QUIRELA DE MILHO: UMA ALTERNATIVA AO AMIDO COMO AGLUTINANTE NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES DE CARVÃO

ANNIE KAROLINE DE LIMA CAVALCANTE

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Quirela de milho: uma alternativa ao amido como aglutinante na produção de briquetes de carvão

Annie Karoline de Lima Cavalcante

Brasília, 2017.

ANNIE KAROLINE DE LIMA CAVALCANTE

Quirela de milho: uma alternativa ao amido como aglutinante na produção de briquetes de carvão

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale

Brasília,2017

“*O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia*.”

Robert Collier

À minha mãe por enfrentar todas as batalhas ao meu lado;

Aos meus amigos por não me permitirem fraquejar nos momentos mais difíceis;

Ao meu namorado por oferecer conforto e carinho nos momentos de cansaço,

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador, Dr. Ailton Teixeira do Vale, por sua orientação e confiança na minha capacidade, e por todos os causos e piadas que fizeram meus dias;

Ao MSc. Vanduí Dantas pelo auxílio no Laboratório de Tecnologia da Madeira da FAL;

À Loyane Fernandes, pelo auxílio no Laboratório de Tecnologia da Madeira (EFL/FT), pelas conversas sobre briquetes e por ser uma ótima companheira de laboratório;

À minha mãe, por seu amor, compreensão e apoio ao longo dessa jornada;

Ao Rogério Sérgio, Natália Oliveira, Bruna Evangelista e Victor Santiago, pela amizade, conversas e carinho nesses anos em que estamos juntos;

Ao Glendo e a Djane, por compreenderem minhas ausências no estágio e por compartilhar maravilhosos momentos de descontração;

Ao Rafael Romão, por me incentivar a não desistir e estar sempre presente nos momentos em que precisei;

Ao professor Alexandre Florian, por me incentivar a superar meus limites e pelo apoio às minhas escolhas;

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma na minha formação e que torceram pela minha vitória.

Resumo

A carbonização de biomassa juntamente com a briquetagem de finos, apresenta-se como uma alternativa promissora para o melhoramento das propriedades energéticas de combustíveis sólidos, principalmente aqueles de uso doméstico, com geração de renda e favorecimento da busca pela preservação do meio ambiente. Neste sentido, o presente estudo tem por objetivo avaliar a substituição do amido de milho pela quirela de milho como aglutinante. Nesse intuito, foi realizada a carbonização de toretes de *Eucalyptus grandis* a uma taxa de aquecimento de 1,66 ºC/min durante 4h até o patamar de 400ºC e o carvão foi triturado em moinho de faca e classificado em peneira de 60mesh. Os aglutinantes foram gelatinizados com a adição de 125ml de água e misturados até a temperatura máxima de 85ºC. Os briquetes, nas formulações 60/40 e 70/30 de carvão e aglutinante respectivamente, foram produzidos a frio em prensa hidráulica, com pressão constante de 0,5 toneladas. Após os briquetes serem secos a 0% de umidade, foram determinadas densidade aparente pelo método estequiométrico, a resistência mecânica pela norma COPANT 30:1-0011 e a densidade energética. A análise estatística foi feita em esquema fatorial (2 X 2), onde foi avaliado o efeito da interação entre aglutinante e formulação na densidade, resistência mecânica e densidade energética, ao nível de significância de 1% de probabilidade. Do ponto de vista estatístico, houve interação aglutinante*formulação na avaliação da densidade aparente e densidade energética, enquanto que para a resistência mecânica a interação não foi significativa, sendo os fatores analisados de forma isolada. Ao analisarmos a densidade, os briquetes com amido de milho apresentaram valores médios superiores aos produzidos com quirela de milho, sendo que a formulação 60/40 mostrou-se como a melhor; o mesmo comportamento foi observado ao analisar a densidade energética, já que a densidade energética e a densidade aparente apresentam forte correlação; em relação a resistência dos briquetes com diferentes aglutinantes e diferentes formulações foi possível inferir que briquetes aglutinados com amido de milho na formulação 60/40 são mais resistentes que os outros briquetes. Sendo assim, podemos concluir que o uso de quirela de milho como alternativa ao amido de milho é viável do ponto de vista técnico, já que as propriedades dos briquetes de quirela de milho, principalmente na formulação 70/30 possuem valores de densidade e densidade energética muito próximos aos de quirela de milho na mesma formulação.

Palavras-chave: resíduos, biomassa energética, bioenergia, carvão vegetal, resíduos agroindustriais.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO ---- 1

2. OBJETIVO ---- 2

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS ---- 2

3. REVISÃO DE LITERATURA ---- 3

3.1. BIOMASSA VEGETAL ---- 3

3.1.1. Qualidade de biomassa para uso energético ---- 6

Teor de umidade ---- 6

Densidade ---- 6

Poder Calorífico ---- 7

Análise Imediata ---- 7

Análise Elementar ---- 8

Densidade Energética ---- 9

3.2. RESÍDUOS ---- 9

3.2.1. Resíduos agroindustriais ---- 11

Resíduos do processamento de milho ---- 11

3.3. CARVÃO VEGETAL ---- 12

3.4. BRIQUETAGEM ---- 13

3.5. AGLUTINANTES ---- 16

4. MATERIAIS E MÉTODOS ---- 18

4.1. COLETA E PREPARO DO MATERIAL ---- 18

4.2. BRIQUETAGEM ---- 18

4.3. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS BRIQUETES ---- 20

Densidade aparente ---- 20

Resistência mecânica ---- 21

Poder calorífico ---- 22

Densidade energética ---- 23

4.4. ANÁLISE DOS DADOS ---- 23

4.4.1. Análise Estatística ---- 23

4.4.2. Análise gráfica ---- 24

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO ---- 25

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS ---- 32

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ---------- **33**

ANEXO I ---------- **41**

ANEXO II ---------- **42**

ANEXO III ---------- **43**

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema simplificado do Ciclo do Carbono. Adaptado de Vidal e Hora (2011) 4
Figura 2. Oferta interna de energia. Fonte: EPE (2017) 5
Figura 3. Principais países produtores de milho. (**FONTE:** USDA, 2015) 11
Figura 4. Fluxograma da produção de briquetes de finos de carvão. Adaptado de Dionizio (2017) 16
Figura 5. Equipamentos utilizados para a fabricação dos briquetes (**A**: haste metálica utilizada para comprimir os briquetes; **B**: molde de aço inoxidável utilizado na fabricação dos briquetes; **C:** cilindro utilizado na extrusão dos briquetes) 19
Figura 6. Aglutinantes utilizados no preparo dos briquetes de carvão vegetal (**A:** quirela de milho gelatinizada; **B:** amido de milho gelatinizado) 20
Figura 7. Esquematização do ensaio mecânico dos briquetes; aplicação de força no sentido de compactação 21
Figura 8. Conjunto utilizado para triturar e homogeneizar os briquetes (**A**: gral e **B**: pistilo) 22
Figura 9. Calorímetro e refrigerador de água utilizados na determinação do PSC 22
Figura 10. Gráfico de efeitos principais para densidade aparente 26
Figura 11. Gráfico da interação entre aglutinante e formulação para densidade 27
Figura 12. Análise de média com dois fatores para a resistência mecânica (kgf) 27
Figura 13. Gráfico de efeitos principais para densidade energética (cal/cm³) 29
Figura 14. Gráfico de interação entre aglutinante e formulação para densidade energética 30
Figura 15. Análise de médias para densidade aparente (g/cm³) 42
Figura 16. Análise de médias para densidade energética (cal/cm³) 42
Figura 17. Efeitos principais para resistência mecânica (kgf) 43
Figura 18. Interação entre aglutinante e formulação para resistência (kgf). No gráfico é possível verificar que não há interação entre os fatores analisados 43

Lista de Tabelas

Tabela 1. Delineamento experimental. 23

Tabela 2. Valores de "F" para as variáveis analisadas..... 25

Tabela 3. Tabela de correlação de Pearson..... 30

1. Introdução

Com a previsível inviabilidade de exploração dos combustíveis fósseis, a atual crise energética e o crescente desmatamento, tornam-se necessárias as buscas por fontes de energias renováveis. Estas necessidades são cada vez mais tangíveis e necessárias para os tempos modernos. Dentre as várias opções de fontes de energia que podem substituir os combustíveis fósseis, a biomassa se apresenta como uma opção de potencial mundial (WILD et al., 2009; SOUZA, 2014).

A biomassa vegetal é toda matéria orgânica de origem vegetal que pode ter aproveitamento energético, principalmente a partir de árvores, caules, folhas e raízes e de resíduos da agricultura (palha, sabugo de milho, bagaço-de-cana, casca de arroz e de algodão, etc.).

No Brasil, biomassas lignocelulósicas constituem enorme potencial de aproveitamento energético (MACEDO, 2012). A energia produzida a partir dessas matérias-primas apresenta vantagens como redução dos impactos ambientais provocados pela queima e descarte, geração de postos de trabalho em mini usinas e em unidades de transformação dos resíduos, inovações tecnológicas e possibilidade de expansão da capacidade produtiva (MACHADO, 2015).

O aproveitamento dessas matérias-primas pode ser feito pela carbonização, processo de conversão de um combustível em carvão vegetal; briquetagem, processo de adensamento do combustível ou uma associação entre ambos.

A briquetagem do carvão vegetal na forma de finos se faz através da compactação de uma mistura de finos de carvão com um aglutinante, dentro de moldes, onde o aglutinante deve proporcionar a coesão entre as partículas; é importante que se leve em consideração alguns aspectos importantes para produção dos briquetes, como a afinidade entre as partículas dos finos de carvão e o aglutinante (BENÍCIO, 2011).

Sendo o Brasil um grande produtor de resíduos vegetais, a carbonização juntamente com a briquetagem de finos de carvão, apresenta-se como alternativa promissora para o melhoramento das propriedades energéticas de combustíveis sólidos, principalmente aqueles de uso doméstico, com geração de renda e favorecimento da busca pela preservação do meio ambiente.

2. Objetivo

Verificar a viabilidade técnica da substituição do amido de milho pela quirela de milho como aglutinante na fabricação de briquetes de *Eucalyptus grandis* .

2.1. Objetivos específicos

I. Produzir e caracterizar energeticamente briquetes com amido de milho e quirela de milho como aglutinante na produção de briquetes de carvão de eucalipto.

II. Comparar estatisticamente os briquetes produzidos com quirela de milho com aqueles produzidos com amido de milho, a partir de suas características físicas.

3. Revisão de Literatura

3.1. Biomassa Vegetal

Biomassa é toda matéria orgânica de origem vegetal ou animal, que tenha conteúdo de energia química no seu interior, como as vegetações aquáticas ou terrestres, árvores, biomassa virgem, lixo orgânico, resíduos de agricultura, esterco de animais e outros tipos de restos industriais, ou seja, é toda a matéria viva existente em um dado momento na Terra (SANTOS, 2012 & OMACHI et al., 2004).

As propriedades da biomassa variam em função de fatores como localização geográfica, clima, tipo de solo e parte da planta (raízes, caules, galhos) e são de fundamental importância para a compreensão do seu comportamento frente a diferentes tratamentos térmicos (MACEDO, 2012). Ainda de acordo com a autora, estas propriedades podem ser determinadas por meio de análise imediata (teor de umidade, teor de materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo), análise química elementar (teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio) e análise química macromolecular (teor de lignina, celulose, hemicelulose e extrativos).

Segundo Silva (2009), a biomassa pode subdividir-se em biomassa sólida, líquida e gasosa. A biomassa sólida tem como fonte os produtos e resíduos sólidos provenientes das atividades agroflorestais e das indústrias conexas, assim como a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos. A biomassa líquida ou os biocombustíveis têm a sua origem principal em culturas agrícolas. Os principais biocombustíveis são o biodiesel, o bioetanol e biometanol, podendo ser utilizados na substituição total ou parcial dos combustíveis fósseis usados em veículos automóveis. A biomassa gasosa, ou biogás, tem origem nos efluentes agropecuários, agroindustriais e urbanos.

Biomassa florestal significa toda a biomassa existente na floresta ou apenas na sua fração arbórea (SANQUETTA, 2002). Moreira (2011) citando Hall (1997), afirma que a biomassa de origem florestal utilizada para energia contribui duplamente para a redução da concentração de gases do efeito estufa: no momento do seu crescimento devido à absorção e armazenamento de carbono pela fotossíntese; e pela redução da emissão de carbono na sua substituição por combustíveis fósseis.

A biomassa é uma fonte de energia renovável e, se utilizada da maneira correta, pode ser sustentável (VIDAL; HORA, 2011). O processo de renovação da biomassa se dá através do ciclo do carbono, onde as plantas capturam o CO_2 da atmosfera e o utilizam para a realização da fotossíntese, sendo devolvido, em parte, à atmosfera por meio da respiração das plantas, animais e microrganismos. Depois de mortos, os organismos sofrem ações dos decompositores; quando a decomposição da matéria orgânica for total, há liberação de CO_2, CH_4 e H_2O, se a decomposição for parcial, a matéria orgânica é transformada em material combustível (Figura 1).

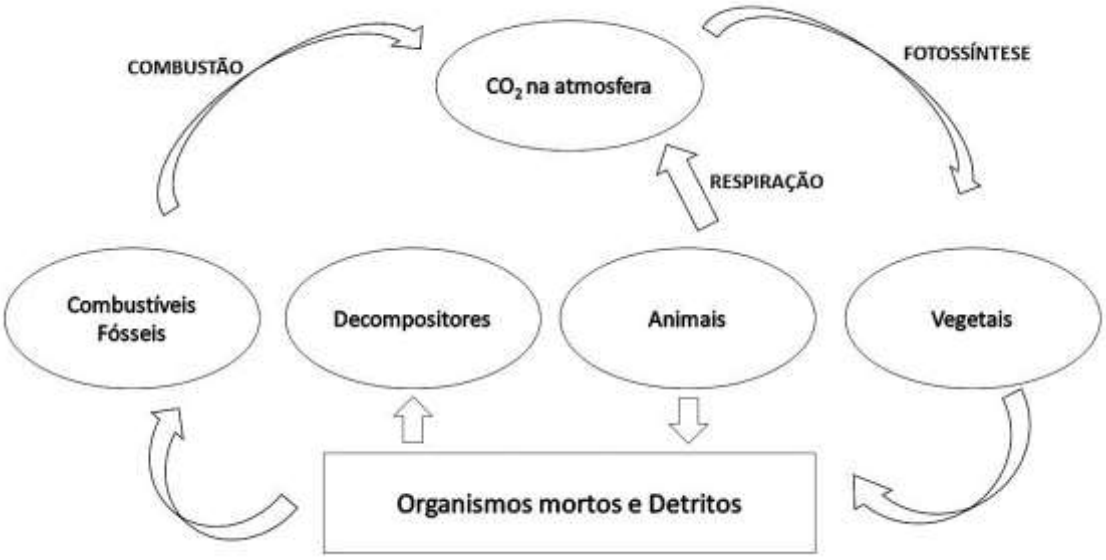

Figura 1. Esquema simplificado do Ciclo do Carbono. Adaptado de Vidal e Hora (2011)

A biomassa apresenta-se como a melhor alternativa à curto prazo para substituição de combustíveis fósseis. Ao longo dos anos é observado um crescimento significativo na matriz energética brasileira quanto ao seu uso (Figura 2), representando juntamente com outras fontes de energia renovável, aproximadamente 43,5% da oferta interna de energia (EPE, 2017).

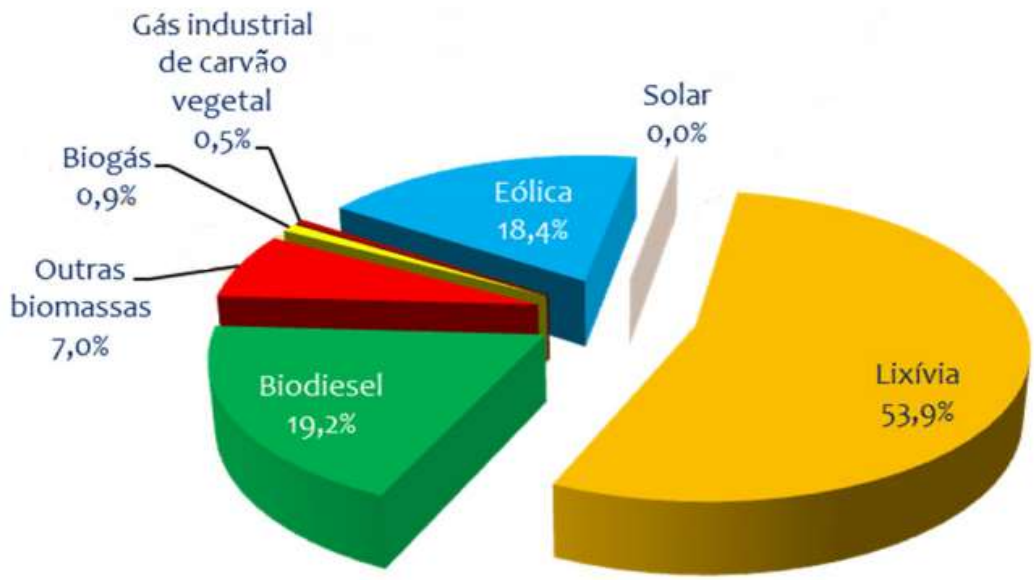

Figura 2. Oferta interna de energia. Fonte: EPE (2017)

Os pontos mais importantes e valorizados quando se trata da utilização da biomassa como fonte de geração de energia são os baixos teores de cinza e enxofre; o fato de serem combustíveis renováveis com possibilidade de uso nas formas líquida, sólida e gasosa; e sua contribuição para o balanço neutro entre emissões e fixação de gases poluentes como o dióxido de carbono (DIONIZIO, 2017). Dentre os principais benefícios da utilização da biomassa está o baixo custo de aquisição, liberação de resíduos menos danosos ao meio ambiente, menor corrosão dos equipamentos, maior utilização de mão-de-obra e a redução das emissões de poluentes, uma vez que apresentam um balanço nulo de emissão de CO_2 (GRAUER; KAWANO, 2001).

A biomassa vegetal é uma excelente alternativa para complementar as atuais necessidades energéticas a preços competitivos e com baixo impacto ambiental. Uma vantagem da biomassa vegetal é que, na maioria das vezes, ela é o resíduo gerado de atividades agroindustriais, diminuindo assim a pressão sobre os recursos naturais que são diretamente explorados como fonte de energia (QUIRINO et al., 2012).

3.1.1. Qualidade de biomassa para uso energético

A biomassa pode ser convertida em energia através de diferentes processos, tais como combustão, pirólise, gaseificação e liquefação. É importante ressaltar que o uso de biomassa residual vem se destacando a cada ano como forma de aproveitamento de resíduos para a geração de energia, aportando ganhos ambientais, sociais e econômicos (VILAS BOAS, 2011).

A densidade, teor de umidade, poder calorífico e análise imediata são as principais propriedades nos estudos de utilização de espécies de madeira como combustível (BRITO; BARRICHELO, 1977). O conhecimento de propriedades da biomassa como: teor de umidade, densidade, composição química elementar (carbono, hidrogênio, oxigênio) e macromolecular (celulose, lignina, hemiceluloses, extrativos), composição imediata (carbono fixo, material volátil, cinzas) são importantes para a utilização da biomassa como fonte de energia, pois influencia o seu poder calorífico (VALE et al., 2011).

- **Teor de umidade**

Teor de umidade é definido como a massa de água contida na biomassa, podendo ser expressa em base úmida e em base seca, sendo avaliada pela diferença entre os pesos de uma amostra, antes e logo após ser submetida à secagem até peso constante (NOGUEIRA, 2007). A determinação do teor de umidade é importante pois apresenta relação inversa com o potencial energético. Assim, quanto maior o conteúdo de água (umidade), menor será sua capacidade de combustão, devido ao processo de evaporação da umidade que consome energia de combustão e prejudica o armazenamento podendo ocasionar a proliferação de fungos e a degradação do material, além de elevar os custos de transportes (OLIVEIRA et al., 2005; VALE et al., 2011).

- **Densidade**

A densidade é uma das principais características físicas dos biocombustíveis, pois ela define a logística a ser tratada: o transporte e o armazenamento (NOGUEIRA, 2007).

Machado (2015) citando Bowyer et al. (2003), a densidade da madeira é uma característica resultante da combinação de diversos fatores, como dimensões das fibras, espessura da parede, volume dos vasos e parênquimas, proporção entre lenho primaveril

e outonal, e arranjo dos elementos anatômicos. A densidade aparente pode ser determinada pela razão entre a massa seca e o volume saturado da madeira ou pelo método de máximo teor de umidade, em pequenas amostras (MACHADO, 2015).

- **Poder Calorífico**

O poder calorífico é a propriedade mais importante de um combustível, pois representa a quantidade de calor liberado durante a queima completa de uma quantidade de combustível, sendo expresso em calorias por gramas ou quilocalorias por quilograma, influenciado pelo teor de umidade, cinzas e extrativo (CORDER, 1973).

O poder calorífico dividi-se em poder calorífico superior (PCS) que ocorre quando a combustão se efetua a volume constante e no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é contabilizado. O poder calorífico inferior (PCI) é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água (BRIANE; DOAT, 1985; JARA, 1989 citados por QUIRINO et al., 2005).

O poder calorífico líquido ou útil (PCU) é definido como a quantidade de calor liberado pela queima descontada a energia necessária para evaporar a água refrente à umidade da madeira (LIMA, 2010). Quirino et al. (2005) citando Jara (1989) informam que o poder calorífico superior é muito influenciado pela constituição química da biomassa vegetal, principalmente a lignina e extrativos (resinas, óleos-resinas, matérias graxas, óleos, etc.

- **Análise Imediata**

Trata-se de um quantificador dos teores de umidade, voláteis e carbono fixo presentes na biomassa (NOGUEIRA, 2008; VIEIRA 2012) que auxiliam na caracterização energética de qualquer material.

Teor de Voláteis

O teor de voláteis é a parte da biomassa que volatiliza durante o aquecimento (incluindo umidade) no processo de combustão (MCKENDRY, 2002; VIEIRA, 2012). O teor de voláteis interfere na ignição, pois quanto maior o teor de voláteis maior será a reatividade e consequentemente a ignição (KLAUTAU, 2008).

Teor de cinzas

As cinzas são constituídas de substâncias inorgânicas que não entram em combustão, como o silício (Si), potássio (K), sódio (Na), enxofre (S), cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg) e ferro (Fe), bem como argila, areia e sais que possam estar na biomassa (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008; VIEIRA, 2012). Uma alta concentração de cinzas pode ocasionar a diminuição do poder calorífico, perda de energia e afetar a transferência de calor (NOGUEIRA, 2007).

Os teores em cinzas encontrados para as amostras de amido de milho lavado e amido de milho comercial foram respectivamente de 0,10 e 0,14 %, o que mostra que o teor de material inorgânico em ambos é baixo (SOUZA; ANDRADE, 2000). De modo geral, plantas da família Poaceae apresentam teor de cinzas na faixa de 10%.

Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo é massa remanescente após a liberação de compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de umidades (MCKENDRY, 2002). De acordo com Vale et al. (2011) citando Brito e Barrichello (1982), combustíveis com alto índice de carbono fixo apresentam queima mais lenta, implicando maior tempo de residência nos aparelhos de queima, em comparação com outros combustíveis que tenham menor teor de carbono fixo.

- **Análise Elementar**

Trata-se de um ensaio empregado na determinação da composição química, e através desta o poder calorífico superior (PC) dos combustíveis (VIEIRA, 2012). Esse ensaio fornece os percentuais mássicos dos elementos, carbono —C, hidrogênio —H, oxigênio —O, nitrogênio —N, enxofre —S e cinzas —Z contidos na amostra de combustível (KLAUTAU, 2008; CORTEZ; LORA; GOMES 2008).

A análise Elementar também fornece a razão entre as populações de átomos de hidrogênio/carbono e oxigênio/carbono. Essas relações permitem o cálculo do poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI), pois existe correlação entre o PCS e as razões H/C e O/C, além disso, conhecendo-se a relação H/C é possível calcular o PCI (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008; VIEIRA, 2012).

- **Densidade Energética**

A densidade energética é a quantidade de energia por unidade de volume de um combustível sendo que para utilização energética dos combustíveis de biomassa é desejável uma alta densidade energética, isto é, uma maior quantidade de energia por unidade de volume (PROTÁSIO et al., 2012).

3.2. Resíduos

O Brasil é um país com características favoráveis ao desenvolvimento de várias culturas agrícolas e florestais e, como consequência, tem uma grande geração de resíduos, proveniente tanto de atividades agrícolas quanto madeireiras, com grande potencial para aproveitamento energético em larga escala (DIONIZIO, 2017). Quirino (2003) define como resíduo tudo o que sobra de um processo de produção ou exploração, de transformação ou de utilização. O mesmo autor classifica os resíduos da seguinte forma:

- Resíduos urbanos ou domésticos;
- Resíduos industriais;
- Resíduo industrial banal: não possui aditivos tóxicos, como a madeira sem tratamento e materiais de origem vegetal em geral;
- Resíduo industrial especial:
  - ➔ Inerte: não libera e nem reage com outros tipos de substâncias;
  - ➔ Último: sem possibilidade de transformação (ex.: cinzas);
  - ➔ Tóxico ou perigoso: libera substâncias tóxicas durante o tratamento e estocagem (ex.: resíduo nuclear).

Segundo Eriksson e Prior (1990) citado por Dionizio (2017), os resíduos podem ser agrupados em três categorias:

a) **Resíduos agrícolas:** gerados diretamente no campo durante a colheita da safra (por exemplo: a palha dos cereais);
b) **Resíduos florestais:** galhos, folhas, etc., gerados na exploração florestal;

c) **Resíduos agroindustriais:** gerados no beneficiamento de grãos, raízes, gramíneas e madeira (casca de arroz, de café, de amendoim, de nozes, bagaço de cana, serragem, sabugo de milho, etc.).

Os resíduos vegetais caracterizam-se por dimensões variadas; em geral, apresentam alta umidade, baixa densidade e grande volume; demandam grandes áreas de estocagem, além de serem dispersos geograficamente, o que dificulta sua coleta e transporte (PAULA, 2010).

De acordo com Cortez et al. (2008), os resíduos provenientes das indústrias de base florestal constituem uma importante fonte de biomassa para energia. Esses resíduos são constituídos por todo aquele material que é deixado para trás na coleta da madeira, tanto em florestas e bosques naturais como em reflorestamento, e pela serragem e aparas produzidas na indústria no processamento da madeira. De acordo com Lima & Silva (2005), todo o processamento da madeira gera resíduos em menor ou maior quantidade, tendo um aproveitamento entre 40-60% do volume total da tora.

Os resíduos dessas indústrias são classificados de acordo com sua morfologia, como: cavacos - partículas com dimensões máximas de 50×20 mm, em geral provenientes do uso de picadores; maravalhas - resíduo com menos de 2,5 mm; serragem - partículas de madeira com dimensões entre 0,5 e 2,5 mm, provenientes do uso de serras; pó - resíduos menores que 0,5 mm; lenha - resíduos de maiores dimensões, compostos por costaneiras, aparas e resíduo de topo de tora (FONTES, 1994).

Segundo Vale e Gentil (2008), a biomassa e seus resíduos são combustíveis sólidos, podendo ser utilizados *in natura* ou podem ser transformados através de processos mecânicos em partículas menores, como cavacos, serragem ou adensados na forma de briquetes.

Dentre as formas de melhor se utilizar estes resíduos, têm-se os métodos de densificação (compactação, aglomeração ou adensamento) que proporcionam uma série de vantagens, quando comparado a sua utilização no estado natural, principalmente no tocante ao armazenamento, manuseio, aumento da densidade energética (FRAZA, 2008).

3.2.1. Resíduos agroindustriais

O Brasil é considerado como um dos maiores produtores agrícolas devido a disponibilidade de área para cultivo, possibilidade de introdução de culturas variadas, a posição geográfica (condições climáticas adequadas), além de sua rica biodiversidade e tecnologia avançada, afigura-se, portanto como um fornecedor com potencial altíssimo de resíduos para a produção de bioenergia (VIEIRA, 2012).

Os resíduos da agroindústria de processamento de produtos de origem vegetal (frutas, oleaginosas, fibrosas, madeireiras, etc.) e origem animal (laticínios, avicultura de corte, aquicultura, etc.) apresentam em suas composições diferentes constituintes, que abrem muitas oportunidades de agregação de valor (ROSA et al.; 2011).

Resíduos do processamento de milho

A cadeia que envolve a cultura do milho pode ser considerada agroindustrial, pois, além de abranger uma gama de produtos advindos dela, a produção é cercada de tecnologia, devido à existência de um setor de insumos, maquinários e implementos agrícolas, que promoveu a cultura a um patamar de produção de larga escala e conferiu viabilidade a ela (IMEA, 2015).

O milho é hoje o cereal mais produzido no mundo, a produção mundial concentra-se basicamente em três grandes produtores: Estados Unidos, China e Brasil; sozinhos esses países representam 65,62% da produção mundial de milho (Figura 3).

Figura 3. Principais países produtores de milho. (**FONTE:** USDA, 2015)

Dentre os cereais cultivados no Brasil, o milho é o mais expressivo, com cerca de 40,8 milhões de toneladas de grãos produzidos, referente a duas safras, normal e safrinha. Por suas características fisiológicas, a cultura do milho tem alto potencial produtivo, já tendo sido obtida produtividade superior a 16 ton/ha, em concursos de produtividade de milho conduzidos por órgãos de assistência técnica e extensão rural e por empresas produtoras de semente (CRUZ et al., 2006).

A cultura do milho deixa como resíduos, no campo, os caules, as folhas e, na indústria, os sabugos. Estima-se que, para cada tonelada de grãos de milho colhida, são geradas entre 2,2 e 2,7 toneladas de talos e folhas, bem como entre 0,3 e 0,9 toneladas de sabugos. Considerando a grande variação na produção de biomassa total da planta, influenciada pelas cultivares utilizadas e condições de manejo da cultura dentre as variedades em uso, há registros de produção de até 6 toneladas de resíduos por tonelada de grãos de milho (DIAS et al., 2012).

A quirera de milho é um subproduto proveniente do beneficiamento industrial do grão de milho, sendo composta, em sua maior parte, de milho quebrado, além de sementes de plantas invasoras (PIRES, 1999) e amplamente utilizado para a alimentação de bovinos, caprinos e suínos.

3.3. Carvão Vegetal

A carbonização é o mais antigo processo de conversão de um combustível em outro de melhor qualidade e conteúdo energético. O processo de carbonização consiste no aquecimento do material original, na presença de pequenas quantidades de oxigênio até que o material volátil seja removido. O produto final obtido, carvão, possui densidade energética superior àquela do material *in natura* e queima em temperaturas mais elevadas (HORST, 2013).

O carvão vegetal gera nas fases de produção, transporte, manuseio e peneiramento nas usinas siderúrgicas uma quantidade elevada de finos, podendo chegar a 25% do total produzido e, em alguns casos, apresentando dificuldades e/ou inviabilidade para o seu aproveitamento (FONTES et al., 1989).

Os finos de granulometria abaixo de 9 mm podem ser injetados nas ventaneiras dos altos-fornos, entretanto, granulometrias abaixo de 2 mm são indesejáveis devido à

maior contaminação deste material com terra e, consequentemente, maior geração de cinzas. A briquetagem de finos de carvão vegetal surge nesse contexto como uma forma de agregar valor a esse resíduo e oferecer ao mercado um produto de fácil trabalhabilidade, com a vantagem adicional de reduzir o impacto da exploração irracional das florestas (PEREIRA, 2009).

Brito e Barrichello (1981) propõem uma classificação do carvão vegetal de acordo com seu uso:

i. Carvão para uso doméstico: apresenta baixa resistência, devendo ser facilmente inflamável e durante a queima produzir pouca fumaça, sendo obtido através de carbonização entre 350 e 400°C.

ii. Carvão para uso na metalurgia: é utilizado para abastecer altos-fornos na indústria metalúrgica e na fundição de minérios. Deve apresentar alta densidade, boa resistência e baixa friabilidade[1], baixo teor de voláteis, de cinzas e alto teor de carbono fixo (80%). Esse carvão é obtido a altas temperaturas, acima de 650°C, permanecendo nesta condição durante um longo período.

iii. Carvão gasogênio: utilizado como força motriz, deve ser pouco friável e apresentar densidade aparente máxima de 0,3 e teor de carbono fixo na faixa de 75%.

iv. Carvão ativado: deve ser leve e apresentar elevada pureza e boa reatividade química, características diretamente ligadas à sua utilização.

v. Outros usos: o carvão pode ser usado de diversas formas, como na indústria de cimento, onde deve ser pulverizado e mais inflamável.

3.4. Briquetagem

Dos métodos de compactação da biomassa existentes, destacam-se a briquetagem e a peletização. A briquetagem consiste em adensar resíduos vegetais *in natura* a partir da aplicação de altas pressões e com elevação da temperatura ou resíduos vegetais carbonizados (finos de carvão) misturados a aglutinantes e prensados a frio

[1]Tendência de um sólido de desfazer-se em agregados de tamanhos menores sob a aplicação de carga.

(QUIRINO, 1991). Com a elevação da temperatura na briquetagem de resíduos *in natura* tem-se a plastificação ou amolecimento da lignina, que funciona como aglutinante e promove a interação química entre as partículas, conferindo ao produto final, consistência e uma estrutura bem definida. Na briquetagem industrial, o produto formado tem dimensões aproximadas de 150-250mm de comprimento e diâmetro de 50-100mm (QUIRINO, 1991; SOUZA, 2014).

Através do processo de briquetagem com o uso de aglutinantes, consegue-se o aproveitamento dos finos de carvão na forma de um combustível de melhor densidade, mais homogêneo, granulometria uniforme, maior resistência mecânica e baixa geração de finos, mantendo-se as características energéticas do carvão, facilitando o manuseio, a estocagem, a utilização do mesmo e permitindo o seu transporte a maiores distâncias (FONTES et al., 1989).

Para a briquetagem de biomassa *in natura*, o processo mais usual é realizado em elevadas pressões, que provoca um aumento da temperatura do processo da ordem de 100ºC, o que faz com que a lignina atue como ligante das partículas da biomassa vegetal. Nesse processo, é importante que o teor de umidade esteja na faixa de 8% a 15% e o tamanho da partícula esteja entre 5 e 10 mm. Para a biomassa carbonizada, em que a elasticidade das fibras foi degradada pelo tratamento térmico, pode-se obter briquetes em um equipamento que desenvolva baixa pressão de compactação. Assim, uma briquetadeira para trabalhar nessas condições possui tecnologia mais simplificada, o que resulta em menor custo do equipamento (MORAIS et al., 2006).

Antunes (1982) define briquetagem como um processo em que pequenas partículas de materiais são prensadas com o objetivo de formar blocos com formato definido e de maior tamanho, convertendo os subprodutos do beneficiamento agroflorestal e finos de carvão em um material de maior valor.

Quirino (1991) definiu como briquetagem a aplicação de pressão em uma massa de partículas dispersas com o objetivo de torná-las um sólido geométrico compacto com uma maior concentração de energia, considerando-se a massa específica aparente e o poder calorífico médio dos briquetes e resíduos. Ainda segundo o autor, o processo de briquetagem pode ser afetado por diversos fatores, como a temperatura, pressão, tamanho das partículas e umidade do material.

Moro (1987) citado por Dionizio (2017) e Melo (2000), descreve uma metodologia para briquetagem de finos de carvão vegetal, baseada nos seguintes passos:

- Moagem do carvão: necessário para evitar que partículas muito grandes prejudiquem a ação dos materiais ligantes. Normalmente utilizam-se moinhos de martelo, e a faixa granulométrica ideal, geralmente abaixo de 3 mm, é em função da natureza do carvão, do tipo de prensa, da forma e do tamanho do briquete;

- Mistura com aglutinante: o aglutinante é um material cuja função é unir as partículas do carvão. A escolha e a quantidade do material ligante são de suma importância na manufatura dos briquetes, devido à sua sensibilidade aos custos do processo;

- Prensagem: para que o briquete adquira formato geométrico definido e resistência, é necessário que a mistura de carvão e ligante receba uma pressão definida. O uso de calor está condicionado ao tipo de ligante utilizado;

- Secagem: alguns aglutinantes são adicionados com água ao briquete, proporcionando elevado teor de umidade ao produto final, por este motivo, é necessário que eles sejam sevos. Geralmente a secagem ocorre com a passagem de ar quente e seco;

- Estocagem e embalagem: os briquetes são armazenados em silos de estocagem dimensionados para manter um estoque intermediário entre a produção e a distribuição, e em seguida são empacotados para o consumo. Um fluxograma da produção de briquetes de finos de carvão é apresentado na Figura 4.

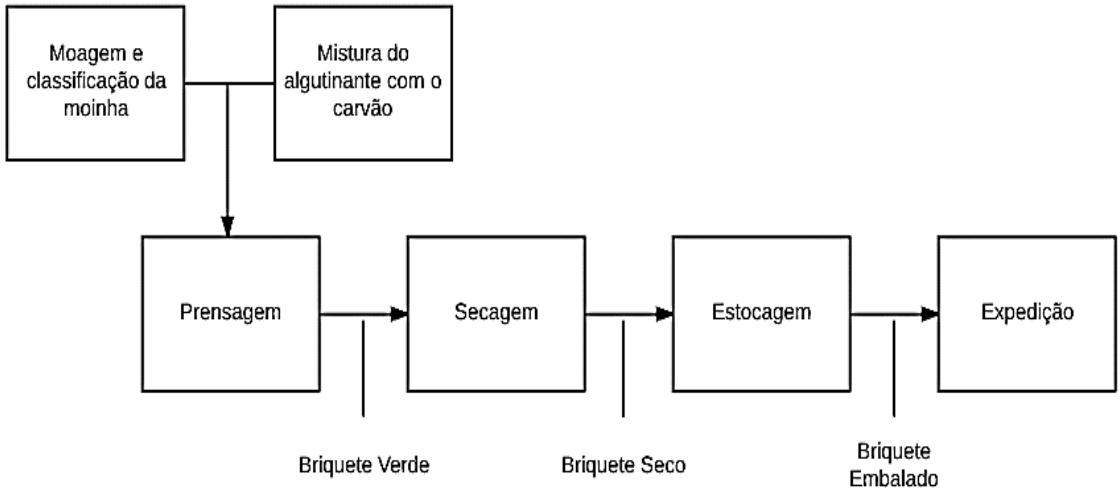

Figura 4. Fluxograma da produção de briquetes de finos de carvão. Adaptado de Dionizio (2017)

O preço do carvão vegetal é baixo, quando comparando as outras fontes energéticas, podendo inviabilizar a comercialização de briquetes ou deixar margens de lucro muito estreitas. Alguns fatores devem ser levados em consideração no estudo da viabilidade econômica de plantas de briquetagem e comercialização do produto. Aspectos como preço e características da matéria-prima são necessários para que haja uma análise do custo de transporte até o local onde o material será briquetado ou do briquete até o consumidor final, além disso, é necessário que se busquem meios que amortizem os valores, procurando baratear o produto (PEREIRA, 2009).

3.5. Aglutinantes

Na produção de briquetes de carvão vegetal, usa-se normalmente um aglutinante com a finalidade de promover o adensamento. A princípio, qualquer adesivo pode ser utilizado como aglutinante, sendo a escolha feita em função do custo e da qualidade final desejada. Dependendo do uso final, os briquetes não devem ser confeccionados com aglutinante poluentes, emissores de fumaça, etc. O estudo do melhor material ligante é de fundamental importância no processo de briquetagem. O aglutinante não deve prejudicar as características energéticas do carvão, diminuindo o rendimento calorífico, aumentando o teor de voláteis e cinzas, ou mesmo, ser usado em proporções que seu gasto inviabilize economicamente o briquete (FONTES; QUIRINO; PASTORE Jr, 1984).

De acordo com Pereira (2009), a principais características a serem consideradas nos aglutinantes são: baixo custo, fácil aplicação, alta resistência mecânica, alta taxa de aglomerante, inexistência de material inerte em sua composição, resistência às condições adversas do meio, como umidade, e boas condições de operacionalidade.

De acordo com Quirino (1991) e Benício (2011), os aglutinantes são classificados em três tipos: matriz, filme e químico.

- **Aglutinante tipo matriz:** formam uma matriz contínua, envolvendo completamente as partículas. São exigidas quantidades razoáveis do aglutinante porque, geralmente, as substâncias são pouco resistentes e dependem de uma fase contínua em torno das partículas individuais. Ex.: alcatrão vegetal, asfalto ou piche de petróleo.

- **Aglutinante tipo filme:** geralmente são usados como soluções ou dispersões, como o álcool, a cetona, o tetracloreto de carbono, entre outros, porem a água se destaca como o solvente mais comum. Quando úmidos, os briquetes apresentam baixa resistência, e quando secos observa-se alta resistência. No caso de materiais orgânicos ou produtos celulares, a água estimula a adesão pelas forças de Van der Waals, devido ao aumente da área verdadeira de contato entre partículas. Ex.: silicato de sódio, água, amido, melaço e outros.

- **Aglutinantes químicos:** são aglutinantes que dependem de reações químicas efetivas dos componentes do aglomerado entre si ou entre o aglomerado e o material que está sendo aglomerado. Os aglutinantes químicos podem ser do tipo matriz ou filme, dependendo da resistência e características dos produtos das reações. Ex.: $Ca(OH)^2$ + melaço; $Ca(OH)^2 + CO^2MgO + Fe^2O^3$, entre outros.

Os autores também descrevem substâncias que são utilizadas para diminuir o atrito entre as partículas ou entre o equipamento e o material, que são denominadas lubrificantes.

4. Materiais e Métodos

4.1. Coleta e preparo do material

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Tecnologia da Madeira, localizado no Departamento de Engenharia Florestal e no Laboratório de Tecnologia da Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília, situados no Distrito Federal. Para a confecção do carvão vegetal foram utilizados toretes de *Eucalyptus grandis*, provenientes dos plantios realizados na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília (FAL – UnB).

A carbonização do material foi realizada em forno mufla à temperatura de 450°C durante 4 (quatro) horas com taxa de aquecimento de 1,66°C/minuto, segundo metodologia adotada por Protásio et al. (2013). Para a confecção dos briquetes, o carvão produzido foi moído em moinho de faca do tipo Willey e classificado em peneira de 60 mesh. Após moído e classificado, o carvão seco foi misturado com quirela de milho e amido de milho para a confecção dos briquetes.

4.2. Briquetagem

Os briquetes de carvão foram confeccionados no Laboratório de Tecnologia da Madeira (EFL/FT), utilizando uma prensa hidráulica a frio LilMarcon, modelo MARCON MPH-15, com capacidade máxima de 15 toneladas e um conjunto de pistão, molde de aço inoxidável com 2,5cm de diâmetro e tubo metálico oco (Figura 5).

Figura 5. Equipamentos utilizados para a fabricação dos briquetes (**A**: haste metálica utilizada para comprimir os briquetes; **B**: molde de aço inoxidável utilizado na fabricação dos briquetes; **C:** cilindro utilizado na extrusão dos briquetes)

Os briquetes foram produzidos utilizando amido e quirela de milho como aglutinantes. O amido de milho gelatinizado foi preparado a partir da metodologia proposta por Martins et al. (2016) de uma massa de 20g de amido com adição de 125ml de água destilada, e após misturados foram levados a aquecimento até que atingissem a temperatura de 58ºC e assim permaneceram até que a solução chegasse ao ponto de gelatina.

A quirela de milho utilizada para o preparo do aglutinante foi moída e classificada em peneira de 60 mesh. O aglutinante a base de quirela de milho foi confeccionado a partir da mistura de 50g de quirela de milho com 125ml de água destilada e gelatinizada a temperatura de 80°C por 2 minutos (Figura 6), segundo metodologia proposta por Dionizio (2017).

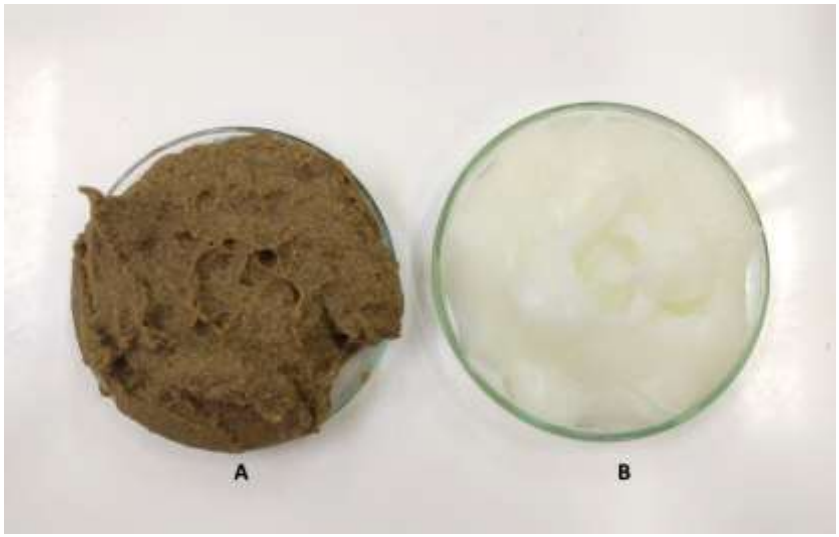

Figura 6. Aglutinantes utilizados no preparo dos briquetes de carvão vegetal (**A:** quirela de milho gelatinizada; **B:** amido de milho gelatinizado)

Os briquetes foram produzidos com massa de 10g respeitando duas proporções: 60/40 e 70/30 de carvão e aglutinante, respectivamente. A mistura entre carvão e aglutinantes foi feita de forma manual durante 5 minutos e posteriormente colocada no molde, onde foi comprimida com o auxílio do pistão durante 5 minutos com carga constante de 0,5 toneladas.

4.3. Avaliação das propriedades dos briquetes

- **Densidade aparente**

A densidade aparente foi determinada pelo método estequiométrico, que consiste em obter o volume e massa dos briquetes secos a 0% a partir de medições com o auxílio de paquímetro digital e balança analítica com precisão de 10^{-2}g.

Dada a natureza do molde utilizado para a confecção dos briquetes, o volume dos briquetes é obtido pela equação do volume do cilindro (Equação 1) e a massa específica aparente é obtida pela divisão da massa dos briquetes pelo seu volume (Equação 2).

$$\mathbf{Vol\ (cm^3) = \pi\ r^2\ h} \qquad \textbf{(Equação 1)}$$

Onde:

Vol.: volume do briquete seco a 0% de umidade (m^3);

r: raio do briquete (m);

h: altura do briquete (m)

$$\rho(g.cm^{-3}) = m_s/Vol_s \qquad \textbf{(Equação 2)}$$

Onde:

ρ: densidade do briquete seco a 0% de umidade ($kg.m^{-3}$);

m_s: massa do briquete seco a 0% de umidade (kg);

Vol_s.: volume do briquete (m^3)

- **Resistência mecânica**

O ensaio para determinação da resistência mecânica foi realizado segundo a norma COPANT 30:1-0011 (COPANT, 1971b) com adaptações, onde a carga foi aplicada no sentindo de compactação dos briquetes (Figura 7).

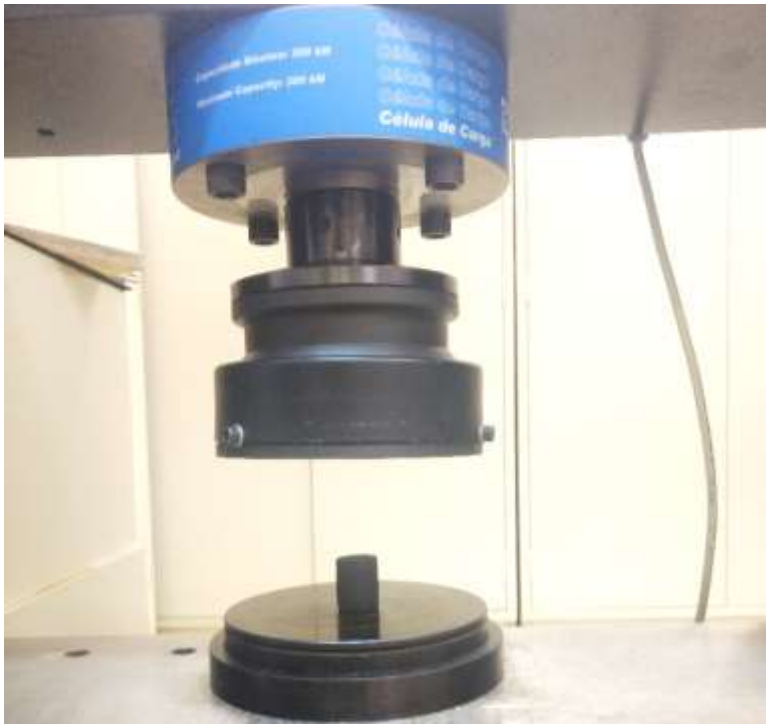

Figura 7. Esquematização do ensaio mecânico dos briquetes; aplicação de força no sentido de compactação

O ensaio ocorreu com a utilização de uma máquina universal de ensaios da marca INSTROMEC/EMIC modelo EMIC 23-300, célula de carga de 30.000kN e velocidade de 0,3 $mm.min^{-1}$. A resistência mecânica foi dada pela carga máxima suportada pelos briquetes até sua ruptura.

- **Poder calorífico**

Para determinação do poder calorífico superior (PCS), os briquetes foram moídos com o auxílio de um conjunto composto por gral e pistilo (Figura 8), com a finalidade de homogeneizar os briquetes que compunham as amostras.

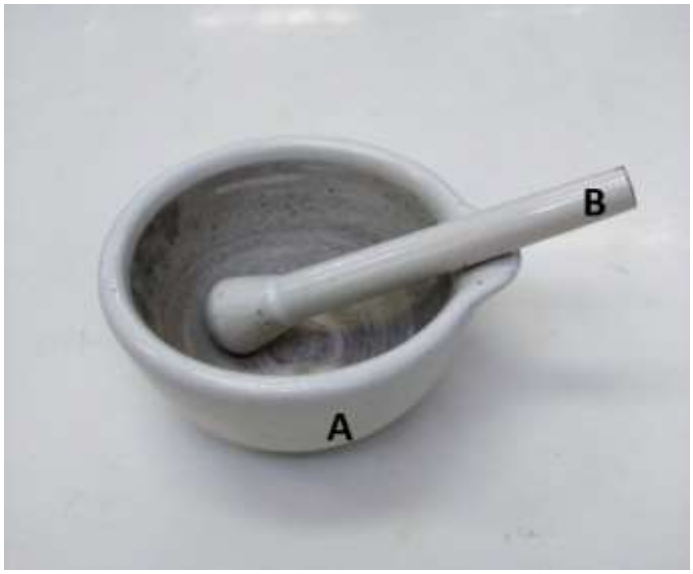

Figura 8. Conjunto utilizado para triturar e homogeneizar os briquetes (**A**: gral e **B**: pistilo)

O ensaio de determinação do poder calorífico superior foi utilizado Calorímetro IKA modelo C2000 basic (Figura 9), os ensaios seguiram a norma ABNT NBR 8633/1984 (ABNT, 1984). Os ensaios foram feitos em triplicatas e o PCS foi obtido pela média entre os resultados de duas amostras cujos valores não ultrapassassem 29 $cal.g^{-1}$ de diferença entre eles.

Figura 9. Calorímetro e refrigerador de água utilizados na determinação do PSC

- **Densidade energética**

A densidade energética foi calculada através do produto entre poder calorífico inferior e de densidade aparente, conforme a Equação 4.

$$\mathbf{DE\ (kcal.\ m^{-3}) = PCS \times \rho} \qquad \textbf{(Equação 4)}$$

Onde:

DE: densidade energética ($kcal.m^{-3}$);

PCS: poder calorífico inferior ($kcal.kg^{-1}$);

ρ: densidade do briquete ($kg.m^{-3}$);

4.4. Análise dos dados

O experimento foi feito em delineamento casualizado em esquema fatorial com 2 aglutinantes e 2 formulações da mistura, com cinco repetições compostas, cada amostra composta é formada por 4 briquetes, totalizando 20 briquetes por tratamento (Tabela 1).

Tabela 1. Delineamento experimental.

Tratamentos	Aglutinante	Formulação
1	Amido de milho	60/40
2		70/30
3	Quirela de milho	60/40
4		70/30

Os testes estatísticos foram realizados com o auxílio do software R: A Language and Environment for Statistical Computing e os gráficos foram produzidos com o software Minitab® Statistical Software.

4.4.1. Análise Estatística

A análise de dados foi feita em esquema fatorial onde foram avaliados os fatores e a interação entre os fatores aos níveis de significância de 0,01 e 0,05 de probabilidade.

Quando a interação for significativa, a interação dos fatores é analisada em relação aos aspectos que caracterizam energeticamente o material, no caso, a densidade, resistência mecânica e densidade energética. Caso a interação não seja estatisticamente

significativa, o efeito dos fatores sobre as propriedades dos briquetes são analisados de forma isolada.

4.4.2. Análise gráfica

Os gráficos de efeitos principais e de interação entre os fatores e a variável, elucidam de forma sintética o efeito dos aglutinantes e das formulações nas variáveis analisada, visto que através da análise fatorial do experimento foi observado que há interação entre os fatores no tocante a variável estudada.

O gráfico de efeitos principais é analisado em função da angulação das linhas médias, onde linhas paralelas ao eixo X indicam que não há efeito dos fatores sobre a variável analisada e vice-versa, sendo que quanto mais acentuada a linha de médias maior é a magnitude do efeito.

Na análise da interação é necessário avaliar se as linhas são paralelas entre si ou não. No caso de linhas não paralelas, ocorre interação e quanto menos paralelas as linhas forem, maior a força da interação. Para validar essa interpretação é necessário avaliar a significância estatística dos efeitos e da interação. Quando a interação for estatisticamente significativa, os efeitos principais não podem ser avaliados sem considerar o efeito da interação.

5. Resultados e Discussão

Na Tabela 2 são apresentados os valores de "F", para a análise da densidade aparente, resistência e densidade energética.

Tabela 2. Valores de "F" para as variáveis analisadas

Fonte de variação	Densidade aparente	Resistência	DE
Aglutinante (A)	267,308 ***	36,8067 ***	130,388 ***
Formulação (F)	0,997	21,5508 ***	6,7879 *
Interação A x F	119,936 ***	1,4635	35,7632 ***

* significativo a 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$)
*** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

A tabela 3 apresenta os valores médios de densidade aparente, densidade energética e resistência mecânica dos briquetes.

Tabela 3. Valores médios das propriedades avaliadas no presente estudo

	Amido		Quirela	
	60/40	70/30	60/40	70/30
Densidade aparente (g/cm³)	0,453 (1,04)	0,430 (1,49)	0,400 (0,25)	0,419 (0,75)
Resistência mecânica (kgf)	57,617 (26,89)	35,982 (11,98)	30,715 (10,68)	18,025 (11,07)
Densidade energética (Gcal/m³)	2,985 (1,27)	2,914 (2,34)	2,619 (1,57)	2,800 (1,17)

Os valores correspondem a média das amostras compostas
Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação em porcentagem

Os briquetes produzidos com amido de milho nas formulações 60/40 e 70/30 apresentaram valores médios de densidade aparente de 0,453 e 0,430 $g.cm^{-3}$, sendo em média 7,13% superiores a densidade dos briquetes de quirela de milho (0,400 e 0,419 $g.cm^{-3)}$ nas formulações 60/40 e 70/30, respectivamente. Martins et al. (2016), trabalhando com briquetes de finos da moinha de carvão de eucalipto e amido como aglutinante, obteve valores de densidade de 0,983 $g.cm^{-3}$, sendo superiores aos encontrados nesse trabalho. Brito e Barrichelo (1980), correlacionando as características físicas da madeira com as características do carvão, obtiveram densidade aparente do carvão de *Eucalyptus grandis* de 0,231 $g.cm^{-3}$; o valor corresponde à metade da densidade encontrada para os briquetes.

Ao analisar o gráfico de efeitos principais (Figura 10), é possível averiguar que o aglutinante amido de milho está associado a maior densidade do briquete, enquanto que a quirela está associada à briquetes de menor densidade. Em relação a formulação, a análise se faz em relação a angulação da reta, ou seja, a formulação não tem tanta influência quanto o tipo de aglutinante na densidade dos briquetes. Sendo assim, ao analisar os briquetes na formulação 60/40 ou na formulação 70/30 apresentam densidades semelhantes.

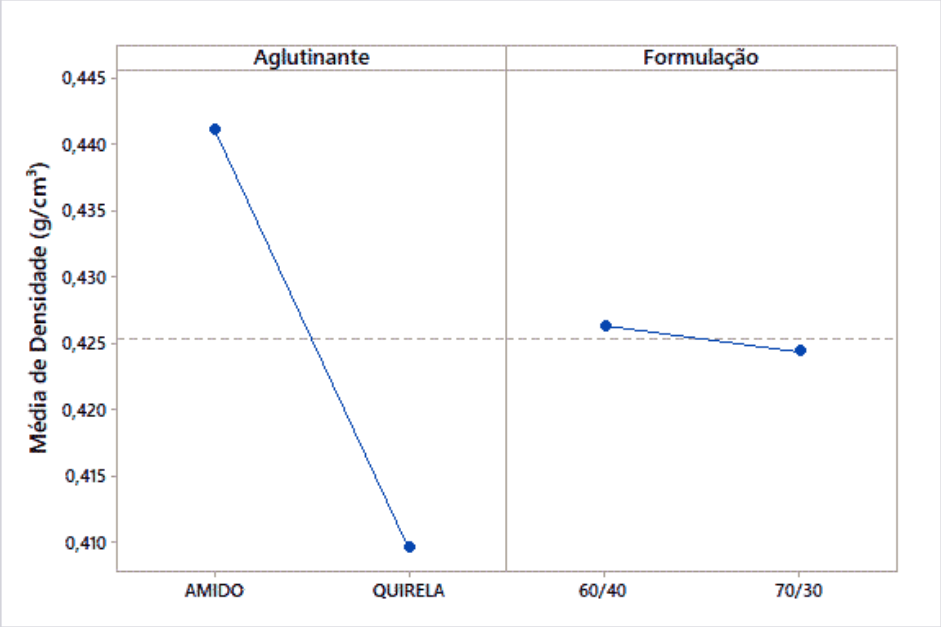

Figura 10. Gráfico de efeitos principais para densidade aparente

No gráfico de interação para a densidade aparente (Figura 11), as linhas não são paralelas, sendo assim é possível inferir que existe interação entre aglutinante e formulação na densidade aparente dos briquetes, ou seja, a relação entre densidade e formulação depende da quantidade de aglutinante. Sendo assim, ao analisar um conjunto de briquetes feitos com amido de milho na formulação 60/40 bem como na formulação 70/30, a densidade será maior do que a dos briquetes fabricados com quirela nas formulações 60/40 e 70/30.

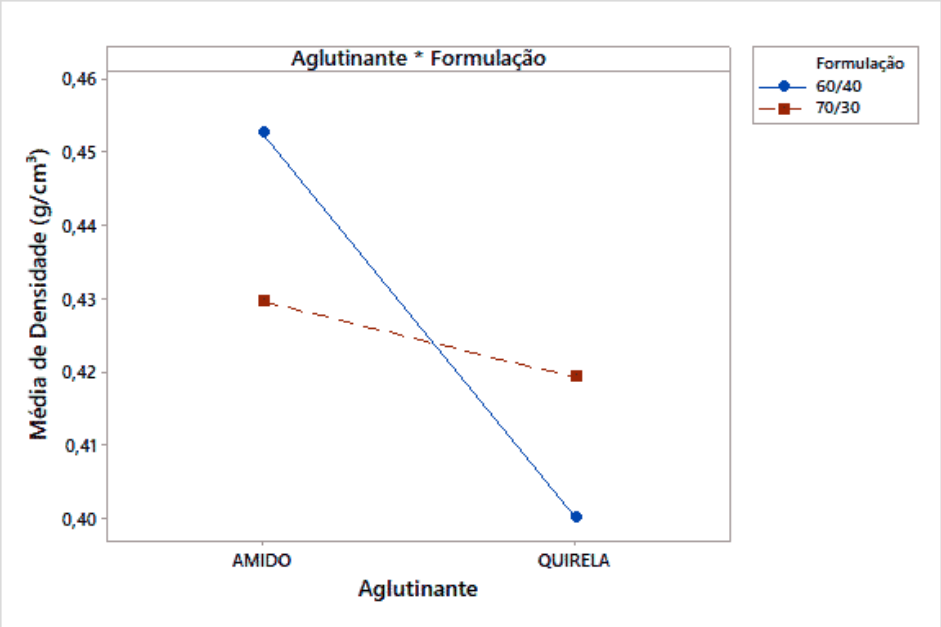

Figura 11. Gráfico da interação entre aglutinante e formulação para densidade

Na análise estatística foi possível observar que a interação entre aglutinantes e formulações para avaliação da resistência mecânica não é estatisticamente significativa, sendo correto avaliar os fatores de forma isolada no experimento. Sendo assim, o teste de Tukey foi aplicado às médias dos tratamentos e a análise de média é apresentada de forma gráfica na Figura 12.

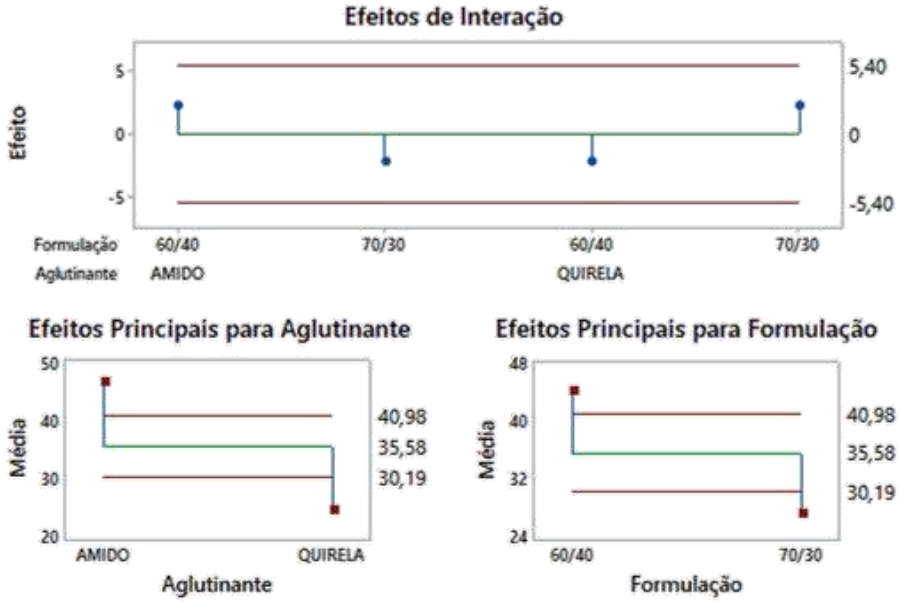

Figura 12. Análise de média com dois fatores para a resistência mecânica (kgf)

Na Figura 12 é possível observar que os efeitos de interação estão dentro dos limites de decisão, indicando que não há interação entre os fatores ao nível de significância de 1%. Nos gráficos de efeitos principais, tanto para aglutinante quanto para formulação, os pontos que representam as médias dos níveis estão fora dos limites de decisão, isso indica que a diferença entre cada uma das médias é significativa estatisticamente a 1% de probabilidade. É possível concluir que os briquetes de amido de milho e os briquetes com formulação 60/40 estão associados à uma maior resistência mecânica devido a maior quantidade de aglutinante, enquanto que os briquetes de quirela e com formulação 70/30 estão associados à uma menor resistência.

Os briquetes produzidos com amido de milho têm resistência variando entre 35,982 e 57,617 kgf enquanto que os briquetes com quirela de milho variam entre 31 e 18 kgf, nas formulações 60/40 e 70/30 respectivamente. Dionizio (2017), avaliando o aproveitamento energético de resíduos agroindustriais, observou que os briquetes confeccionados utilizando o aglutinante de resíduos de milho (quirela de milho) na proporção de 60/40, e submetidos a pressão de 100 kgf/cm², apresentaram os maiores valores de resistência a compressão, 81,03 kgf, destacando-se dos demais. Benício (2011) observou que briquetes de finos de carvão vegetal com maior proporção de aglutinante possuem resistência a compactação paralela maior em relação a briquetes com menores proporções de aglutinante.

De acordo com Donato et al. (2015), existe uma relação direta entre a densidade dos briquetes e sua resistência mecânica, parâmetros importantes no transporte e queima do material. Os briquetes com maior resistência a compressão apresentam melhores propriedades para o transporte e manuseio.

Dionizio (2017) obteve valores de densidade energética para briquetes de finos de carvão aglutinados com quirela de milho variando entre 3100 e 3600 Mcal/m³, no presente estudo, os valores médios de densidade energética variam entre 2,588 e 3,034 Gcal/m³, valores próximos aos obtidos pela autora.

Visando à utilização energética dos combustíveis de biomassa, é desejável alta densidade energética, ou seja, maior quantidade de energia por unidade de volume (PROTÁSIO et al., 2012), sendo assim, os briquetes com amido possuem maior energia

por unidade de volume do que os briquetes com quirela de milho nas mesmas proporções de aglutinantes.

O gráfico de efeitos principais (Figura 13) mostra como o aglutinante e as formulações atuam sobre a densidade energética dos briquetes. É possível inferir que o aglutinante amido de milho e a formulação 70/30 estão associados a maior densidade energética do briquete.

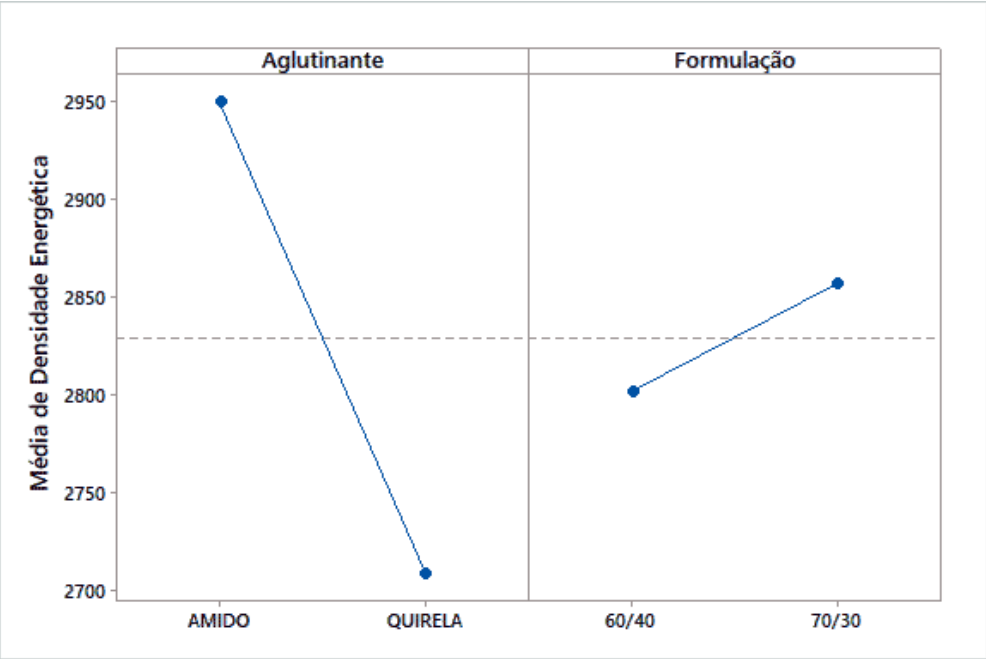

Figura 13. Gráfico de efeitos principais para densidade energética (cal/cm³)

No gráfico de interação entre aglutinante e formulação (Figura 14), é possível observar que briquetes com amido e formulação 60/40 apresentam maior densidade energética do os briquetes com quirela de milho na mesma formulação. Os briquetes com amido de milho na formulação 70/30 possuem maior densidade energética que os briquetes com quirela com a mesma formulação.

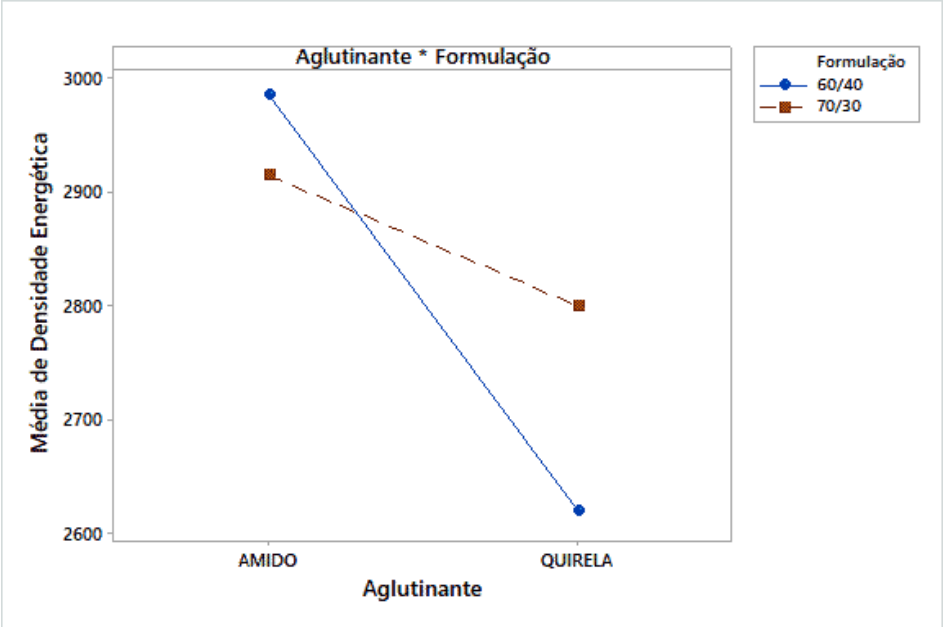

Figura 14. Gráfico de interação entre aglutinante e formulação para densidade energética

Ao analisarmos os briquetes com os diferentes aglutinantes nas diferentes formulações, podemos afirmar que os briquetes aglutinados com amido de milho na formulação 60/40 têm maior energia por unidade de volume do que os briquetes com amido de milho na formulação 70/30. Além da diferença entre as densidades energéticas entre as diferentes formulações e os diferentes aglutinantes, é possível verificar que os briquetes na formulação 70/30 têm menor variação entre os valores médios de densidade energética.

A densidade aparente é uma característica importante na avaliação dos briquetes, pois maiores densidades indicam mais massa disponível para um mesmo volume considerado e consequentemente maior densidade energética (DIONÍZIO, 2017).

A tabela 3 mostra a correlação entre as características energéticas, densidade e densidade energética, dos briquetes de finos de carvão avaliadas nessa pesquisa.

Tabela 4. Tabela de correlação de Pearson.

	Densidade aparente	**Densidade Energética**	**Resistência**
Densidade aparente	1		
Densidade Energética	0.930096736	1	
Resistência	0.69935961	0.514370241	1

Através da análise da tabela de correlação é possível afirmar que a densidade energética se correlaciona com a densidade aparente em 93%, isto é, a densidade energética é explicada pela densidade aparente com 93% de precisão, enquanto que a correlação da densidade aparente com a resistência está em um patamar intermediário, aproximadamente 70%.

Protásio et al. (2011) e Souza (2014), ao avaliar briquetes de resíduos lignocelulósicos com diferentes tempos de compactação e aplicação de temperatura, verificaram que há um aumento da densidade energética em função do aumento da densidade, visto que há uma relação direta entre as variáveis. A análise de correlação feita no presente estudo, corrobora a relação observada pelos autores.

6. Considerações finais

A quirela de milho apresenta-se como uma opção ao amido de milho como aglutinante na fabricação de briquetes de finos de carvão vegetal, principalmente na formulação 70/30, onde apresentou densidade aparente e densidade energética igual a 0,419 $g.cm^{-3}$ e 2,800 $Gcal.m^{-3}$, respectivamente, valores estes próximos aos encontrados para os briquetes com amido de milho, com diferença de aproximadamente 8%.

A quirela de milho além de apresentar valores de densidade aparente e densidade energética muito próximos ao do amido de milho, têm como vantagem o baixo custo de aquisição visto que é menos processado, conservando propriedades semelhantes ao milho *in natura*.

Recomenda-se um estudo aprofundado da composição química da quirela de milho e do amido de milho bem como seu comportamento em relação ao processo de gelatinização onde pode ocorrer mudanças na estrutura química dos aglutinantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico, 1984

ANTUNES, R.C. Briquetagem de carvão vegetal. Produção e Utilização de Carvão Vegetal Belo Horizonte. CETEC outubro, 1982.

BARROSO, R. A. (2007). **Consumo de Lenha e produção de resíduos de madeira no Setor Comercial e Industrial do Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 65p.

BENÍCIO, E. L. **Utilização de resíduo celulósico na composição de briquetes de finos de carvão vegetal.** 67p. Dissertação (Mestrado) Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2011.

BRIANE, D.; DOAT, J. **Guide technique de la carbonisation: la fabrication du charbon de bois**. Aix-en-Provence, ÉDISUD, 1985. 180p.

BRITO, J. O. & BARRICHELO, L. E. G. Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeira da Amazônia. **IPEF**, Piracicaba. Circular técnica n. 2, 5p., 1981.

BRITO, J. O. & BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: 1 - densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **IPEF**, Piracicaba (14):9-20, 1977. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr14/cap01.pdf>. Acesso em 01 de julho de 2017.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. **Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: densidade da madeira x densidade do carvão.** Piracicaba: IPEF, 1980. p.101-113.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Carvão vegetal de madeira de desbaste de Pinus. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 146, p. 1-12, jun. 1982.

CORDER, S. E. **Wood and bark as fuel**. Corvalis: School of Forestry, 28p.1973. Disponível em: <https://goo.gl/N44XL9>. Acesso em 18 de junho de 2017.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GOMEZ, E. O. **Revista Biomassa para energia**. Campinas, SP: Unicamp, 732 p., 2008. Disponível em:<https://goo.gl/BBspZj>. Acesso em 19 de junho de 2017.

CRUZ, J. C. et al. Manejo da cultura do milho. **Embrapa Milho e Sorgo-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2006.

DIAS, JMC de S. et al. Produção de briquetes e pellets a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. **Embrapa Agroenergia-Documentos (INFOTECA-E)**, 2012.

DIONIZIO, A. F. (2017). **Aproveitamento energético de resíduos agroindustriais no Distrito Federal.** Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM – 289/2017, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97p.

DONATO, D. B.; SILVA, C. M. S.; MAGALHÃES, M. A.; JÚNIOR, C. A. A.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R. Propriedades de briquetes obtidos de finos de carvão vegetal. Revista Ciência da Madeira (**Brazilian Journal of Wood Science**), v. 6, n. 2, 2015.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2017 – Relatório Síntese**: Ano Base 2016. Rio de Janeiro: EPE, 2017. Disponível em:<https://ben.epe.gov.br/benrelatoriosintese.aspx> Acesso em 14 de novembro de 2017

FONTES, P. J. P.; QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Aglutinantes para briquetagem de carvão vegetal. **Brasília: Laboratório de Produtos Florestais, Departamento de Pesquisas, Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal**, p. 1-5, 1984.

FONTES, P. J. P.; QUIRINO, W. F.; PASTORE JUNIOR, F.; FILGUEIRAS, S. M. S. **Aglutinante para briquetagem de carvão vegetal**. Brasília: DPQ/IBDF, 1984.

FONTES, P. J.; QUIRINO, W. F.; OKINO, E. Y. **Aspetos técnicos da briquetagem de carvão vegetal no Brasil**. Brasília: DPQ/IBDF, 1989. 14 p.

FRAZA, C. Densificação da madeira. In: **1º Seminário Madeira Energética MADEM 2008**, Rio de Janeiro / RJ, 2008. Disponível em:<https://goo.gl/PkexZ8>. Acesso em 19 de junho de 2017.

GOLDEMBERG, J. The Brazilian energy initiative. **Johannesburg World Summit on Sustainable**, v. 27, 2007.

GRAUER, A.; KAWANO, M. **Boletim Informativo da Bolsa de Reciclagem**, ano I, nº 5 – NOV/DEZ-2001. Disponível em:<https://goo.gl/pHKMKB>. Acesso em 18 de junho de 2017.

HALL, D. O. Biomass energy in industrialized countries: a view of the future. **Forest Ecology and Management**, v. 91, n. 1, p. 17-45, 1997.

HORTS, D. J. **Avaliação da produção energética a partir de ligninas contidas em biomassas**. 106p. Dissertação (Mestrado) Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa-PR. 2013.

IMEA – Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária (2015). Disponível em:< http://www.imea.com.br/upload/pdf/arquivos/Paper_jornalistas_Milho_AO.pdf> Acesso em 19 de dezembro de 2017.

JARA, E. R. P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989. (Comunicação Técnica, 1797).

KLAUTAU, J. V. P. **Análise Experimental de uma Fornalha a lenha de Fluxo Cocorrente Para Secagem de Grãos.** 2008. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) PPGERHA, UFPR. Curitiba: 2008.

KOLLMANN, F. **Technologie des Holzes und Holzverkstoffe1**. Springer Verlag. Berlin,1050 p. 1951.

LIMA, E. A. Alternativa para estimar o preço da madeira para energia. **Comunicado Técnico.** Embrapa Florestas, Colombo - PR, dezembro, 20p, 2010. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/880875/1/CT260.pdf>. Acesso em 19 de junho de 2017.

LIMA, E. G.; SILVA, D. A. Resíduos gerados em indústrias de móveis de madeira situadas no pólo moveleiro de Arapongas-PR. **Floresta**, v. 35, n. 1, 2005.

MACEDO, L. A. (2012). **Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis do processo de torrefação**. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM - 189/2012, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 49p.

MACHADO, M. P. O. (2015). **Quantificação de resíduos do processamento de cinco espécies comerciais amazônicas e análise do potencial energético.** Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM – 247/2015, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 58p.

MARTINS, M. P.; BENÍCIO, E. L.; JÚNIOR, A. F. D.; ALMEIDA, R. B.; CARVALHO, A. M.; YAMAJI, F. M. Produção e avaliação de briquetes de finos de carvão vegetal compactados com resíduo celulósico proveniente da indústria de papel e celulose. **Revista Árvore**, v. 40, n. 1, p. 173-180, 2016.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 37-46, 2002.

MELO, V. P. S. **Produção de briquetes de carvão vegetal com alcatrão de madeira.** 64p. Dissertação (Mestrado) Pós-Graduação em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. 2000

MINITAB Inc. (2010). "Chapter Name," *Getting Started with Minitab 18*, p. #-#. Disponível em:<www.minitab.com>.

MORAIS, M. R.; SEYE, O.; FREITAS, K. T. *et al.* Obtenção de briquetes de carvão vegetal de cascas de arroz utilizando baixa pressão de compactação. In: **Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural**, 2006, Campinas - SP, Brasil. Disponível em:<https://goo.gl/z387YC> Acesso em 22 de maio de 2017.

MOREIRA, J. M. M. A. P. Potencial e participação das florestas na matriz energética. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 363-372, 2011. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.68.363.

MORO, J. P. **Briquetagem de finos de carvão vegetal.** In: anais da 2ª jornada de engenharia dos Países de língua Portuguesa. Rio de Janeiro. 1987. v. 1. p. 1-14.

NOCK, H. P.; RICHTER, H. G.; BURGER, L. M. **Tecnologia da madeira**. Curitiba: UFPR- Setor de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia e Tecnologias Rurais, 1975. 200p.

NOGUEIRA, M. F. M. **Biomassa Energética**: Caracterização da Biomassa. Palestra Proferida na I Escola de Combustão, Florianópolis – SC 2007.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. (2008). Caracterização Energética da Biomassa Vegetal. BARRETO, Eduardo José Fagundes (Coord). **Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida**: Soluções Energéticas para a Amazônia. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52-63.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. de C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus pellita F. Muell. **Revista Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p 431-439, set. 2010.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; FILHO, M. T. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de Eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.1, p.115-127, 2005.

OMACHI, I. H. *et al*. Produção de biomassa florestal para exportação. **Biomassa e Energia**, v.1, n.1, p.29-36, 2004

PAULA, L. E. R. (2010). **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos**. Dissertação (Mestrado) Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira. Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 72p.

PEREIRA, F. A. (2009). **Efeito da granulometria e de aglutinantes nas propriedades de briquetes de finos de carvão vegetal.** Dissertação (Mestrado) Pós-Graduação em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 66p.

PIRES, Aureliano José Vieira et al. Amonização da quirera de milho com alta umidade. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 28, n. 6, p. 1186-1193, 1999.

PROTÁSIO, P. T., COUTO, A. M., DOS REIS, A. A., TRUGILHO, P. F., & GODINHO, T. P. (2013). Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de Eucalyptus spp aos 42 meses de idade. *Pesquisa Florestal Brasileira*, *33*(74), 137-149.

PROTÁSIO, T. P.; ALVES, I. C. N.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; BALIZA, A. E. R. (2011). Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 31(68), 273.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; MENDES, R. F.; RIBEIRO, M. X.; TRUGILHO, P. F.; LEITE, E. R. S. Torrefação e carbonização de briquetes de

resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 11, p 1252 – 1258, 2012.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; MENDES, R. F.; RIBEIRO, M. X.; TRUGILHO, P. F.; LEITE, E. R. S. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p.1252-1258, 2012c. DOI: 10.1590/S1415-43662012001100015

QUIRINO, W. F. **Características e índices de combustão de briquetes de carvão vegetal.** Piracicaba, 1991. 64f. dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

QUIRINO, W. F. *et al.* Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. ***Scientia Forestalis*.** 2012; 96:525-536. Disponível em:<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr96/cap11.pdf>. Acesso em 18 de maio de 2017.

QUIRINO, W. F. *et al.* Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira**, v. 89, n. 100, p. e106, 2005.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais.** Brasília, Laboratório de Produtos Florestais - LPF/IBAMA, 2003. 14 p.

QUIRINO, W. F; BRITO, J. O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Brasília, Laboratório de Produtos Florestais – LPF/IBAMA, (série técnica nº 13), 1991. 18 p.

R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em:< https://www.R-project.org/>.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R. *et al.*(Eds.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: [s.n.], 2002, p. 119-140.

SANTOS, J. R. S. (2012). **Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos.** Dissertação de

Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 85p.

SILVA, M. T. C. **Análise do balanço entre sequestro e emissão de CO2 resultante do circuito de produção e consumo de biomassa florestal numa central de co-geração**. 2009. Tese de Doutorado. FCT-UNL.

SOUZA, F. (2014) **Avaliação da qualidade de briquetes produzidos com seis biomassas agroflorestais por métodos não destrutivos**. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.TD - 48/2014, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 142p.

SOUZA, R. C. R.; ANDRADE, C. T. Investigação dos processos de gelatinização e extrusão de amido de milho. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 24-30, 2000.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. In: _____. **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Rio Branco: Suprema, 2008. p. 195-241.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V.; GONÇALEZ, J. C.; COSTA, A. F. Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café (*Coffea arábica, L*) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*), Duke. **CERNE**, v. 13, n. 4, 2007.

VALE, A. T.; MENDES, R. M.; AMORIM, M. R. S.; DANTAS, V. F. S. Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e torta de pinhão manso (*Jatropha curcas*). **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 267-273, 2011.

VIDAL, A. C. F; HORA, A. B. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para geração de energia. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 33, p. 261-314, 2011.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas.** 56p. Dissertação (Mestrado) Pós-Graduação em Energia na Agricultura. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 2012. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.

VILAS BOAS, M. A. **Efeito do tratamento térmico da madeira para produção de briquetes**. 2011. 79 f. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal; Meio Ambiente e Conservação da Natureza; Silvicultura; Tecnologia e Utilização de) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

ANEXO I – Tabelas de análise de variância da interação aglutinante*formulação com as variáveis analisadas

```
Mod1 <- aov(Densidade~Aglutinante*Formulacao)

> anova(Mod1)
Analysis of Variance Table

Response: Densidade
                      Df    Sum Sq   Mean Sq F value    Pr(>F)
Aglutinante            1 0.0049403 0.0049403 267.308 2.085e-11 ***
Formulacao             1 0.0000184 0.0000184   0.997    0.3329
Aglutinante:Formulacao  1 0.0022166 0.0022166 119.936 7.646e-09 ***
Residuals             16 0.0002957 0.0000185
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1
```

```
Mod1 <- aov(Resistência~Aglutinante*Formulacao)


Analysis of Variance Table

Response: Resistência
                      Df  Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
Aglutinante            1 2515.32 2515.32 36.8067 1.633e-05 ***
Formulacao             1 1472.76 1472.76 21.5508 0.0002711 ***
Aglutinante:Formulacao  1  100.02  100.02  1.4635 0.2439397
Residuals             16 1093.42   68.34
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1
```

```
Mod1 <- aov(Densidade_Energ~Aglutinante*Formulacao)


Analysis of Variance Table

Response: Densidade_Energ
                      Df Sum Sq Mean Sq  F value    Pr(>F)
Aglutinante            1 289402  289402 130.3880 4.210e-09 ***
Formulacao             1  15066   15066   6.7879   0.01913 *
Aglutinante:Formulacao  1  79378   79378  35.7632 1.923e-05 ***
Residuals             16  35513    2220
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1
```

ANEXO II – Gráfico de teste de médias com dois fatores

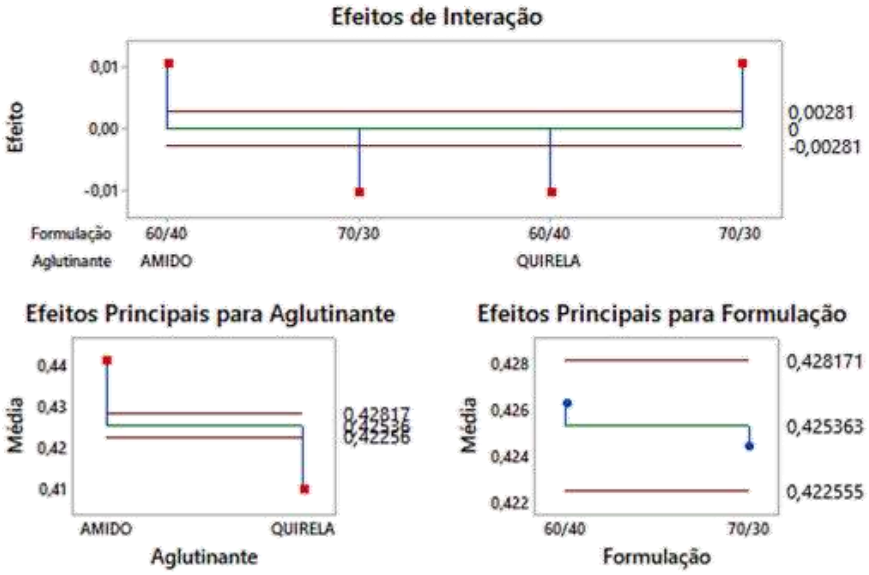

Figura 15. Análise de médias para densidade aparente (g/cm³)

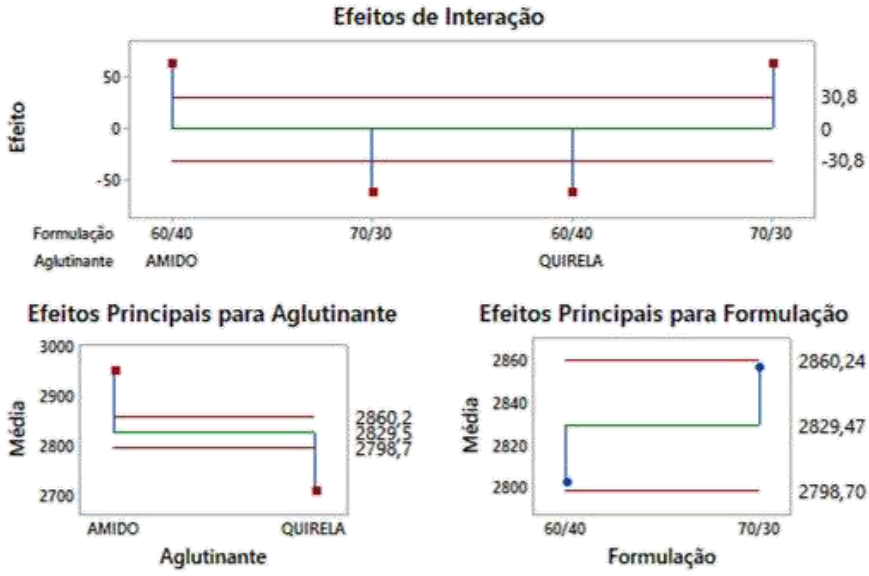

Figura 16. Análise de médias para densidade energética (cal/cm³)

ANEXO III – Gráficos de efeitos principais e interações para resistência

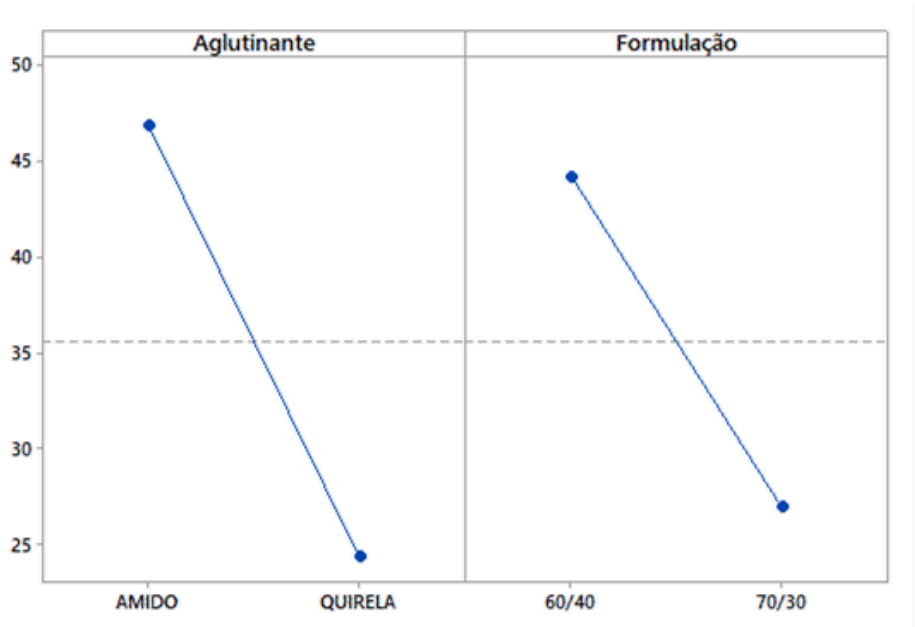

Figura 17. Efeitos principais para resistência mecânica (kgf)

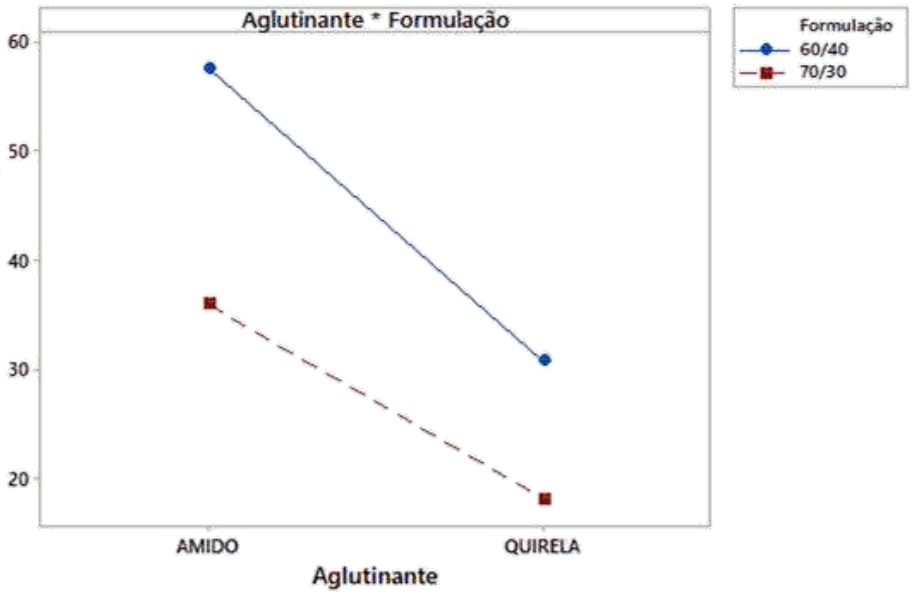

Figura 18. Interação entre aglutinante e formulação para resistência (kgf). No gráfico é possível verificar que não há interação entre os fatores analisados