mm e 0,250 mm, e 30% entre 0,250 mm e 0,500 mm, reiterando que os finos de carvão vegetal foram produzidos em laboratório por meio de trituração e moagem. Os materiais apresentaram pequenas diferenças entre o tamanho das partículas, contribuindo para o melhor empacotamento e homogeneidade das blendas, pois, as partículas menores tendem a se posicionar por entre as partículas maiores, reduzindo os espaços vazios e, conseqüentemente, aumentando a densidade relativa aparente. Corroboraram indiretamente também com o aumento da resistência mecânica dos briquetes, pois, segundo Kers *et. al.* (2010) a densidade do briquete é um dos principais parâmetros de qualidade e indicativo de integridade física.

A classificação granulométrica possibilitou identificar o tamanho das partículas dos materiais nos briquetes, e distribuir igualmente nas blendas, uma vez que foram utilizadas proporções idênticas às encontradas nas classificações, para as confecções de todas as blendas para os briquetes.

5.1.2 Teor de Umidade e Análise Química Imediata

A análise do teor de umidade, matérias voláteis, cinzas e carbono fixo dos materiais foram realizados com o uso da balança analisadora de umidade e conforme método tradicional com auxílio do forno tipo mufla, posteriormente os materiais foram analisados no equipamento de análise termogravimétrica. Os resultados destas análises foram semelhantes, com variações menores que 1%, portanto foram considerados os valores médios do método tradicional, e mostrados na tabela 2.

TABELA 2 – Teor de umidade e análise química imediata

Teor de umidade e análise química imediata				
Material	Umidade (%)	Cinzas (%)	Matérias voláteis (%)	Carbono fixo (%)
Amido de milho	9,80 a	0,01 a	94,95 a	5,05 a
Carvão vegetal	8,35 b	2,43 b	31,65 b	65,92 b
Carvão mineral	2,50 c	43,41 c	14,43 c	42,16 c

Fonte: Autoria própria

Todos os materiais analisados apresentaram estatisticamente, rejeições de igualdade de médias para os resultados de umidade, cinzas, matérias voláteis e carbono fixo, segundo a análise de variância.

O teor de umidade do amido de milho e do carvão vegetal apresentaram valores adequados para o processo de briquetagem, pois o teor de umidade ideal encontra-se entre 8% a 12% de umidade, enquanto que o carvão mineral está relativamente baixo para o processo de briquetagem com 2,50% de umidade.

O teor de umidade em alguns materiais pode contribuir positivamente com a formação do briquete e aumentar a sua resistência devido à facilidade de formação

de ligações de hidrogênio entre as moléculas dos materiais. Em contrapartida, a falta ou excesso de umidade no material desfavorece este processo, portanto, antes da compactação, faz-se necessário a averiguação do teor de umidade para a adequação do material.

O teor de umidade inicial dos materiais não foi relevante para a formação das blendas, pois o processo de preparação das blendas que antecedeu a briquetagem necessitou de inserção de água, que excedeu em 100% da massa seca dos materiais. Posteriormente, parte desta água foi liberada pelo processo de secagem. Sendo assim, todos os materiais estudados estiveram aptos, em relação ao teor de umidade, ao processo de formação da blenda e do briquete.

A análise química imediata dos materiais, antes da preparação das blendas, permitiu presumir características para as blendas e para os briquetes de acordo com as proporções usadas, uma vez que as características químicas dos materiais (cinzas e matérias voláteis), normalmente não são alteradas após a compactação.

De acordo com os resultados apresentados para o teor de cinzas, o amido de milho, mostrou teores de cinza muito baixo, em torno de 0,01%. Isto mostra que o amido de milho como aglutinante não interferiu negativamente no percentual de cinzas dos briquetes. Em contrapartida, o carvão mineral apresentou resultado de 43,21% em massa de cinza, valor alto, porém, próximo ao encontrado por Inácio *et. al.* (2010) com 41,19% no estudo de comparação do padrão de carvão brasileiro. O carvão vegetal com 2,4% de cinzas foi considerado apto para uso, conforme sugere James *et. al.* (2012).

Cabe ressaltar que o carvão mineral brasileiro possui baixo *rank*, ou seja, de menor idade geológica, fator que desfavorece a carbonização do material, mantendo em sua composição elevados níveis de materiais inorgânicos. (INÁCIO *et. al.*, 2010; BRANCO, 2014)

A figura 26 mostra os cadinhos com as cinzas dos materiais imediatamente após a análise imediata.

Os cadinhos com o amido de milho apresentaram pequenos pigmentos de coloração amarelada, caracterizando as cinzas do material. As cinzas do carvão

mineral apresentaram coloração entre marrom claro e bege e com consistência do tipo areia. As cinzas do carvão vegetal apresentaram coloração negra e permaneceu visualmente como um compartilhado de pequenas partículas em formato de flocos.

FIGURA 26 – Cadinhos com cinzas



Fonte: Autoria própria

Nota: Cadinhos da esquerda com cinzas de amido de milho, ao centro, cadinhos com cinzas de carvão mineral e os cadinhos à direita com cinzas de carvão vegetal.

Em relação ao teor de matérias voláteis, o amido de milho foi o material que apresentou maior valor, com 94,95% seguido pelo carvão vegetal com 31,65 e o carvão mineral com 14,43%. Considerando-se que as matérias voláteis são compostas por vapores e gases, e apenas uma pequena parcela destes gases possui alto poder calorífico (SANCHÉZ, 2010), pode-se considerar que o teor de voláteis não é determinante na característica do material.

Os resultados mostrados por Inácio (2010) para o carvão mineral foi de 19,18%, mostrando-se equivalente ao encontrado neste trabalho, da mesma forma que o valor médio de 27% foi mostrado por Sater (2011) para diferentes carvões vegetais.

Segundo Sater (2011) e Jong (2007), o carbono fixo é o elemento crucial na composição de um material combustível, pois representa a maior fonte de geração de calor na combustão do material, portanto, com a diminuição do carvão mineral na composição da blenda, melhores serão os resultados em relação à diminuição dos teores de cinza e o aumento dos teores de materiais combustíveis (voláteis e carbono fixo).

Do mesmo modo, com a diminuição da proporção de amido de milho, espera-se o aumento do poder calorífico nas blendas devido ao alto teor de materiais voláteis e principalmente ao baixo teor de carbono fixo.

Conclui-se que o amido de milho e o carvão mineral não corroboram com o aumento do poder calorífico nas blendas, porém, o amido de milho quando usado em pequenas proporções não diminui consideravelmente essa característica.

Ambos os materiais devem ser considerados, pois favorecem algumas características na formação do briquete, como por exemplo, o amido de milho possui propriedades aglutinantes, essencial para a formação do briquetes enquanto que o carvão mineral, por ser um material de baixo custo corrobora com a diminuição do custo do briquete.

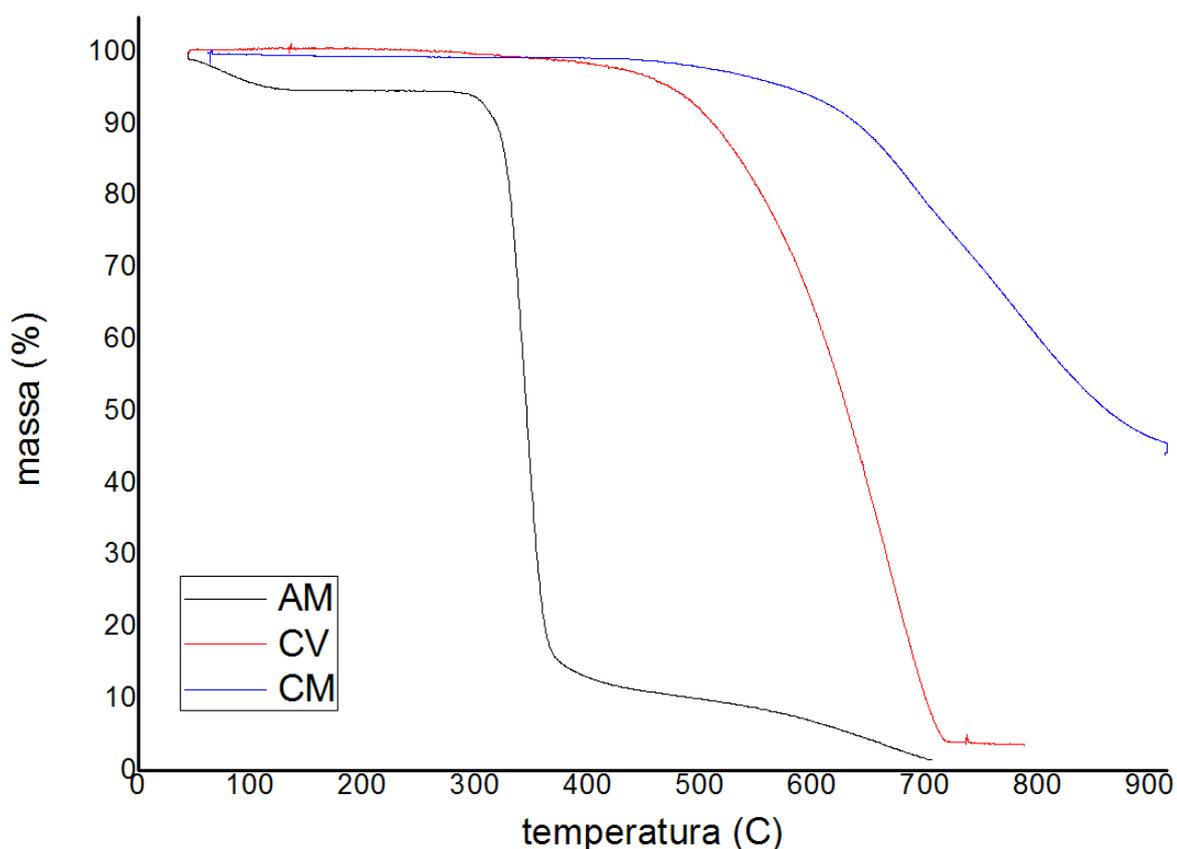
5.1.3 Termogravimetria

A análise termogravimétrica possibilitou a comprovação dos resultados encontrados para os teores de matérias voláteis, cinzas e carbono fixo, além de permitir a verificação da degradação do material em função da temperatura (fig. 27).

Os resultados dos carvões e do amido foram comparados aos valores da tabela 2 e os resultados referentes aos carvões foram comparados aos valores

obtidos por Kubacki et al. (2012) e Quirino e Brito (1991), e mostraram-se ser semelhantes para o teor de umidade e carbono fixo.

FIGURA 27 – Curva de TGA do amido de milho, carvão vegetal e carvão mineral em atmosfera de ar sintético, vazão de 20 mL.min⁻¹ e taxa de aquecimento de 20°C.min⁻¹.



Fonte: Autoria própria

Verificou-se que o amido de milho (AM) apresentou estabilidade térmica inferior aos carvões, pois, sua degradação iniciou aos 320°C onde se obteve uma acentuada perda de massa até os 360°C. Após os 360°C a razão entre temperatura e perda de massa foi menor. Da Róz (2004) e Vasquez (2007), por meio da curva de termogravimétrica com taxa de aquecimento entre 10 e 20°C.min⁻¹ sob fluxo de gás com 10 e 20 mL.min⁻¹, utilizando nitrogênio no fluxo de gás encontraram valores e

comportamento térmico semelhantes, permanecendo a degradação máxima à temperatura de 350°C.

A queima à baixas temperaturas promovem a liberação dos materiais voláteis podem favorecer o início do processo de combustão, necessitando de uma menor quantidade de energia para ativação do processo de oxidação. Porém, estudos detalhados dos gases liberados e o poder calorífico resultante fazem-se necessários para a confirmação.

A queima do carvão vegetal foi iniciada aos 400°C, com a liberação dos voláteis, até os 600°C, onde houve a acentuação do decaimento da massa, marcando o término da liberação dos voláteis e início da queima do carbono. O processo foi cessado aos 715°C com a queima total do material orgânico, permanecendo apenas os materiais inorgânicos (carbonatos).

O carvão mineral iniciou sua degradação aos 510°C, permanecendo com uma baixa taxa de perda de massa até os 680°C, onde o comportamento da curva passou a ter comportamento linear até os 850°C, e totalizando a queima aos 912°C.

Krzesińska, *et. al.* (2010) por meio da derivada da análise termogravimétrica (DTG) encontrou valores de alta taxa de degradação para o carvão mineral em 500°C utilizando uma menor taxa de aquecimento (5°C.min⁻¹). De Jong (2007) encontrou a maior taxa de degradação aos 550°C, e a curva de TGA com comportamento semelhante à curva encontrada para o carvão mineral na figura 27.

Dentre os três materiais, o carvão mineral foi o que apresentou a maior estabilidade térmica e o amido a menor. O carvão vegetal foi o que possui um comportamento intermediário.

De Jong (2007, *apud* Van Krevelen, 1993) afirma que o carvão mineral possui uma estrutura química formada principalmente por ligações aromáticas, explicando a alta estabilidade térmica do material. Portanto, seu uso é adequado para aplicações em que se deseja atingir altas temperaturas por uma maior duração de tempo. Quirino e Brito (1991) relacionam o alto teor de cinzas com a facilidade de se manter a temperatura atingida por maior tempo, visto que os materiais minerais podem auxiliar na conservação da temperatura.

O carvão vegetal apresentou ótimo resultado para uso em temperaturas intermediárias (entre 500°C e 700°C), pois além de boa estabilidade térmica necessitou uma menor temperatura para ativação da combustão e gerou menos resíduos ao fim da degradação.

As blendas com maior teor de carvão mineral alcançarão altas temperaturas, porém, causarão frequentes manutenções para a retirada das cinzas, sendo altamente indesejáveis nos processos.

Os valores encontrados para cinzas no processo de termogravimetria foram semelhantes aos encontrados pelo método tradicional, mostrados na tabela 2, validando ambos os processos.

O carvão vegetal foi o material que teve o melhor comportamento térmico, portanto considera-se que as blendas com maior teor de carvão vegetal possuirão melhores resultados se comparados aos outros materiais.

5.1.4 Densidade a Granel e Densidade Verdadeira

A verificação da densidade do material foi realizada para a posterior comparação aos resultados obtidos nos briquetes e estão apresentados na tabela 3.

TABELA 3 - Densidade dos materiais particulados

Material	Densidade a granel ($g.cm^{-3}$)	Densidade verdadeira ($g.cm^{-3}$)
Amido de milho	0,448 a	1,251 a
Carvão vegetal	0,321 b	1,330 b
Carvão mineral	0,701 c	1,628 c

Fonte: Autoria própria

Com a densidade verdadeira, foi possível analisar a relação entre a massa e o volume exato do material, ou seja, desconsiderando os espaços vazios (poros) dos materiais a um nível de precisão garantido pela penetração do fluido utilizado (H₂O).

Estatisticamente todos os resultados apresentaram hipótese nula de igualdade entre as médias.

Verificou-se que os valores da densidade verdadeira pouco se diferiram entre os materiais, entretanto, a densidade a granel mostrou diferenças significativas, principalmente do carvão mineral para com os demais materiais.

O carvão vegetal apresentou a menor densidade a granel com 0,321 g.cm⁻³, seguido do amido de milho com 0,448 g.cm⁻³ e do carvão vegetal com 0,701 g.cm⁻³. Porém, o amido de milho foi o material que apresentou a menor densidade verdadeira com 1,251 g.cm⁻³, seguida do carvão vegetal com 1,330 g.cm⁻³ e do carvão mineral com 1,628 g.cm⁻³.

Quirino e Brito (1991) encontraram o valor médio da densidade verdadeira e a granel para dez diferentes tipos de carvões estudados, sendo respectivamente 1,65 g.cm⁻³ e 0,424 g.cm⁻³. Lopez *et. al.* encontrou valores referentes à densidade a granel entre 0,258 g.cm⁻³ e 0,392 g.cm⁻³ para três diferentes amostras de carvão vegetal.

Apesar da grande variação nos resultados apresentados pelos autores, foi possível verificar a relação dos resultados encontrados para a densidade a granel e a grande diferença entre a densidade verdadeira. Essa diferença de resultados pode ser justificada devido à heterogeneidade do carvão vegetal, pois são produzidos de diferentes tipos de madeiras.

Oliveira Jr. *et. al.* reportaram o valor de 1,48 g.cm⁻³ para a densidade verdadeira do amido de milho, porém, informou que este material geralmente apresenta uma variação de densidade verdadeira entre 1,2 g.cm⁻³ e 1,6 g.cm⁻³.

Esses resultados mostram a equivalência de resultados encontrados para o amido neste trabalho, conforme apresentados na tabela 3.

Valores para a densidade a granel do amido de milho e carvão mineral, utilizando a mesma metodologia, não foram encontrado para se comparar os resultados.

5.1.5 Poder Calorífico e Densidade Energética

Os resultados do poder calorífico superior (PCS) referente à base seca (0% de umidade) e a densidade energética dos materiais estão apresentados na tabela 4.

TABELA 4 – Poder calorífico superior e densidade energética.

Materiais	Poder Calorífico Superior (<i>kcal.Kg⁻¹</i>)	Densidade energética (<i>kcal.m⁻³</i>)
Amido de milho	3.656,0 a	1,633,9 a
Carvão vegetal	7.452,71 b	2.390,3 b
Carvão mineral	3.804,58 a	2.658,5 b

Fonte: Autoria própria

Foi verificada a variância entre as médias e foi detectada a hipótese de igualdade entre elas. Pelo método de comparações aos pares, verificou-se possibilidade de igualdade com erro de 5% entre o amido de milho e o carvão mineral para os resultados de poder calorífico superior, e entre os carvões vegetal e mineral para a densidade energética.

Verificou-se que o poder calorífico do carvão vegetal foi extremamente superior ao poder calorífico superior aos demais materiais (amido de milho e carvão mineral), no entanto, quando relacionado à densidade energética, percebeu-se que o carvão mineral obteve vantagens, por ser um material com maior densidade que o carvão vegetal.

Machado (2009) e Pincelli (2011) encontraram valores para o poder calorífico variando entre 4.500 e 7.500 kcal.kg⁻¹, variando em função da temperatura de pirólise. Considerando a impossibilidade de averiguação dos parâmetros de obtenção do carvão, pode-se considerar que os valores encontrados equivalem aos estudos citados.

O amido de milho, por não ser comumente destinado a geração de energia térmica, impossibilitou a comparação do poder calorífico, por falta de identificação da metodologia de obtenção dos valores calóricos apresentados por outros trabalhos.

De acordo com o resultado da densidade energética, concluiu-se que, para fornecer uma mesma quantidade de energia necessita-se de diferentes volumes de materiais, mesmo que os materiais possuam poder caloríficos semelhantes, confirmado por Clarke e Preto (2011). Verificou-se também a enorme relevância deste parâmetro, principalmente nos combustíveis densificados, como os briquetes.

Com isto, o carvão vegetal e o carvão mineral podem ser considerados equivalentes por possuírem praticamente a mesma quantidade de energia armazenada, considerando um mesmo volume de material. Porém, o carvão vegetal mostra-se vantajoso quando for atribuída a massa deste volume, que é aproximadamente 50% menor comparando-se ao carvão mineral.

5.2 MATERIAIS COMPACTADOS (PÓS-BRIQUETAGEM)

5.2.1 Formação dos Briquetes

A tabela 5 mostra os grupos e tratamentos realizados para as blendas, com suas respectivas proporções de materiais utilizados para a produção de briquete, em valores percentuais.

Os tratamentos foram divididos em cinco grupos (A, B, C, D e E) de acordo com a composição das blendas, pois estatisticamente, não houve diferenças

significativas para as médias dos tratamentos dentro de cada grupo, com exceção aos ensaios mecânicos que serão analisados, posteriormente, separadamente.

A primeira perspectiva de resultado pós-briquetagem foi a formação do briquete de blenda de carvão vegetal e carvão mineral pelo processo de compactação, sem a necessidade de utilização de aquecimento externo na prensa e/ou no molde e, principalmente, com limitação do percentual de amido de milho em 10% do total em massa do briquete.

TABELA 5 – Tratamentos³ de acordo com a composição das blendas

Grupo	Tratamento	Composição das blendas (%)		
		Amido de milho	Carvão vegetal	Carvão mineral
A	1	2,5	0	100
A	2	5,0	0	100
A	3	7,5	0	100
A	4	10,0	0	100
B	5	2,5	25	75
B	6	5,0	25	75
B	7	7,5	25	75
B	8	10,0	25	75
C	9	2,5	50	50
C	10	5,0	50	50
C	11	7,5	50	50
C	12	10,0	50	50
D	13	2,5	75	25
D	14	5,0	75	25
D	15	7,5	75	25
D	16	10,0	75	25
E	17	2,5	100	0
E	18	5,0	100	0
E	19	7,5	100	0
E	20	10,0	100	0

Fonte: Autoria própria

³ Os cinco tratamentos sem adição de aglutinantes não foram considerados, pois não atingiram características mecânicas suficientes para as análises e a produção dos briquetes.

O resultado atingido em relação à formação dos briquetes foi analisado primeiramente de forma visual e qualitativa, observando-se apenas a formação íntegra do briquete.

Verificou-se que a blenda de carvão, independente da proporção utilizada, não resultou na formação do briquete ou não obteve resultados satisfatórios, quando compactados sem a adição do aglutinante, pois, após o período de secagem o briquete se “desintegrava”, voltando ao estado natural das partículas.

Por conseguinte, os briquetes compactados com adição de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0% de aglutinante obtiveram formação satisfatória. Foram realizados vários testes para comprovação e caracterização dos resultados que serão apresentados posteriormente.

A imagem da figura 28 mostra a superfície de fratura de um briquete realizado ocasionalmente para visualizar o aglomerado entre as partículas.

FIGURA 28 – Imagem de briquete⁴ fraturado



Fonte: Autoria própria

⁴ Briquete fraturado manualmente, composto por 10% de amido de milho e 50% de carvão vegetal e 50% de carvão mineral.

Não foi possível identificar visualmente a homogeneidade da blenda entre a mistura dos carvões, devido às semelhanças na coloração e características físicas superficiais.

Devido à alta temperatura proporcionada pela adição de H₂O durante a preparação das blends, os grânulos de amido absorvem o H₂O, incham, e conseqüentemente, rompem-se, impossibilitando a verificação desses grânulos. Porém, fraturando-se os corpos-de-prova, foi possível verificar pequenos pontos de amido distribuídos na matriz de carvão, portanto, foi considerado que não houve plena mudança na estrutura do amido por falta de H₂O, ou pelo pouco tempo de exposição à alta temperatura.

A superfície de fratura com a superfície irregular do material permitiu pressupor que o briquete apresentasse comportamento relativamente frágil, porém, outros ensaios mecânicos foram necessários para a caracterização com maior especificidade.

5.2.2 Teor de Umidade e Análise Imediata

Os valores dos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo serão apresentados na tabela 6.

Os valores referentes aos teores de umidade dos materiais foram analisados imediatamente após os ensaios de resistência mecânica de tração por compressão diametral. Com isso, foi possível confrontar os valores referentes à resistência mecânica e integridade física do briquete com alguns parâmetros, como o teor de umidade e densidade, conforme sugerido por Clarke *et. al.* (2011).

Observou-se que o briquete com o tratamento 1 foi o que apresentou o menor teor de umidade, podendo considerar uma tendência de crescimento até o tratamento 20. Isto pode ser explicado pela menor absorção de umidade pelo carvão mineral nos primeiros tratamentos, enquanto que, com o aumento da quantidade de carvão vegetal na blenda, tende-se a absorver mais umidade do ambiente, conseqüentemente aumentar o teor de umidade do briquete.

Os teores de carbono fixo e voláteis tiveram comportamento semelhante ao teor de umidade. Com o aumento do carvão vegetal na composição, o teor de carbono e o de matérias voláteis cresce, por conseguinte, o teor de cinza diminuiu na mesma proporção.

TABELA 6 – Teor de umidade e análise química imediata dos briquetes

Teor de umidade e análise química imediata					
Grupo	Tratamento	Umidade (%)	Cinzas (%)	Matérias voláteis (%)	Carbono fixo (%)
A	1	3,44	42,35	16,39	41,25
A	2	4,35	41,34	18,26	40,39
A	3	3,95	40,38	20,05	39,57
A	4	4,22	39,46	21,75	38,79
B	5	4,81	32,36	20,59	47,05
B	6	5,29	31,59	22,36	46,05
B	7	5,82	30,85	24,05	45,10
B	8	4,65	30,15	25,66	44,19
C	9	5,99	22,36	24,79	52,85
C	10	5,23	21,83	26,46	51,71
C	11	6,46	21,32	28,06	50,62
C	12	5,04	20,84	29,58	49,59
D	13	7,06	12,37	28,99	58,64
D	14	11,69	12,07	30,56	57,36
D	15	10,60	11,79	32,06	56,15
D	16	13,33	11,52	33,49	54,99
E	17	12,36	2,37	33,19	64,44
E	18	14,07	2,31	34,66	63,02
E	19	11,33	2,26	36,07	61,67
E	20	14,51	2,21	37,40	60,39

Fonte: Autoria própria

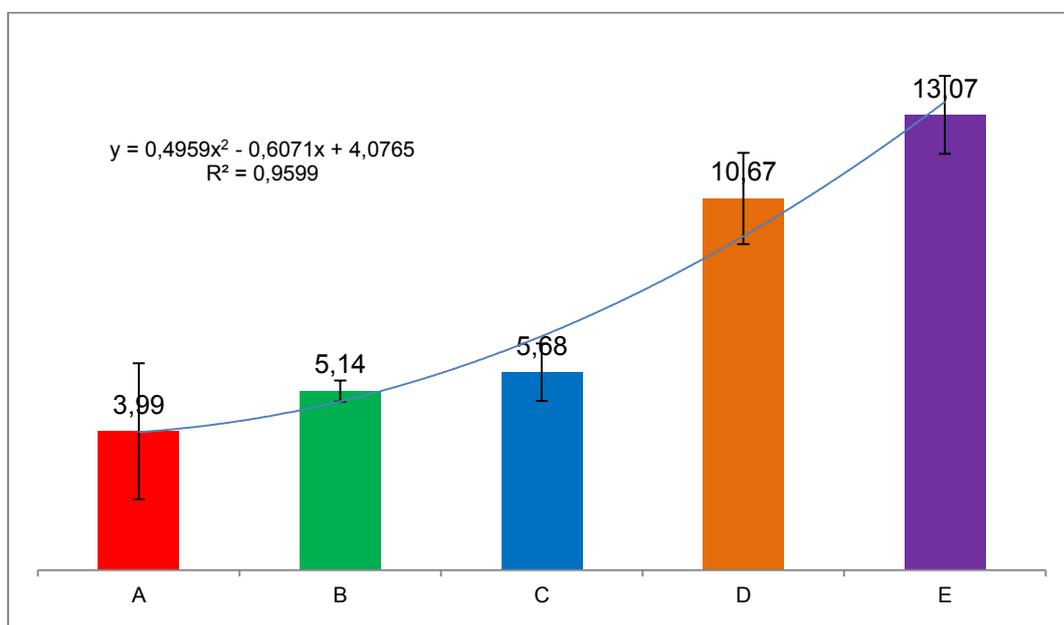
O percentual de amido de milho na composição do briquete, estatisticamente não apresentou influência significativa nos resultados de umidade, análise imediata,

densidades e poder calorífico, ou seja, o que diferiu entre os tratamentos foram basicamente os teores de carvão vegetal e carvão mineral.

O agrupamento dos tratamentos possibilitou verificar a tendência dos resultados.

O resultado para a tendência do teor de umidade em relação à composição dos carvões é mostrado na figura 29.

FIGURA 29 – Teor de umidade dos briquetes, em %



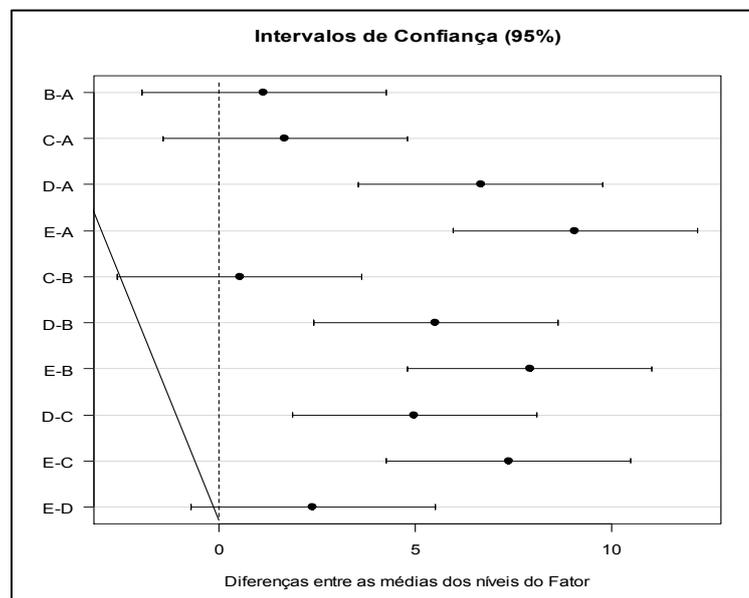
Fonte: Autoria própria

O valor positivo de x^2 na função representa a tendência da parábola positiva, ou seja, crescente, enquanto que os valores negativos mudam a parábola de direção para negativa. O valor de R^2 mostra a linearidade e correlação entre os pontos na linha de tendência, sendo assim, são desejáveis valores próximos ao número 1.

Com o auxílio da figura 29, foi possível verificar a tendência de crescimento da umidade com o aumento de carvão vegetal nas blendas. Estatisticamente, verificou-se que não houve diferenças significativas entre as médias nos grupos A-B-C e E-D, conforme mostrado na figura 30, na comparação entre os pares. Todos os

demais pares apresentaram desigualdade, por não estarem localizados entre a linha central (0).

FIGURA 30 – Teste de comparação Tuckey para o teor de umidade



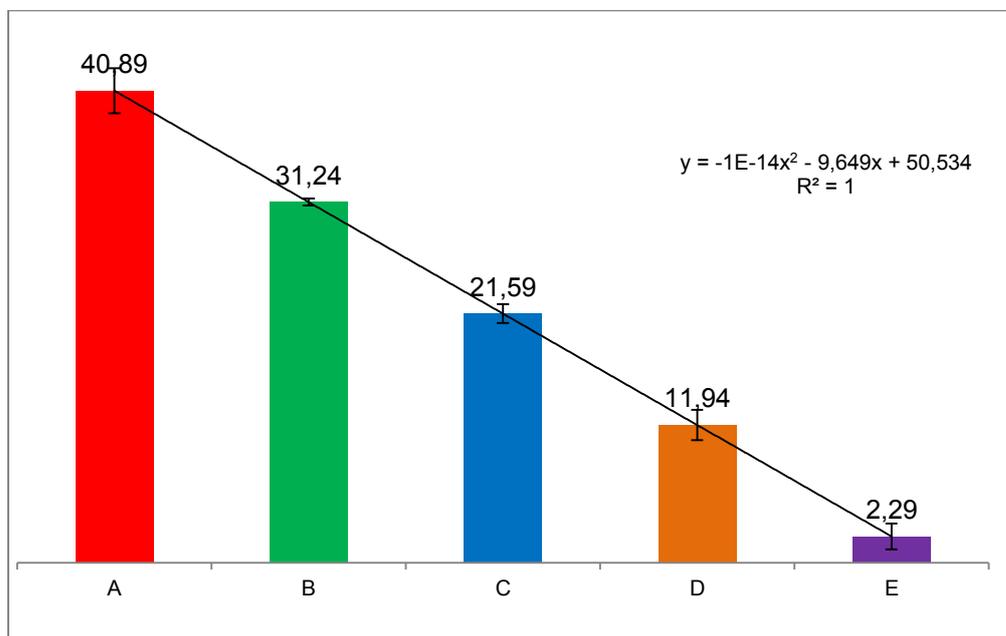
Fonte: Autoria própria

Com isto, é necessário avaliar os teores máximos ideais de adição de carvão vegetal, nas blendas, para não comprometer os resultados considerados ideais para a produção de briquetes.

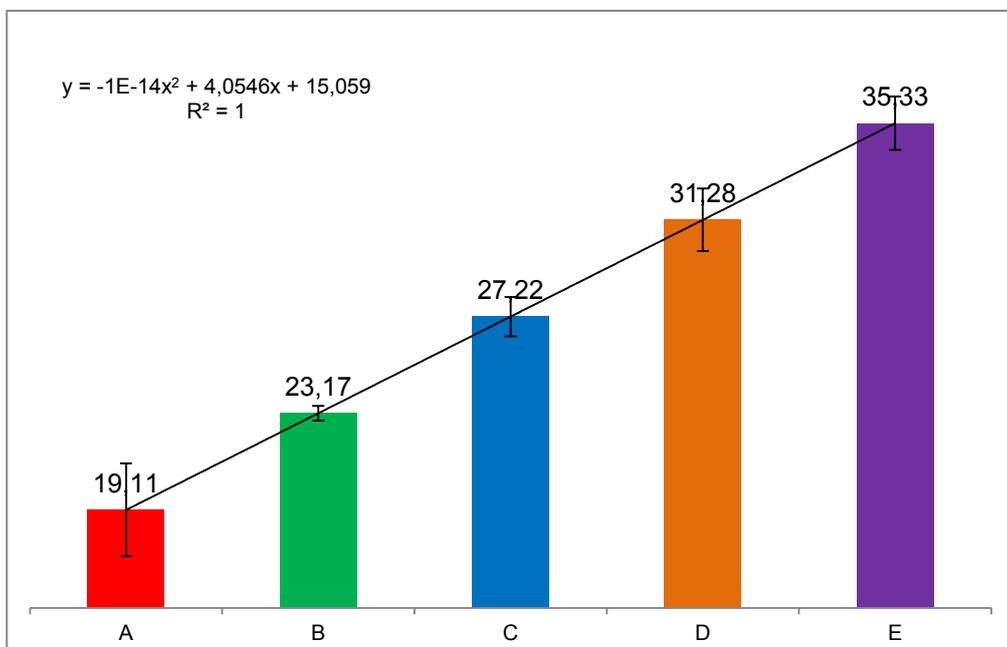
A tendência dos teores de cinzas, matérias voláteis e carbono fixo estão apresentados nas figuras 31, 32 e 33 respectivamente.

O valor de R^2 igual a 1, e o pequeno valor da função y em x^2 , mostram a linearidade do decréscimo do teor de cinzas e acréscimo dos teores de matérias voláteis e carbono fixo em função do aumento do teor de carvão vegetal nos briquetes.

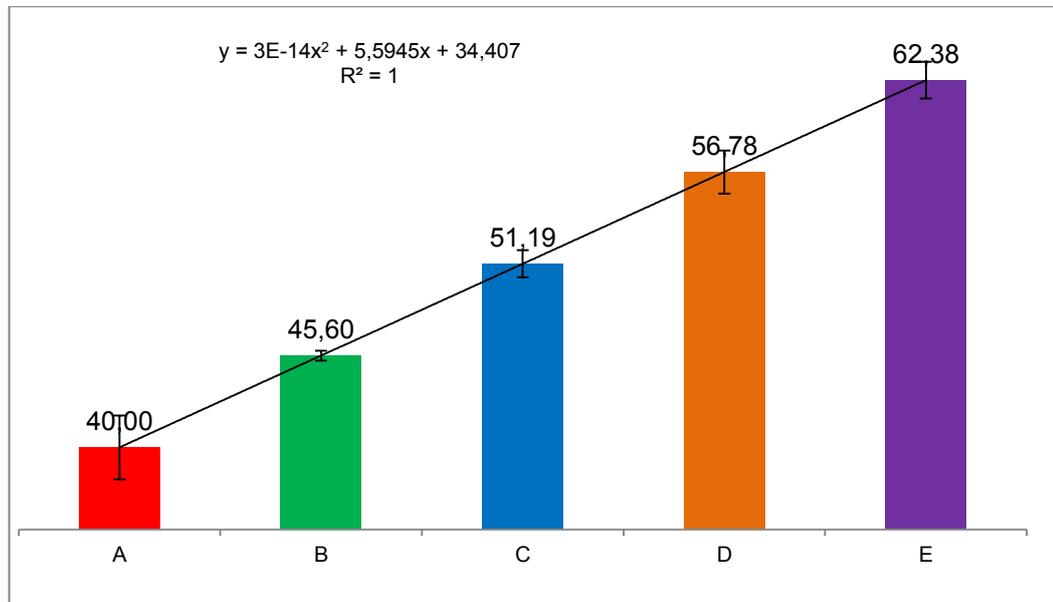
Nos resultados do teor de cinzas e carbono fixo, foi constatada a hipótese nula de igualdade entre as médias dos resultados para os grupos em análise, pois a linha central (0) não compreendeu nenhum dos intervalos de confiança entre os pares.

FIGURA 31 – Teor de cinzas dos briquetes, em %.

Fonte: Autoria própria

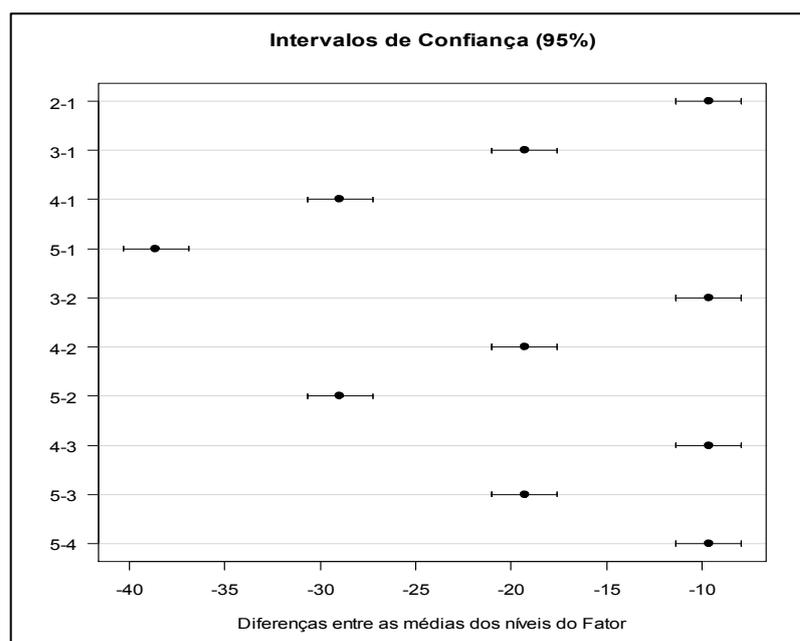
FIGURA 32 – Teor de matérias voláteis dos briquetes, em %.

Fonte: Autoria própria

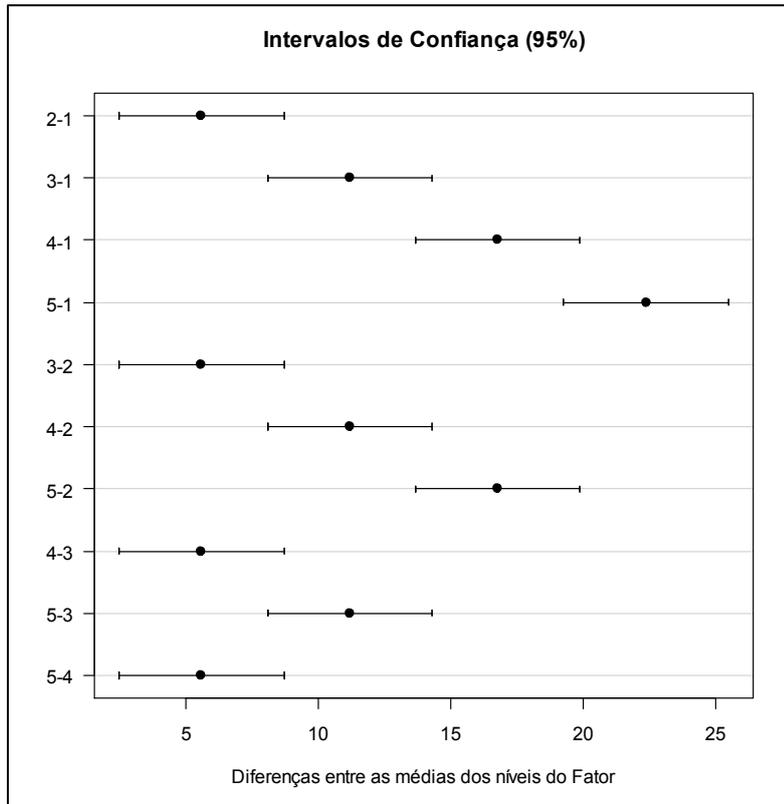
FIGURA 33 – Teor de carbono fixo, em %.

Fonte: Autoria própria

Os resultados são mostrados nas figuras 34 e 35, onde p-valor são menores que o nível de significância de 0,05, portanto, todos os grupos diferem estatisticamente entre si.

FIGURA 34 – Teste de comparação, para o teor de cinzas

Fonte: Autoria própria

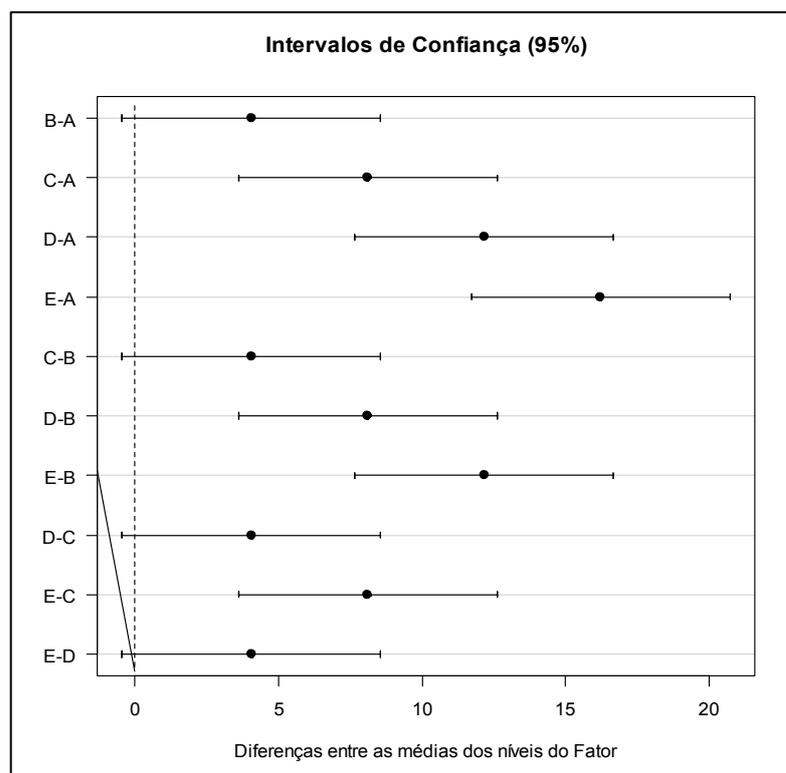
FIGURA 35 – Teste de comparação, para o teor matérias voláteis.

Fonte: Autoria própria

A figura 36 mostra a comparação aos pares, realizados para o teor de matérias voláteis.

Analisando-se os resultados para os teores de voláteis nas blendas, constatou-se a linearidade do crescimento com o aumento do carvão vegetal na amostra. Os resultados mostraram que não houve diferença estatística entre os grupos A-B, B-C, C-D e D-E.

As figuras 31, 32 e 33 (teor de cinzas, matérias voláteis e carbono fixo) mostraram que o aumento do teor de carvão vegetal melhorou as propriedades do briquete. Isto é justificado pelo resultado apresentado para o carvão vegetal na tabela 2, mostrando a superioridade do carvão vegetal em relação ao carvão mineral nos três quesitos analisados. Portanto, conclui-se que os melhores resultados foram observados nos grupos D e E.

FIGURA 36 – Teste de comparação, para o teor de voláteis.

Fonte: Autoria própria

5.2.3 Densidades a Granel, Verdadeira e Relativa Aparente

Os valores referentes às densidades a granel, verdadeira e aparente do briquete serão mostrados na tabela 7.

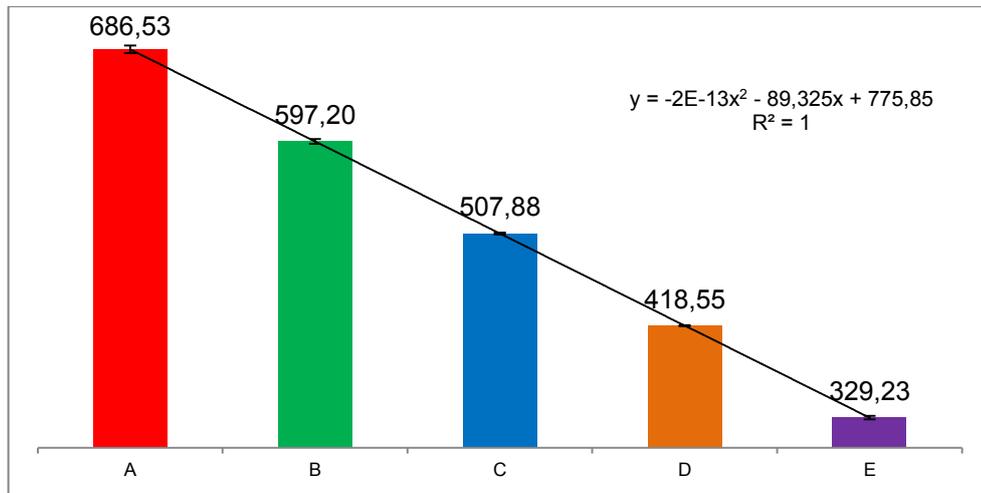
A densidade a granel das blendas foram calculadas a partir do valor da densidade a granel dos materiais particulados. Os resultados foram verificados utilizando a média ponderada dos valores da densidade dos materiais particulados, de acordo com a composição da blenda. Seguindo a mesma metodologia, obteve-se a densidade relativa verdadeira.

TABELA 7 – Densidades das blendas e dos briquetes

Tratamentos	Densidades		
	Granel (g.cm ⁻³)	Verdadeira (g.cm ⁻³)	Aparente (g.cm ⁻³)
1	695,1	1.619,3	1.526,6
2	689,2	1.610,6	1.500,6
3	683,6	1.602,2	1.444,6
4	678,3	1.594,2	1.364,0
5	602,5	1.546,5	1.267,1
6	598,9	1.539,5	1.245,9
7	595,4	1.532,8	1.236,3
8	592,0	1.526,4	1.231,2
9	510,0	1.473,7	1.112,7
10	508,5	1.468,4	1.094,8
11	507,1	1.463,4	1.055,5
12	505,8	1.458,6	1.104,4
13	417,5	1.400,9	1.004,2
14	418,2	1.397,3	991,3
15	418,9	1.394,0	990,8
16	419,6	1.390,7	1.063,1
17	324,9	1.328,1	918,6
18	327,9	1.326,3	923,5
19	330,7	1.324,5	927,4
20	333,4	1.322,9	979,4

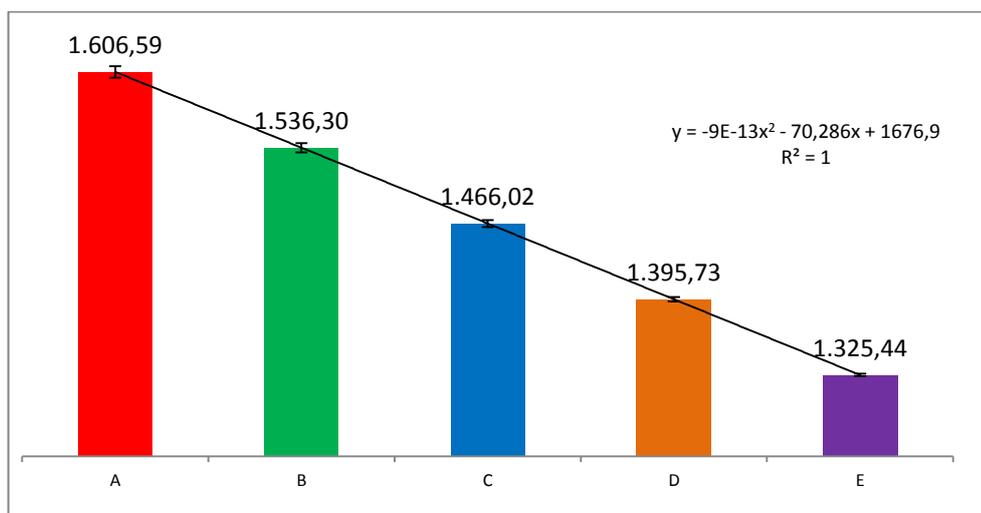
Fonte: Autoria própria

Baseando-se nas análises estatísticas, verificou-se que o teor de aglutinante novamente não interferiu nos resultados, portanto, as figuras 37, 38 e 39 mostram, respectivamente, os resultados para a densidade a granel, densidade verdadeira e a densidade aparente.

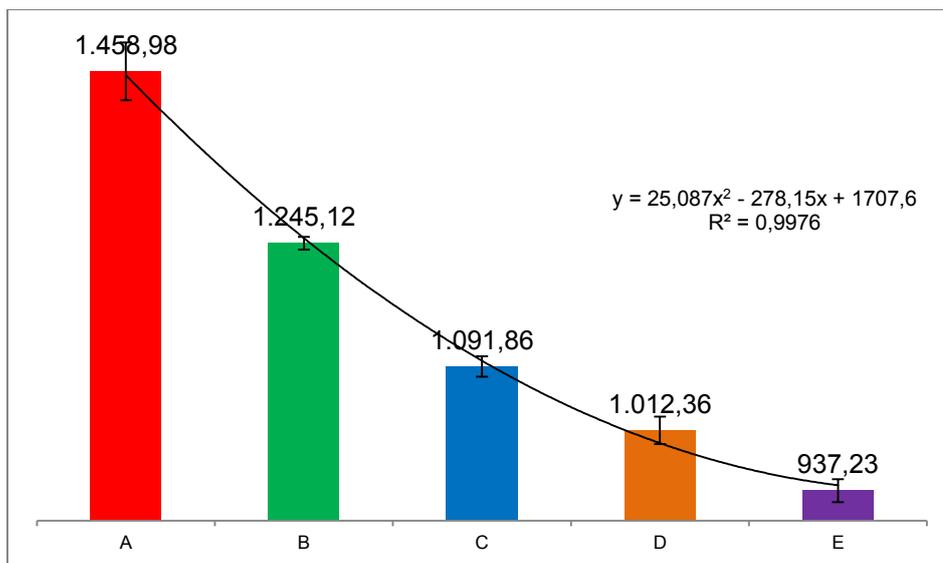
FIGURA 37 – Densidade a granel, em (g.cm⁻³).

Fonte: Autoria própria

Os valores das densidades a granel comparados aos valores das densidades aparentes mostram o percentual de compactação para os briquetes de carvão mineral e de carvão vegetal alcançando uma redução média de duas e três vezes, respectivamente.

FIGURA 38 – Densidade verdadeira, em (g.cm⁻³).

Fonte: Autoria própria

FIGURA 39 – Densidade relativa aparente, em (g.cm⁻³).

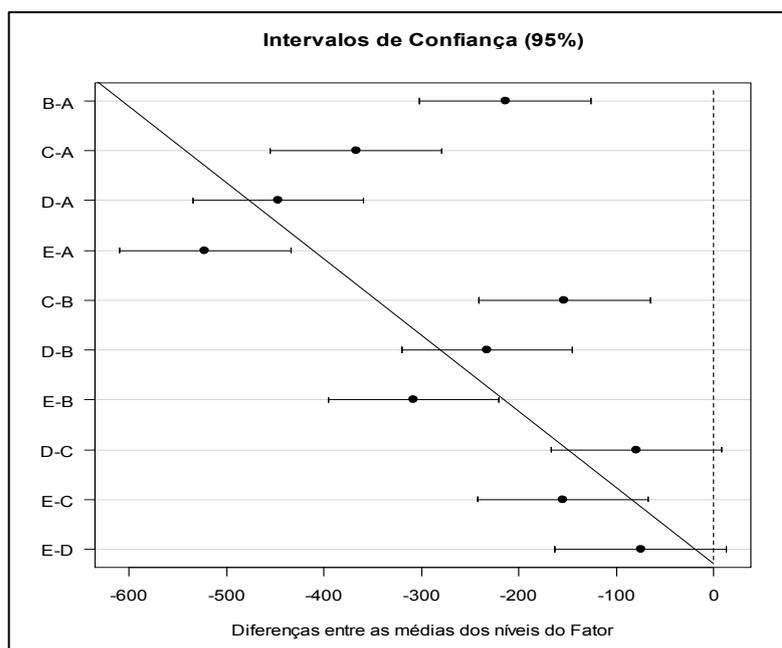
Fonte: Autoria própria

Comparando-se os valores da figura 38 com os da figura 39, possibilitou verificar o limite de compactação dos materiais, uma vez que o valor máximo da densidade relativa aparente é igual ao valor da densidade verdadeira.

Observou-se também que, os briquetes com maior percentual de carvão mineral obtiveram a maior densidade aparente, fator de extrema importância devido ao maior acúmulo energético por unidade de volume.

Os resultados da figura 39 mostram valores superiores aos resultados encontrados por Quirino (1991) onde se obteve valores para a densidade relativa aparente entre 760 g.cm⁻³ a 1.220 g.cm⁻³, encontrados para vários processos industriais de briquetagem com diferentes materiais.

Para a densidade relativa aparente, os testes mostraram que não houve diferença estatística entre os briquetes do grupo C-D; D- E (fig. 40).

FIGURA 40 – Teste de comparação, para a densidade aparente.

Fonte: Autoria própria

5.2.4 Porosidade, Redução Volumétrica e Eficiência de Compactação.

A tabela 8 mostra a porosidade, a redução volumétrica e a eficiência de compactação, parâmetros importantes na avaliação do produto e do processo.

A porosidade mostrou o percentual de espaços vazios nos briquetes, sendo assim, quanto maior a porosidade menor será a eficiência de compactação.

Com o aumento da porosidade aumenta-se a superfície de contato, no entanto, diminui-se a densidade aparente do briquete, isto faz com que o briquete possua diferentes comportamentos, principalmente na combustão.

Os briquetes com alto teor de carvão mineral obtiveram o melhor resultado mostrando porosidades inferiores a 15%. Percebeu-se que o percentual de amido de milho nos briquetes com 100% de carvão mineral, interferiu diretamente nos resultados, pois os briquetes com 2,5% de amido de milho apresentou porosidade

abaixo de 6%, enquanto que com 10% de amido de milho apresentou teor maior que 15%.

TABELA 8 – Porosidade, redução de volume e eficiência da compactação.

Tratamentos	Porosidade (%)	Redução Volumétrica (%)	Eficiência de compactação (%)
1	5,7	219,6	94,3
2	6,8	217,7	93,2
3	9,8	211,3	90,2
4	14,4	201,1	85,6
5	18,1	210,3	81,9
6	19,1	208,0	80,9
7	19,3	207,6	80,7
8	19,3	208,0	80,7
9	24,5	218,2	75,5
10	25,4	215,3	74,6
11	27,9	208,1	72,1
12	24,3	218,4	75,7
13	28,3	240,5	71,7
14	29,1	237,0	70,9
15	28,9	236,5	71,1
16	23,6	253,4	76,4
17	30,8	282,7	69,2
18	30,4	281,7	69,6
19	30,0	280,4	70,0
20	26,0	293,8	74,0

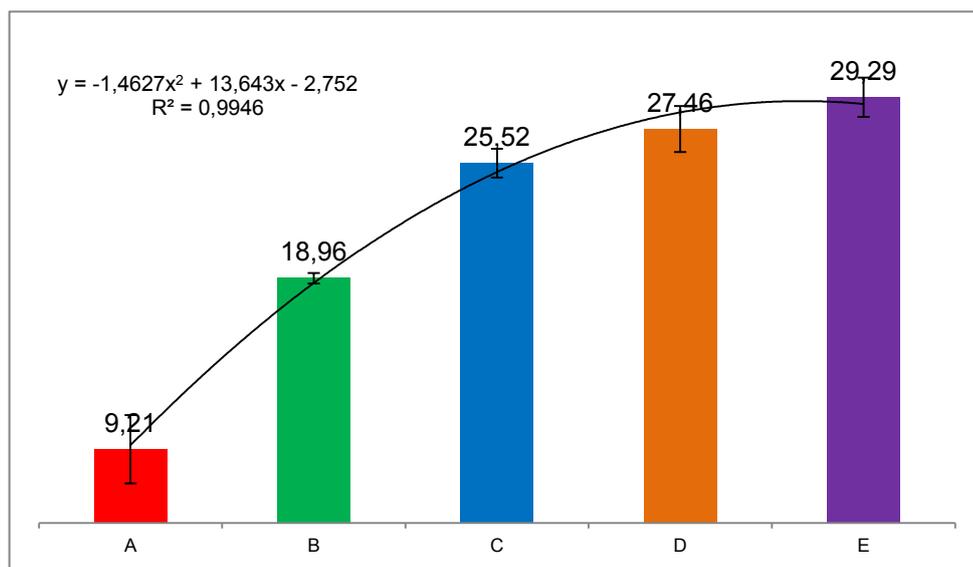
Fonte: Autoria própria

Isto ocorreu apenas nos briquetes com 100% de carvão mineral, e pode ser explicado pela variação de pressão no processo de briquetagem, pois, devido à baixa granulometria do carvão mineral e do amido de milho, ao se atingir elevadas pressões, o material fluiu por entre os espaços de folga entre a matriz e o punção, finalizando o processo com menor pressão de compactação (alguns briquetes não

atingiram o valor estabelecido de 5,0 toneladas-força, ou 50 MPa, na compactação, conforme previsto para todos os briquetes).

A figura 41 mostra a porosidade dos agrupamentos de diferentes tratamentos de briquetes e a figura 42 mostra a comparação estatística de igualdade de médias entre os pares.

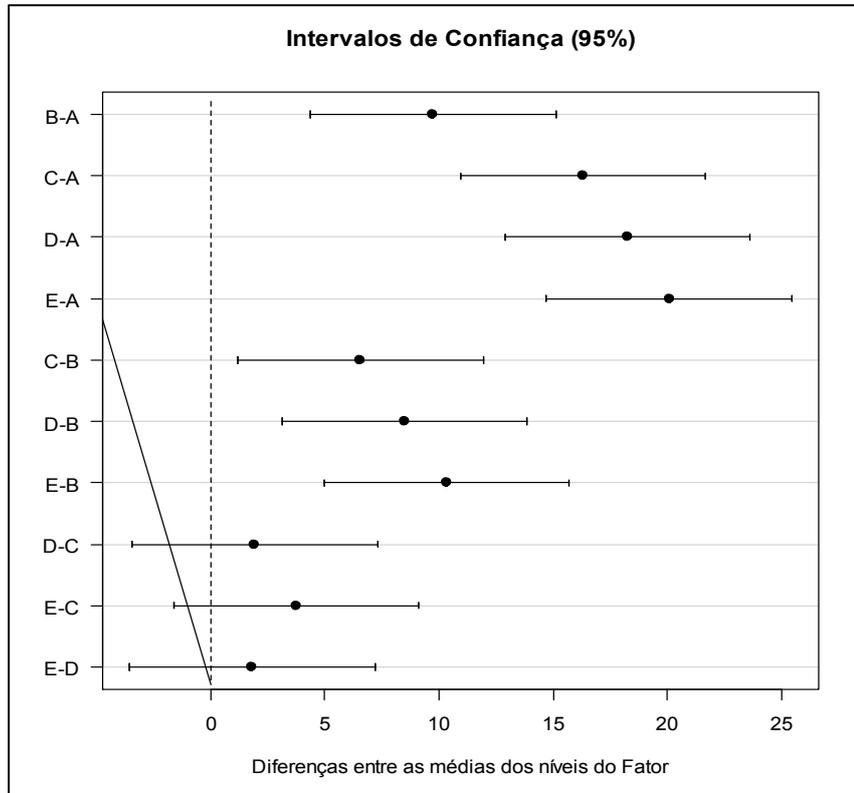
FIGURA 41 – Porosidade, em (%)



Fonte: Autoria própria

O crescimento da porosidade com o aumento da composição de carvão vegetal no briquete foi esperado devido à porosidade encontrada nas partículas do carvão vegetal.

Notou-se também que, com o incremento de 25% de carvão vegetal – grupo B - na blenda, aumentou-se a porosidade em 100% (de 9,21% para 18,96%). Mostrando a grande influência do carvão vegetal em relação à porosidade do material e justificando, inclusive, a menor densidade relativa aparente encontrada nos briquetes com maior teor de carvão vegetal.

FIGURA 42 – Comparações aos pares para a porosidade

Fonte: Autoria própria

A figura 42 mostrou que não houve diferença estatística entre as médias para os grupos C-D, C-E e D-E, por estarem compreendidos pela linha central (0).

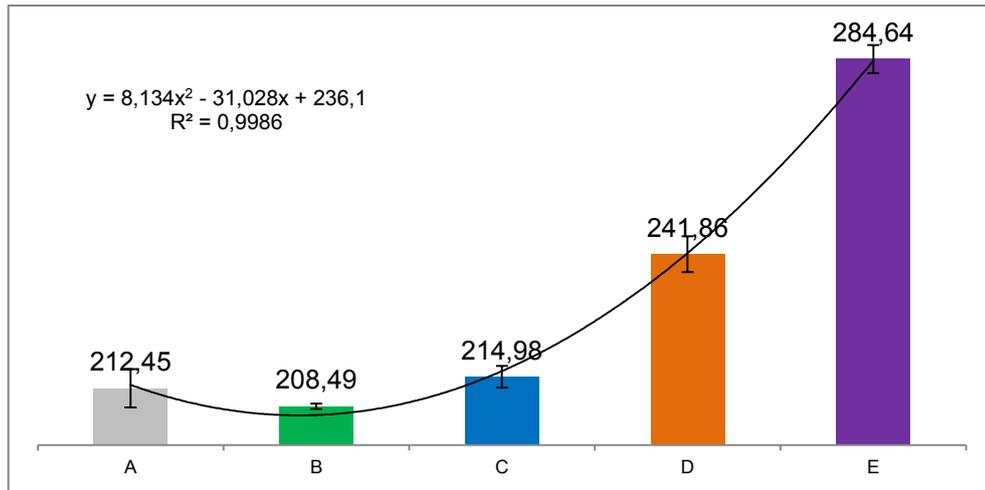
A figura 43 e 44 mostram, respectivamente, a redução volumétrica e a comparação aos pares dos briquetes considerando o agrupamento dos tratamentos.

A redução volumétrica mostrou o percentual de redução do volume inicial da blenda na formação dos briquetes, sendo assim, confirmou-se que a redução de todos os briquetes foi superior a 200% quando comparado ao volume inicial dos materiais, e em alguns tratamentos, atingiu valores próximos aos 300% de redução. Portanto, devido aos ótimos resultados encontrados para a redução volumétrica, o mesmo mostra-se excelente para a produção de briquetes.

Por possuir menor densidade a granel, os briquetes com maiores teores de carvão vegetal - tratamentos 17 ao 20 - atingiram ótimas reduções volumétricas, entre 280,4% e 293,8%. A figura 43 evidenciou a não linearidade dos resultados

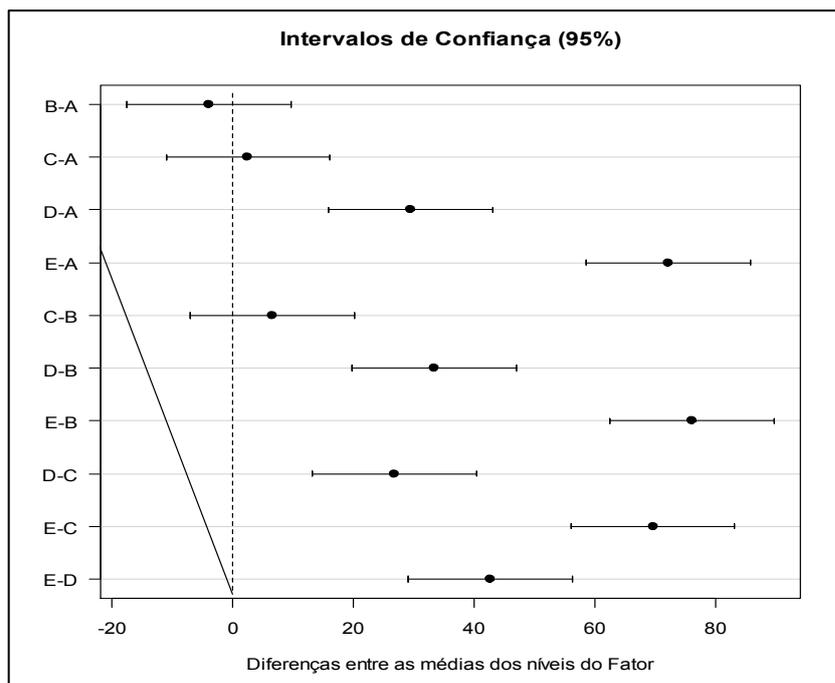
obtidos pelos grupos A-B-C, que também pode ser explicada pelo escoamento do material por entre os moldes e as diferentes pressões de compactação alcançadas devido a este evento.

FIGURA 43 – Redução volumétrica, em (%).



Fonte: Autoria própria

FIGURA 44 – Comparação aos pares para a redução volumétrica, em (%).

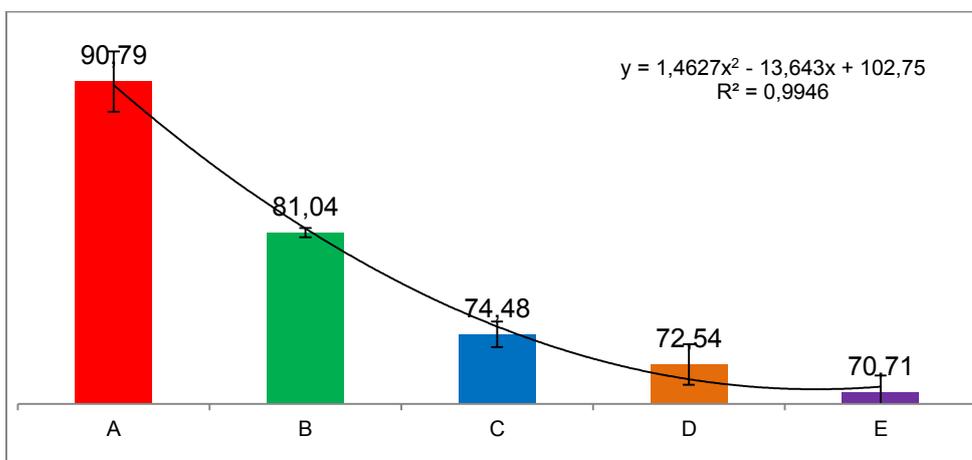


Fonte: Autoria própria

A figura 44 mostrou que não houve diferenças estatísticas entre os grupos A-B-C. Este fato ocorreu possivelmente por falhas de processo de briquetagem dos materiais, conforme descrito anteriormente.

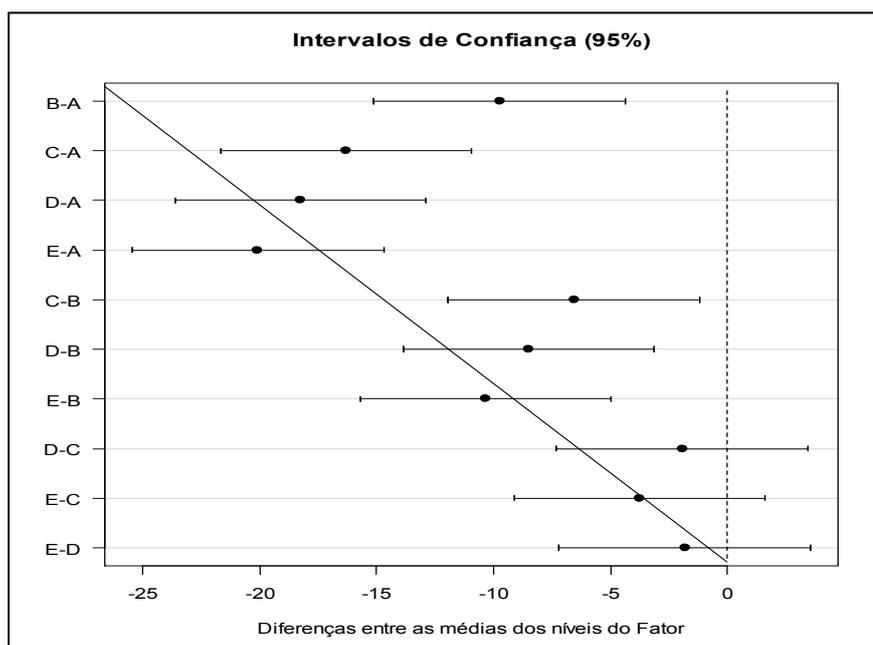
A figura 45 e 46 mostram a eficiência de compactação e a comparação aos pares para os grupos de tratamentos de briquetes.

FIGURA 45 – Eficiência de compactação, em (%)



Fonte: Autoria própria

FIGURA 46 – Comparação aos pares para a eficiência de compactação, em (%).



Fonte: Autoria própria

A eficiência de compactação permitiu conferir a eficácia do processo de briquetagem, onde à máxima eficiência foi alcançado ao se atingir o resultado de 100%.

Confrontando-se os valores das figuras 43 e 45, percebeu-se que, apesar de uma maior redução volumétrica, os briquetes do grupo D e E não obtiveram a maior eficiência de compactação. Isto se explica pelo alto índice de porosidade encontrado nesses briquetes, conforme resultados apresentados na tabela 8 e na figura 41.

Nos processos de compactação por briquetagem, um dos principais parâmetros a ser investigado é a redução volumétrica, pois, geralmente os materiais a serem compactados possuem baixa densidade, dificultando o armazenamento e transporte.

Na figura 46 foi possível verificar que não houve diferenças estatísticas entre os grupos C, D e E.

5.2.5. Poder Calorífico Superior e Densidade Energética

A tabela 9 mostra os resultados do poder calorífico superior e a densidade energética dos briquetes com diferentes tratamentos, calculados com base nos valores mostrados na tabela 5 para os valores do poder calorífico superior e da densidade energética de cada material separadamente.

Os resultados para os briquetes com maior percentual de carvão vegetal atingiram valores próximos a $7.300 \text{ kcal.kg}^{-1}$, equivalente ao resultado encontrado por Oliveira (2013) na análise de poder calorífico de briquetes contendo 85% de carvão vegetal em sua composição.

O mesmo autor afirmou que a adição de aglutinante não pode interferir negativamente no poder calorífico do material, impossibilitando-o de ser usado como combustível.

TABELA 9 - Poder calorífico superior e densidade energética.

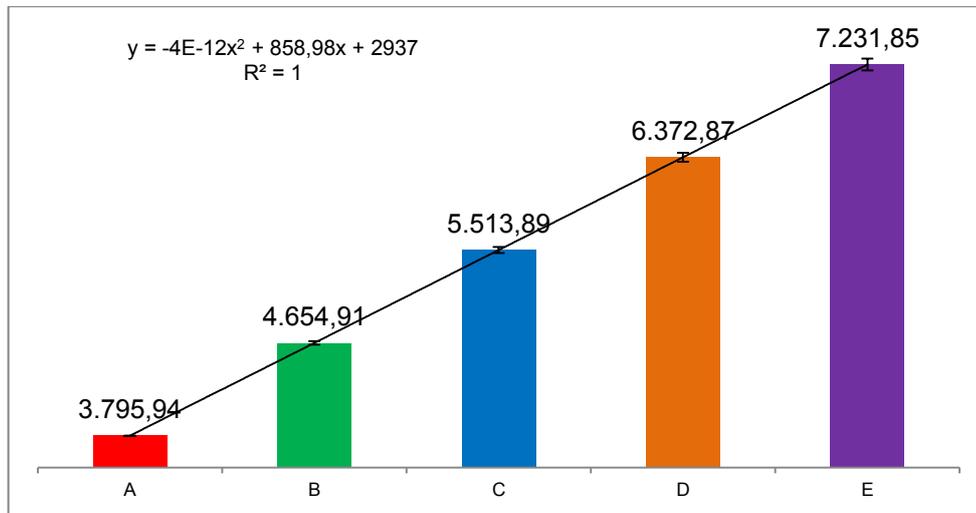
Tratamentos	Poder calorífico (kcal.kg⁻¹)	Densidade energética (kcal.m⁻³ (x10⁹))
1	3.801,0	5,80
2	3.797,5	5,70
3	3.794,2	5,48
4	3.791,1	5,17
5	4.690,7	5,94
6	4.666,1	5,81
7	4.642,6	5,74
8	4.620,2	5,69
9	5.580,5	6,21
10	5.534,7	6,06
11	5.491,0	5,80
12	5.449,3	6,02
13	6.470,3	6,50
14	6.403,3	6,35
15	6.339,4	6,28
16	6.278,4	6,67
17	7.360,1	6,76
18	7.271,9	6,72
19	7.187,8	6,67
20	7.107,6	6,96

Fonte: Autoria própria

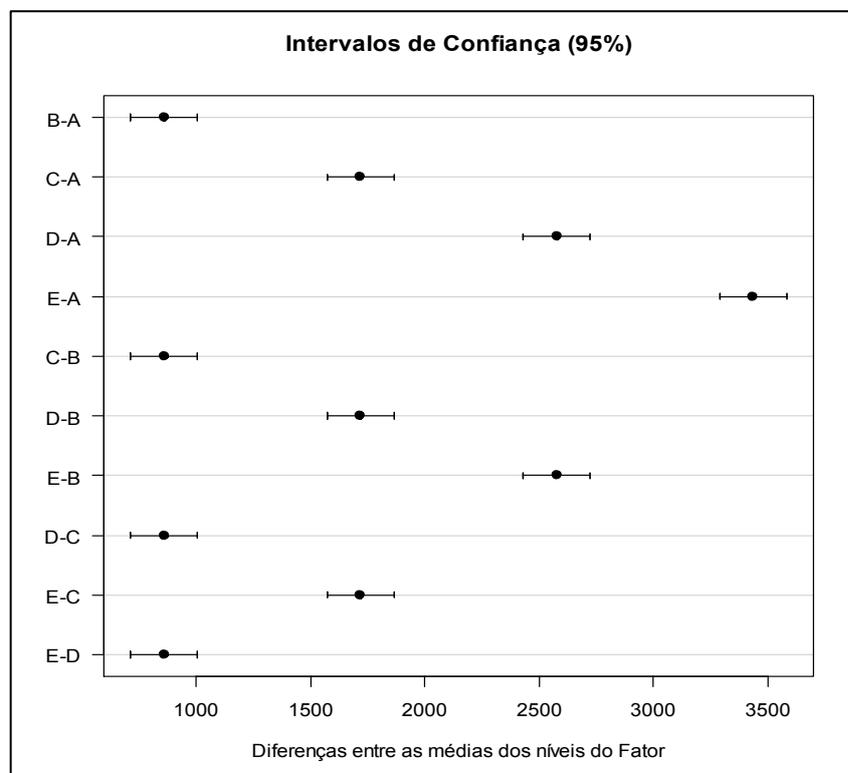
Foi verificado por meio da análise de variância que para os percentuais de amido de milho utilizado como aglutinante, não houve diferenças significativas para o poder calorífico superior para os diferentes tratamentos dos briquetes.

Para ambos os parâmetros, o tratamento 17 apresentou os melhores resultados, inclusive, atingindo valores maiores aos encontrados nos briquetes de carvão comercializados nacional e internacionalmente, publicado no estudo realizado por Quirino e Brito (1991).

Os resultados para o poder calorífico superior e a análise estatística dos grupos são mostrados nas figuras 47 e 48.

FIGURA 47 – Poder calorífico, em (kcal.kg⁻¹).

Fonte: Autoria própria

FIGURA 48 – Comparação aos pares para o poder calorífico superior

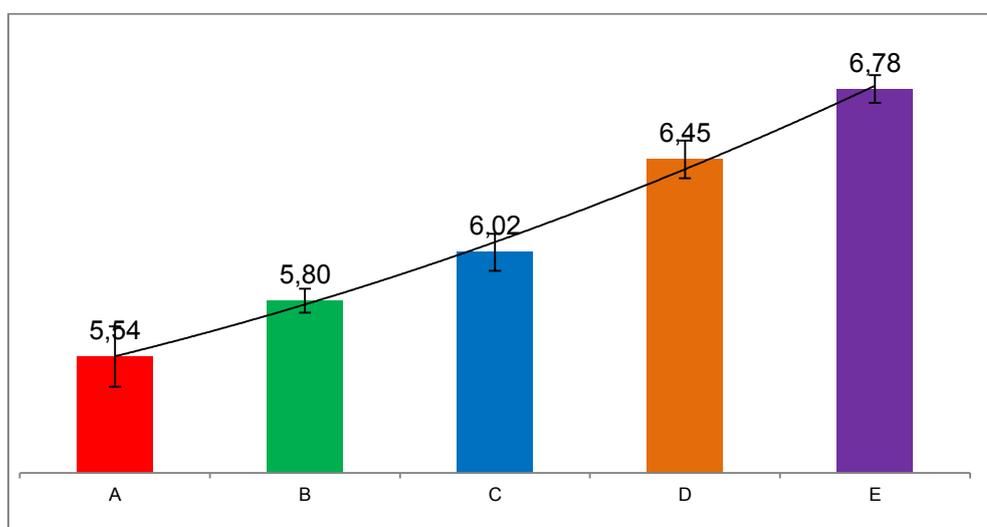
Fonte: Autoria própria

Notou-se que houve um aumento relevante no poder calorífico dos briquetes com a maior concentração de carvão vegetal (tratamentos D e E). Isto também pode ser justificado pelos ótimos valores alcançados individualmente pelo carvão vegetal em relação aos demais materiais, apresentados na tabela 4.

A figura 48 mostrou que houve diferenças estatísticas entre as todas as médias dos grupos para os resultados referentes ao poder calorífico superior, portanto, se faz necessária escolha adequada para cada grupo de briquete dependendo da aplicação.

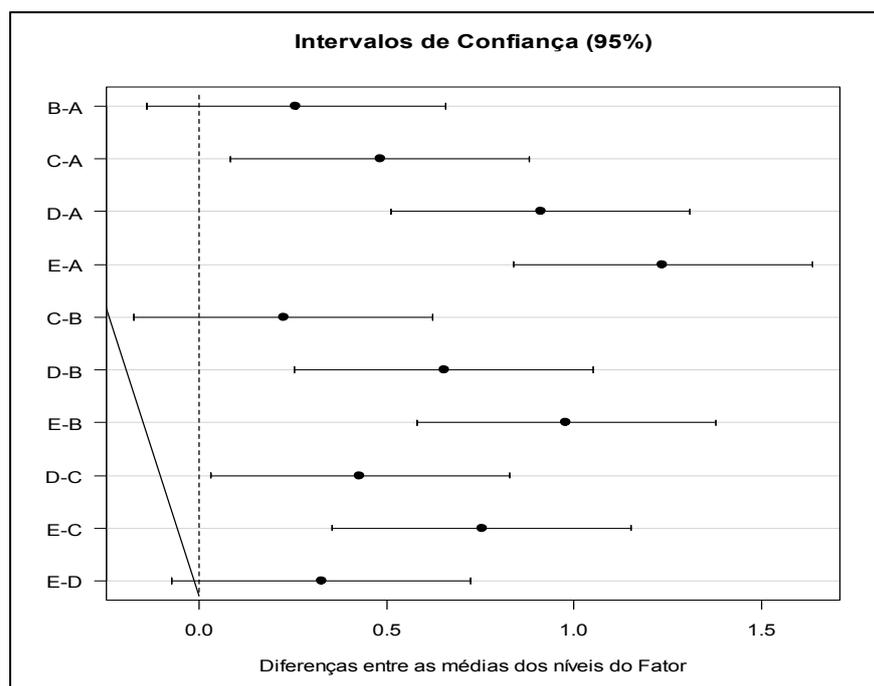
As figuras 49 e 50 mostram a densidade energética dos grupos de tratamentos e a comparação aos pares para a verificação de igualdade entre as médias.

FIGURA 49 – Densidade energética, em (Gcal.m⁻³).



Fonte: Autoria própria

Foi possível constatar a tendência de crescimento da densidade energética para os tratamentos, conforme aumentou o percentual de carvão vegetal na composição. Onde os tratamentos do grupo E foram os que possuíram a maior densidade energética, com 6,78 Gcal.m⁻³ e os tratamentos do grupo A, a menor densidade energética com 5,54 Gcal.m⁻³.

FIGURA 50 – Comparação aos pares para a densidade energética.

Fonte: Autoria própria

A figura 50 mostrou semelhanças entre as médias dos grupos A-B, B-C e D-E para o nível de significância usado (95% de confiança).

Embora o tratamento E ter apresentado o melhor resultado, é preciso analisar cuidadosamente a possibilidade de uso do tratamento D, pois, podem apresentar resultados equivalentes devido as variações de processo.

Todos os grupos mostraram ótimos valores de densidade energética alcançando resultados equivalentes a 0,5 tonelada equivalente de petróleo (tep) por metro cúbico e 6.500 kwh por metro cúbico de materiais briquetados, desconsiderando-se as perdas por transformação e conversão de energias.

Os parâmetros de poder calorífico e densidade energética são vistos como importantes indicativos para diversos autores na escolha de um material combustível, logo, briquetes com maior teor de carvão vegetal revelou-se novamente muito eficiente.

Comparando-se o resultado da densidade relativa aparente (figura 39) com o resultado da densidade energética (figura 49), foi possível verificar que o grupo A

apresentou o melhor resultado, o grupo E o pior resultado. Porém, o resultado mostrado na figura 49 mostrou um comportamento inverso, com isso, confirmou-se que, mesmo com a menor densidade relativa aparente, os briquetes com maior concentração de carvão vegetal obtiveram resultados melhores, levando-se em consideração a densidade e a capacidade energética.

5.2.6 Estabilidade dimensional

O ensaio de estabilidade dimensional mostrou que não houve alteração dimensional, devido ao baixo percentual de variação dos briquetes. Alguns briquetes tiveram um comportamento diferente de outros materiais consultados, pois, normalmente ocorre a expansão, enquanto que em alguns briquetes houve a contração, provavelmente, devido à secagem do briquete com excesso de água. Diferentemente da expansão, a contração é benéfica ao briquete, pois tende a aproximação das partículas com a diminuição do volume e, conseqüente, o aumento da densidade aparente, que reflete tanto em praticamente todas as propriedades do briquete, desde o ganho de densidade quanto a redução de volume.

5.2.7 Resistência Mecânica estática

Nos ensaios monotônicos de resistência mecânica, constatou-se a capacidade de o material suportar pressões e cargas de carregamento estáticas.

A figura 51 mostra os resultados de resistência à tração por compressão diametral realizados para os briquetes.

Os resultados não foram concentrados em grupos, devido a grande variação entre os resultados para os tratamentos individuais, impossibilitando a comparação entre a formação dos grupos, conforme resultados apresentados anteriormente.

É possível verificar que o briquete com tratamento 3, apresentou a maior resistência mecânica com 0,33 MPa de resistência, equivalente à força de 35 kg, já

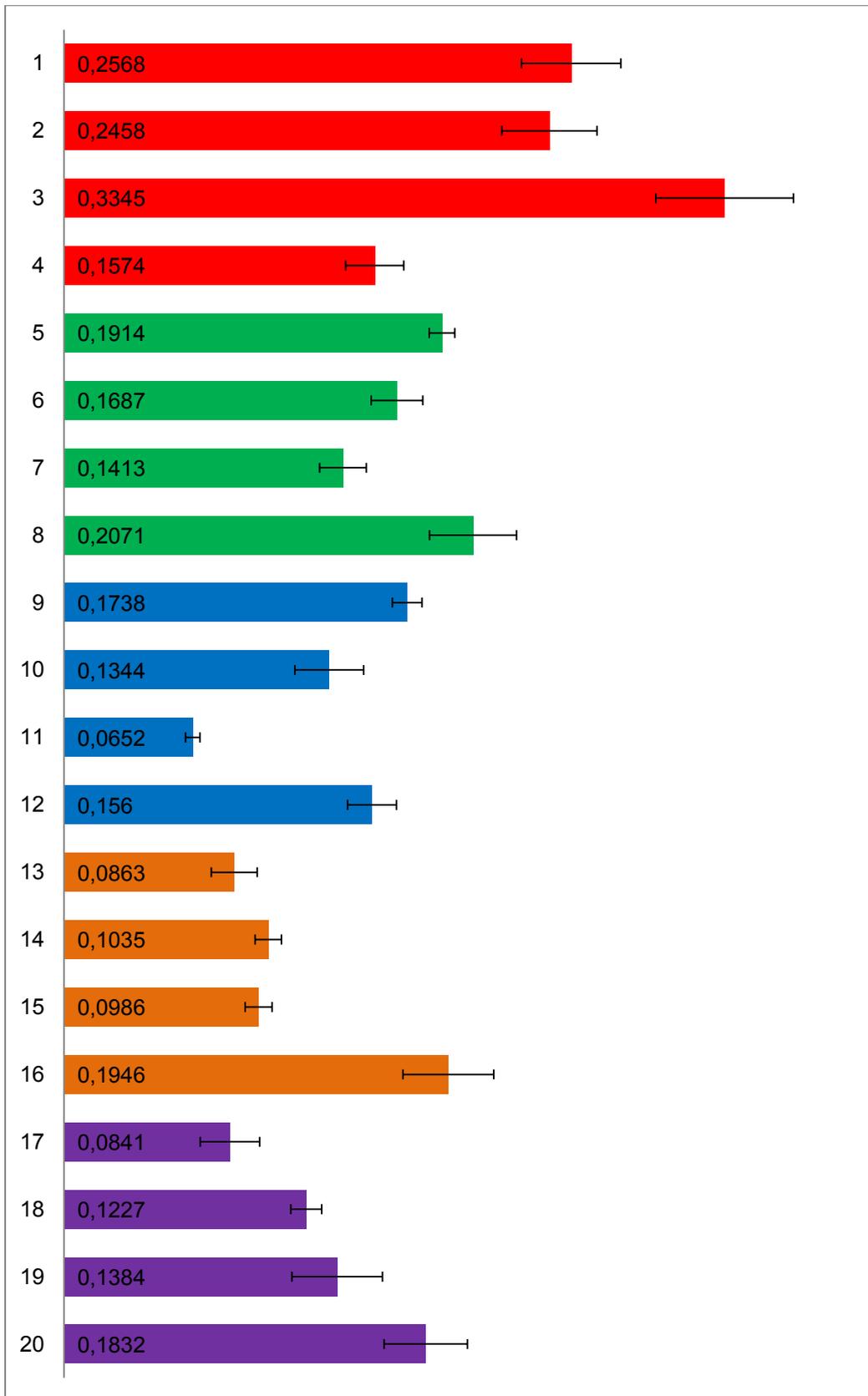
o briquete com tratamento 11 apresentou 0,06 Mpa de resistência, equivalente a força de 7,82 kg. Isto equivale a um empilhamento de 116 e 26 briquetes sobre si, respectivamente para o melhor e o pior tratamento, totalizando uma altura de 4,00m e 0,90m respectivamente.

Comparando o estudo de Oliveira (2013) que obteve valores de resistência entre 0,13 e 0,37 utilizando pressão de compactação de 120 MPa e 15% de aglutinante (parafina) nos briquetes com finos de carvão. Neste estudo, utilizando aglutinante diferente e em menor proporção, os briquetes possuíram resistência mecânica semelhante, inclusive utilizando menor pressão de compactação (50MPa).

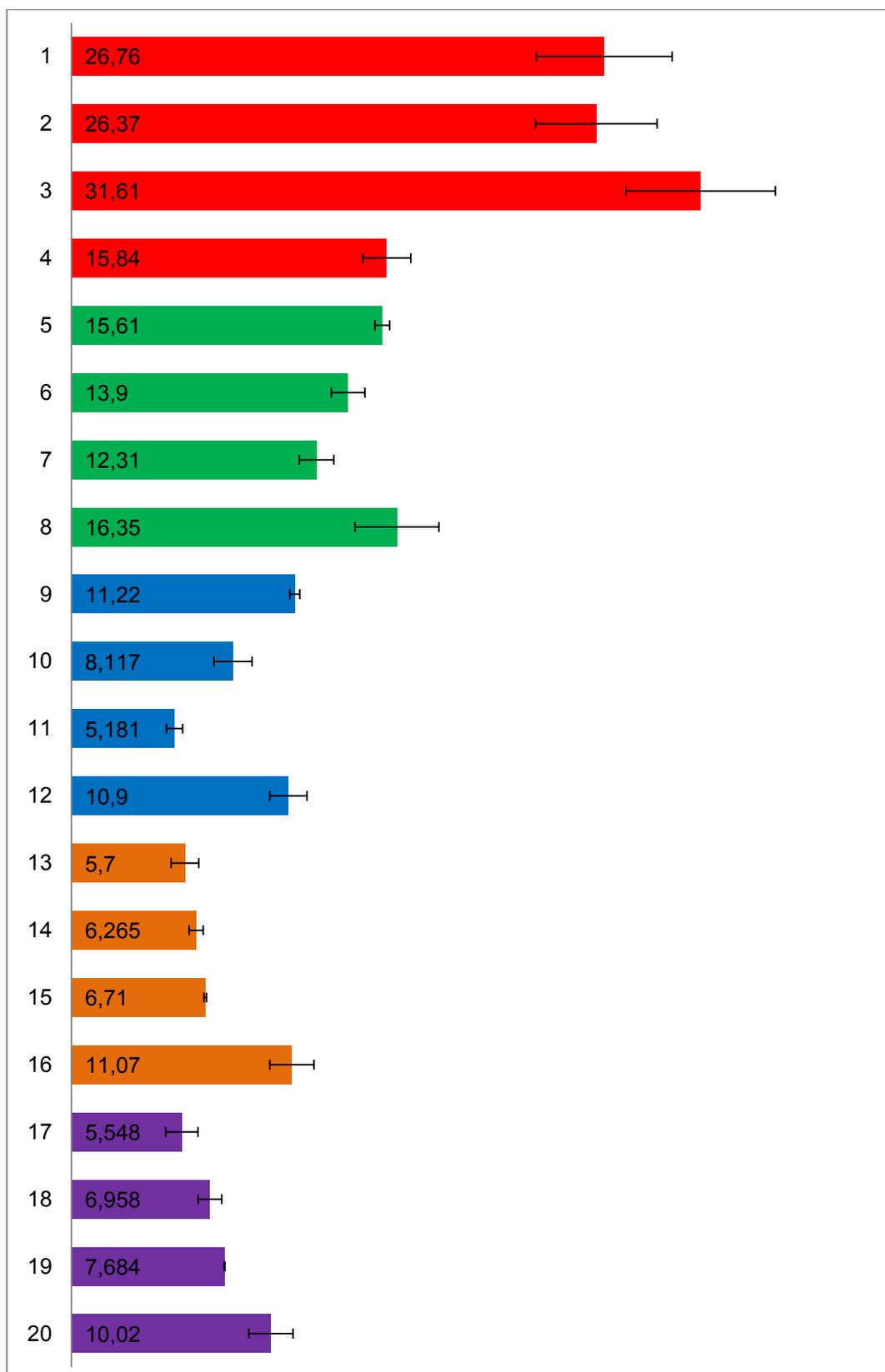
Não houve uma tendência de crescimento da resistência mecânica dos briquetes, com o aumento do percentual de aglutinante, conforme esperado.

O módulo elástico (figura 52) determinou a rigidez do material, e auxiliou na verificação do comportamento mecânico.

Conclui-se também que, conforme presumido anteriormente, os briquetes em sua totalidade apresentam comportamento de materiais frágeis, ou seja, com baixa capacidade de absorção de energia mecânica e baixa deformação plástica.

FIGURA 51 - Resistência à tração por compressão diametral, em MPa.

Fonte: Autoria própria

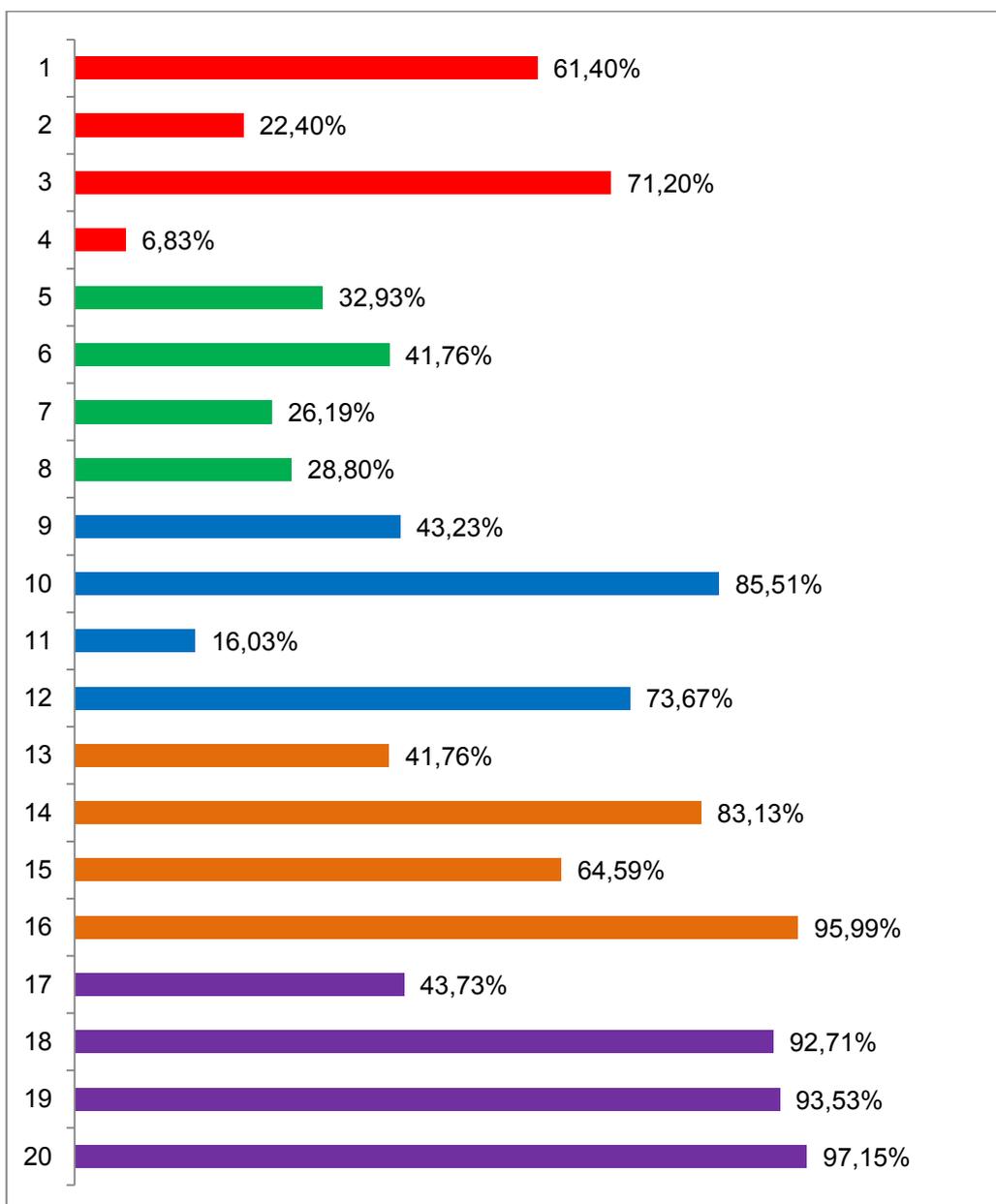
FIGURA 52 – Módulo de elasticidade, em MPa.

Fonte: Autoria própria

5.2.8 Resistência Mecânica dinâmica

A figura 53 apresenta os percentuais de massa não friável dos briquetes quando submetidos ao ensaio dinâmico de friabilidade, também, comumente conhecido por ensaio de tamboreamento.

FIGURA 53 - Friabilidade dos briquetes, em %.



Nota: Percentuais de massa retida na peneira

Fonte: Autoria própria

Neste ensaio pode se analisar a resistência do briquete em não se fraturar quando submetidos às condições de quedas, impactos e abrasões.

Os resultados apontam os briquetes com maior concentração de aglutinante tendem a ser menos friáveis (mais resistentes), porém, isto não ocorreu em todas as condições.

Os briquetes com tratamentos do 13 ao 20 apresentaram comportamento conforme esperado, onde a influência do aglutinante foi evidenciada nos briquetes com 2,5% de aglutinante (tratamento 13 e 17) que não apresentaram boas características mecânicas.

Para comprovação dos resultados, foi realizado o mesmo teste com tratamentos idênticos, modificando o teor de aglutinante para 1,25 e os resultados apresentaram 0% de massa retida.

Oliveira (1992) apresenta um estudo de friabilidade, considerando a classificação dos briquetes em relação o percentual de massa que se despreendeu dos briquetes após a análise, sendo considerados e classificados como briquetes muito pouco friáveis, aqueles que permanecerem com 90% de sua massa inicial.

De acordo com os resultados, 4 tratamentos (16, 18, 19 e 20) se enquadrariam na melhor situação (>90%) proposta pelo mesmo autor, sendo classificado como muito pouco friável. Porém, os tratamentos 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15, e 17 se enquadrariam na pior situação (<70%).

Os resultados dos tratamentos 4 foram prejudicados pela baixa pressão de compactação, devido ao escoamento do material, comentado anteriormente.

5.2.9 Seleção do tratamento para produção do briquete

Baseando se nos principais fatores de qualidade requisitados para os briquetes, foi utilizada a matriz de priorização (tab. 10) para auxiliar no processo de seleção do briquete.

TABELA 10 – Matriz de priorização.

Grupo	Tratamentos	Densidade energética	Redução volumétrica	Teor de cinzas	Poder calorífico	Pontuação	Classificação
		(5)	(4)	(2)	(2)		
A	1	1	1	1	1	13	20
A	2	2	10	2	2	58	18
A	3	3	8	3	3	59	17
A	4	4	2	4	4	44	19
B	5	5	7	5	5	73	16
B	6	6	5	6	6	74	15
B	7	8	3	7	7	80	14
B	8	7	4	8	8	83	13
C	9	10	11	9	9	130	11
C	10	11	9	10	10	131	10
C	11	12	6	11	11	128	12
C	12	9	12	12	12	141	9
D	13	15	15	13	13	187	7
D	14	16	14	14	14	192	6
D	15	14	13	15	15	182	8
D	16	13	16	16	16	193	5
E	17	20	19	17	17	244	2
E	18	19	18	18	18	239	3
E	19	18	17	19	19	234	4
E	20	17	20	20	20	245	1

Fonte: Autoria própria

Os parâmetros selecionados para comporem a matriz de priorização foram:

- a densidade energética que recebeu a maior priorização com prioridade igual a 5 (cinco);
- a redução volumétrica, recebendo o valor de 4 (quatro) como priorização;
- teor de cinzas e poder calórico superior, foram considerados no mesmo nível de importância, recebendo o valor de 2 (dois) para cada um dos atributos.

Esses parâmetros foram considerados os mais importantes para a seleção do briquete, baseados nas pesquisas e revisões bibliográficas, porém, para cada aplicação faz-se necessário à avaliação minuciosa de cada valor de priorização e atributos a comporem a matriz de decisão, a fim de se obter bons resultados, uma vez que a prioridade de um atributo em determinada aplicação, pode mudar conforme sua aplicação.

Os tratamentos com maior densidade energética receberam a maior pontuação, recebendo o valor de 20, enquanto que o tratamento de menor densidade energética recebeu 1. Da mesma forma foi atribuídas pontuações para os atributos de redução volumétrica e poder calorífico superior. O atributo teor de cinzas, por se tratar de um atributo indesejado, o tratamento que apresentou o menor percentual de cinzas recebeu a maior pontuação e, conseqüentemente, o tratamento com maior percentual de cinzas obteve a menor pontuação.

Após o preenchimento da matriz com todas as pontuações, obteve-se o resultado das pontuações, multiplicando se as notas obtidas pelo tratamento pelo valor definido a cada atributo. O tratamento que apresentou a maior pontuação, foi classificado em primeiro, ou seja, o tratamento prioritário, seguida dos demais tratamentos até completar toda a classificação.

Segundo a matriz de decisão o melhor briquete foi o de tratamento 20 composto por 10,0% de amido de milho e 100% de carvão vegetal, seguido pelo briquete de tratamento 17 composto por 2,5% de amido de milho e 100% de carvão vegetal.

O fator determinante para a seleção do briquete de tratamento 20 foi a excelente pontuação obtida pelos ótimos resultados apresentados para a redução volumétrica, teor de cinzas e poder calorífico, uma vez que para a densidade energética o briquete de tratamento 17 foi o que recebeu a maior pontuação.

6 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que foi possível a formação de briquetes de carvão vegetal e mineral nos tratamentos realizados;

O uso de aglutinantes foi indispensável no mecanismo de formação e resistência dos briquetes, entretanto, nos resultados das análises não houve diferença estatística, com exceção dos ensaios mecânicos;

A inserção do carvão vegetal na blenda melhorou a qualidade dos briquetes, possibilitando a substituição total ou parcial do carvão mineral;

O aumento da proporção de carvão vegetal na blenda reduziu o teor de cinzas e o aumentou o teor de carbono fixo;

Os briquetes com maior teor de carvão vegetal (grupos A B e C) foram mais adequados ao processo de briquetagem, por apresentarem maior redução volumétrica;

Os melhores resultados encontrados foram para os briquetes com maior percentual de finos de carvão vegetal e tratamentos com maior adição de aglutinantes;

De acordo com os parâmetros utilizados na matriz de decisão, os tratamentos 20,17 e 18 apresentaram respectivamente o primeiro, segundo e terceiro melhor resultados.

REFERÊNCIAS

ASSIS, P. S. et al. Energy consumption in smelting reduction (SR) processes. Rem: **Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 2, p. 265–270, jun. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6922**. Carvão Vegetal - Ensaio Físico - Determinação da Massa Específica e Densidade a Granel. out., 1981.

_____. **NBR 7222**. Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. maio, 2011.

_____. **NBR 8740**. Carvão Vegetal - Determinação do Índice de Quebra e Abrasão. fev., 1985.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 167**. Standard Test Method for Apparent and True Specific Gravity and Porosity of Lump Coke. 1999.

_____. **ASTM D 293**. Standard Test Method for the Sieve Analysis of Coke. 1999.

_____. **ASTM D 388**. Classification of Coals by Rank. 1999.

_____. **ASTM D 3172**. Standard Practice for Proximate Analysis Sample of Coal and Coke. 2002.

_____. **ASTM D 3173**. Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. 2000.

_____. **ASTM D 3174**. Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. 2000.

_____. **ASTM D 3175**. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. 2001.

_____. **ASTM D 5865**. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. 2010.

_____. **ASTM D 7582**. Standard Test Method for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis. 2010.

BENÍCIO, E. L.. Utilização de resíduos celulósicos na composição de briquetes de finos de carvão vegetal. (2011). Acessado em 23 de fevereiro de 2012. Disponível em: http://www.cnf.org.pe/secretaria_conflat/memorias/DOCUMENTO%20MESAS/MESA%203/Elizabeth%20Lemos%20Benicio.pdf

BEZZON, G. Síntese de novos combustíveis a partir de resíduos agroflorestais e possíveis contribuições no cenário energético brasileiro. (Dissertação) Universidade Estadual de Campinas. Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos. 1994.

BORBA, R. F. Carvão Mineral. **Balanco Mineral Brasileiro**. [S.l] . 2001

BRANCO, P. M.. O carvão mineral. **Serviço Geológico do Brasil**. 2014. Acessado em 10 de janeiro de 2014. Disponível em:
<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=2558&sid=129#PTSEC-INS>

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional - BEN**. Brasília: Ministério de Minas e Energias. 2013.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil 3. ed.** – Brasília : Aneel, 236 p. : il. 2008.

BRITO, J. O.. Carvão vegetal no Brasil: gestões econômicas e ambientais. **Estudos Avançados**. São Paulo , v. 4, n. 9, Aug. 1990 .

CARVALHO, J. L. N. et al. Potential of soil carbon sequestration in different biomes of Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 277–290, abr. 2010.

CARVALHO, E. A.; BRINCK, V. **TRATAMENTOS DE MINÉRIOS, Aglomeração**. 5ª Edição. 927 p. CETEM. MCT, 2010.

CHRISOSTOMO, W. Estudo da Compactação de Resíduos Lignocelulósicos para Utilização como Combustível Sólido. (Dissertação). Universidade Federal de São Carlos, *Campus Sorocaba*. Pós-Graduação em Ciências dos Materiais. 2011.

CLARKE, S; PRETO, F.. Biomass Densification for Energy Production **.Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs**. 2011.

COELHO, S. T. Carvão Vegetal: Aspectos técnicos, sociais, ambientais e econômicos. . [S.l.: s.n.]. 2008

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Editora Unicamp. 2008

CRUZ, F. M.. Propriedades de briquetes fabricados com finos de carvão de Eucalyptus sp e Schizolobium (Paricá). (Monografia). Universidade Federal de Viçosa. 2008.

DA RÓZ, A. L. Preparação e Caracterização de Amidos Termoplásticos. (Tese). Universidade de São Paulo. Interunidades de Ciências e Engenharia de Materiais. São Carlos. 2004.

DE JONG, W. et al. TG-FTIR pyrolysis of coal and secondary biomass fuels: Determination of pyrolysis kinetic parameters for main species and NO_x precursors. **Fuel**, v. 86, n. 15, p. 2367–2376, out. 2007.

FELFLI, F. F.; MESA, J. M.; ROCHA, J.D.; FILIPPETTO, D.; LUENGO, C.A.; PIPPOW, A. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 1. p. 236 - 242 jan 2011

FONTES, P. J. P.; QUIRINO, W. F.; PASTORE JUNIOR, F. Aglutinantes para briquetagem de carvão vegetal. . [S.l: s.n.]. 1984.

FRANKE, G. **A HANDBOOK OF BRIQUETTING: The Briquetting of Coals, Brown Coals, and Other Fuels.** v.1, 624 p. Charles griffin and company limited. London. 1916.

_____. _____. **Briquetting of Ores, Metallurgical Products, Metal Swarf and Similar Materials, Including Agglomeration.** v. 2, 209p. Charles griffin and company limited. London. 1918.

GOLDEMBERG, J. Biomass and energy. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 582–587, jan. 2009.

_____. Pesquisa e desenvolvimento na área de energia. **São Paulo em Perspectiva**, v. 14, n. 3, p. 91–97, jul. 2000.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energy and environment in Brazil. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 7–20, abr. 2007.

_____. Energia e meio ambiente no Brasil. 2008. Acessado em 01 de jan de 2013. Disponível em : <http://energiapga.blogspot.com.br/2008/08/energia-e-meio-ambiente-no-brasil-jos.html>

INÁCIO, T. D.; ABREU, C. S.; SOARES, G. B.; FALLAVENA, V. L. V.; AZEVEDO, C. M. N.; PIRES, M. J. R. Avaliação do uso do padrão de referência do carvão brasileiro CAR (MR) nas análises inediata e elementar. **XI Salão de Iniciação Científica da PUCRS.** 2010.

JANE, J.; SHEN, L.; WANG, L.; MANINGAT, C. C.. Preparation and Properties of Small-Particle Corn Starch. *Cereal Chemistry*. v. 69, p 280-283. 1992.

KRZESINSKA, M.; Szeluga, U.; Smędowski, L.; Majewska, J.; Pusz S.; Czajkowska S.; Kwiecińska B.. TGA and DMA studies of blends from very good coking Zofiówka coal and various carbon additives: Weakly coking coals, industrial coke and carbonized plants. **International Journal of Coal Geology**. v. 81, p. 293–300. 2010.

KERS, J. *et al.* Determination of physical, mechanical and burning characteristics of polymeric waste materials briquettes. **Estonian Journal of Engineering**, v. 16, n. 4, p. 307-316. 2010

KRAY, C. H. *et al.* Tannery and coal mining waste disposal on soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. SPE, p. 2877–2882, dez. 2008.

KUBACKI, M. L. *et al.* Small-scale co-utilisation of coal and biomass. **Fuel**, v. 101, p. 84-89. nov. 2012.

LEON, A. B. T. D. Estudo de pelletização e briquetagem de finos de carvão mineral. (Dissertação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de pós-graduação em Engenharia da Energia, Metalurgia e Materiais. Porto Alegre. 1985.

LICKS, L. A.; PIRES, M. Methodology for the calculation of carbon emissions and efficiency in the electricity generation by coal combustion in Brazil. Rem: **Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 2, p. 331–337, jun. 2010.

LUCENA, D. A.; MEDEIROS, R. D.; FONSECA, U. T.; ASSIS, P. S.. Aglomeração de moinha de carvão vegetal e sua possível aplicação em alto forno e geração de energia. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v. 4, p. 1-6, abril-jun. 2008.

LUCON, O.; GOLDEMBERG, J. Financial crisis, energy and sustainability in Brazil. **Estudos Avançados**, v. 23, n. 65, p. 121–130, jan. 2009.

MACHADO, J. G. M. DA S.; OSÓRIO, E.; VILELA, A. C. F. Reactivity of brazilian coal, charcoal, imported coal and blends aiming to their injection into blast furnaces. **Materials Research**, v. 13, n. 3, p. 287–292, set. 2010.

MARQUES, F. O Setor Siderúrgico Brasileiro e o Caso Plantar (Palestra proferida na disciplina EAD-5953 – Estratégias Empresariais e Mudanças Climáticas, da FEA/USP), FEA/USP, São Paulo 17. set. 2008.

MONTEIRO, K. V. Carvão: O combustível de ontem. Porto Alegre: Núcleo de Amigos da Terra Brasil. 2004.

MOREIRA, H. M.; GIOMETTI, A. B. DOS R. Protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de projetos em energia limpa. **Contexto Internacional**, v. 30, n. 1, p. 9–47, 2008.

NATURAL BUILDING BLOG. Acessado em: <http://www.naturalbuildingblog.com/free-heat-for-your-home-homemade-briquettes-and-logs/>. 2014.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. D. Estudos Preliminares de Normalização de Testes de Controle de Qualidade do Carvão Vegetal. **Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais**, Belo Horizonte. 1982.

OLIVEIRA, M. R. C., MARTINS, J.,. Caracterização e classificação do resíduo sólido “pó do balão”, gerado na indústria siderúrgica não integrada a carvão vegetal:- estudo de um caso na região de Sete Lagoas/MG, São Paulo-SP. 2003.

OLIVEIRA, R. R. L. Moldagem de briquetes com finos de carvão vegetal aglutinados com parafina. (Dissertação). Universidade Federal de São Carlos. Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais. Sorocaba. 2013.

PEREIRA, F. A. Estudos das propriedades de briquetes, utilizando como aglutinante o adesivo de silicato de cálcio. (Monografia). Universidade Federal de Viçosa. 2009

PEREIRA, J. C. Apostila de Estatística Experimental. Universidade Federal de São Carlos. 2010.

PEREZ, J. M. M., MESA, H. R. M., ROCHA, J. D. et al. Pirólise rápida de biomassa em reator de leito fluidizado Unicamp-Brasil: problemas, causas e soluções.. In: **Encontro de Energia no Meio Rural**, v.6., Campinas. 2006.

QUIRINO, W.F.; BRITO, J.O. Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal. Brasília: IBAMA / LPF- Laboratório de Produtos Florestais, 1991. (Série Técnica, n.13).

ROBETTI, L. USO de bentonita como aglutinante para a fabricação de briquetes com finos de carvão vegetal. (Monografia). Universidade do Extremo Sul Catarinense. 2013.

SAMPAIO, J. A.; COSTA, L. S. N.; ANDRADE, M. C. Ensaio contínuos de briquetagem em bancada e piloto. CETEM. Rio de Janeiro. 2007.

SANCHÉZ, C. G. **Tecnologia da Gaseificação de Biomassas**. 429p. Ed. Átomo Campinas. 2010.

SANTIN, M. F. C. L. Os impactos da demanda por crédito de carbono sobre o mercado de certificações de reduções de emissões no Brasil, no âmbito do protocolo de quioto. . [S.l.]: Augusto Mussi Alvim, 2007.

SANTOS, S. DE F. DE O. M.; HATAKEYAMA, K. Sustainable charcoal production process focusing the environmental, economical, social and cultural aspects. **Produção**, v. 22, n. 2, p. 309–321, abr. 2012.

SATER, O. et al. Comparative study of agricultural carbonization and forest residues in order to substitute firewood in the process of drying coffee beans. **Revista Ceres**, v. 58, n. 6, p. 717–722, dez. 2011.

SILVA, M. B. Application of the international in-seam coal classification for the camada inferior, Leão Mine, RS, Brazil. Rem: **Revista Escola de Minas**, v. 65, n. 1, p. 29–33, mar. 2012.

SIQUEIRA, J. S.; SOUZA, C. A. G.; SOUZA, J. A. S. Reuse of ash coal in the formulation of mortars. **Cerâmica**, v. 58, n. 346, p. 275–279, jun. 2012.

VASQUES, C.T. Preparação e caracterização de filmes poliméricos a base de amido de milho e polipirrol para aplicação como biomaterial. (Tese). Universidade Federal de Santa Catarina. Pós graduação em Química. 2007.

WORLD COAL INSTITUTE. **THE COAL RESOURCE: A Comprehensive Overview of Coal**. 48p. London. 2009.

YAMAJI, F. M., CHRISOSTOMO, W., VENDRASCO, L., FLORES, W. P., The use of forest residues for pellets and briquettes production in Brazil. Proceedings Venice 2010, **Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste**. 2010.

YAMAJI, F. M., VENDRASCO, L., CHRISOSTOMO, W, FLORES, W. P. Análise do comportamento higroscópico de briquetes. **Energia na Agricultura**. v. 28, n. 1, p. 11-15. Botucatu. 2013

APÊNDICE A

TABELA 11 – Quantidade de material em gramas, para produção das blendas para dez unidades de briquetes.

Grupo	Tratamento	Composição das blendas, em gramas (g)			
		Amido de milho	Carvão vegetal	Carvão mineral	Água
A	1	7	0	280	110
A	2	14	0	280	100
A	3	21	0	280	90
A	4	28	0	280	80
B	5	6	60	180	170
B	6	12	60	180	150
B	7	18	60	180	130
B	8	24	60	180	120
C	9	5	100	100	200
C	10	10	100	100	200
C	11	15	100	100	170
C	12	20	100	100	150
D	13	5	150	50	270
D	14	10	150	50	240
D	15	13,5	135	45	200
D	16	18	135	45	200
E	17	5	200	0	350
E	18	10	200	0	330
E	19	13,5	180	0	250
E	20	18	180	0	250

Fonte: Autoria própria