

**GABRIEL REIS PORTILHO**

**RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS DE PAINÉIS MDF (*MEDIUM DENSITY FIBERBOARD*) POR MEIO DA TORREFAÇÃO E BRIQUETAGEM**

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

Orientador: Vinícius Resende de Castro

Coorientadora: Angélica de Cássia Oliveira  
Carneiro

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

P852r  
2021

Portilho, Gabriel Reis, 1991-  
Recuperação energética de resíduos de painéis MDF  
(medium density fiberboard) por meio da torrefação e  
briquetagem / Gabriel Reis Portilho. – Viçosa,  
MG, 2021.

1 dissertação eletrônica (64 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Vinícius Resende de Castro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Florestal, 2021.

Referências bibliográficas: f. 55-64.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2021.117>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Resíduos como combustível. 2. Biomassa. 3. Mobiliário.  
4. Energia - Fontes alternativas. I. Castro, Vinícius Resende de,  
1986-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência  
Florestal. III. Título.

CDO adapt. CDD 634.983981

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto CRB6 2523

**GABRIEL REIS PORTILHO**

**RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS DE PAINÉIS MDF (*MEDIUM DENSITY FIBERBOARD*) POR MEIO DA TORREFAÇÃO E BRIQUETAGEM**

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

APROVADA: 02 de agosto de 2021

Assentimento:

---

Gabriel Reis Portilho  
Autor

---

Vinícius Resende de Castro  
Orientador

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por iluminar meu caminho e me dar forças para superar todas as dificuldades.

Aos meus pais, Arthur e Filomena; ao meu irmão, Guilherme, e todos meus familiares por todo carinho e apoio.

A minha namorada, Joice por toda a força, carinho e apoio durante toda a duração do mestrado.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, por tudo que foi proporcionado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos. Ao CNPq e Fapemig pelo apoio financeiro para execução do projeto.

Ao Professor Vinícius Resende de Castro e à Professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, pela amizade, ensinamentos, oportunidades, confiança e toda a paciência durante todos esses anos.

Aos meus amigos do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira e do Laboratório de Propriedades da Madeira, que contribuíram de alguma forma para o sucesso deste trabalho.

A Marcenaria da UFV, pelo fornecimento dos resíduos de MDF.

Ao Departamento de Entomologia, por toda a assistência oferecida durante o uso do equipamento de raios X.

## RESUMO

PORTILHO, Gabriel Reis, M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2021. **Recuperação energética de resíduos de painéis MDF (*Medium Density Fiberboard*) por meio da torrefação e briquetagem.** Orientador: Vinícius Resende de Castro. Coorientadora: Angélica de Cássica Oliveira Carneiro.

Os painéis MDF (*medium density fiberboard*) são os mais produzidos e utilizados no Brasil, sendo esse, o maior responsável pela geração de resíduos nas indústrias de móveis. Tratamentos térmicos aliados a briquetagem podem viabilizar a utilização dos resíduos, visto que se tem um aumento significativo na densidade energética e redução volumétrica. Esse estudo teve como objetivo principal, produzir briquetes a partir de resíduos de painéis MDF revestidos e não revestidos torreficados para geração de energia. Os resíduos de painéis de MDF, com e sem revestimento de adesivo melamínico (BP), foram torreficados em um reator semicontínuo à temperatura de 300 °C por 20, 30 e 40 minutos. Os resíduos foram caracterizados quanto às propriedades físicas e químicas antes e após os tratamentos térmicos. O material foi briquetado e determinada a carga de ruptura, densidade aparente, perfil densitométrico por imagens de raios x, teor de umidade e combustibilidade. Os briquetes de MDF torreficados com tempo de residência de 40 minutos obtiveram melhores propriedades energéticas. Não foram detectadas quantidades significativas de metais pesados. Os briquetes produzidos com resíduos de MDF cru e revestidos torreficados por 40 minutos tiveram umidade de equilíbrio de 6,34%, carga de ruptura de 168 Kgf, densidade aparente de 1,030 g.cm<sup>-3</sup> e 4,36 Gcal.m<sup>-3</sup> de densidade energética. A densitometria de raios X foi eficaz pra avaliar a variabilidade de densidade aparente dos briquetes em imagens em 2D e 3D. A combustibilidade dos briquetes verificou temperaturas de pico de 583 e 605 °C para os briquetes de MDF revestidos e não revestidos torreficados por 40 minutos. A partir deste estudo, conclui-se que os briquetes produzidos a partir de resíduos de MDF revestidos torreficados são uma alternativa do ponto de vista tecnológico para o aproveitamento de resíduos de MDF da indústria moveleira para recuperação energética.

**Palavras-chave:** Aproveitamento energético. Densificação de biomassa. Resíduo moveleiro. Energia renovável.

## ABSTRACT

PORTILHO, Gabriel Reis, M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, August, 2021. **Energy recovery of waste from MDF (Medium Density Fiberboard) panels through torrefied and briquetting.** Adviser: Vinícius Resende de Castro. Co-adviser: Angélica de Cássica Oliveira Carneiro.

MDF panels are the most sought after and used in Brazil, being this one the most responsible for the generation of waste in the furniture industries. Thermal treatments combined with briquetting can enable the use of waste, since there is a significant increase in energy density and volumetric reduction. The main objective of this study was to produce briquettes from the residues of coated and uncoated MDF panels, torrefied for power generation. The residues of MDF panels, with and without melamine adhesive (BP) coating, were torrefied in a semi-continuous reactor at a temperature of 300 °C for 20, 30 and 40 minutes. The residues were characterized for physical properties and products before and after heat treatments. The material was briquetted and provided the breaking load, bulk density, densitometric profile of the briquettes by X-ray images, moisture content and combustibility. Torrefied MDF briquettes with a residence time of 40 minutes were the ones with the best energy properties. Important amounts of heavy metals were not detected. The briquettes obtained with raw and coated MDF panel waste, torrefied for 40 minutes had equilibrium moisture content of 6.34%, breaking load of 168 Kgf, bulk density of 1,030 g.cm<sup>-3</sup> and 4.36 Gcal.m<sup>-3</sup> of energy density. Ray densitometry was effective to assess the variability of apparent density of briquettes in 2D and 3D images. The combustibility of the briquettes alters the firing profile and the peak temperature is verified at 583 and 605 °C for coated and uncoated MDF briquettes torrefied for 40 minutes. From the study, it is concluded that the briquettes obtained from toasted coated MDF waste are an alternative from a technological point of view for the use of MDF waste from the furniture industry for energy recovery.

**Keywords:** Energy utilization. Biomass densification. Furniture waste. Renewable energy.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	7
2. OBJETIVOS .....	9
2.1. Objetivos específicos: .....	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	10
3.1 Resíduos de MDF ( <i>médium density fiberboard</i> ) da indústria moveleira .....	10
3.2 Emissão de poluentes pelo tratamento térmico dos resíduos de MDF .....	12
3.3 Torrefação de painéis de MDF .....	14
3.4 Briquetes de resíduos de MDF .....	17
3.5 Fatores que afetam a briquetagem .....	18
3.5.1 Dimensão das partículas .....	18
3.5.2 Densidade .....	19
3.5.3 Pressão e Temperatura de prensagem .....	19
3.5.4 Teor de umidade .....	20
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	20
4.1 Coleta e preparo do material .....	20
4.2 Torrefação das biomassas – tratamento térmico .....	21
4.3 Propriedades das biomassas .....	22
4.4 Produção dos briquetes com partículas <i>in natura</i> e torrificadas .....	23
4.4.1 Propriedades dos briquetes .....	24
4.5 Delineamento experimental e análise estatística dos dados .....	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	27
5.1 Caracterização da biomassa torrificada .....	27
5.2 Caracterização dos briquetes a partir dos resíduos de MDF torrificados .....	39
6. CONCLUSÃO .....	53
7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	55
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55

## 1. INTRODUÇÃO

A produção nacional de móveis gera cerca de 67,4 bilhões de reais anualmente e emprega direta e indiretamente mais de 260 mil pessoas (Associação Brasileira das Indústrias do Mobiliário - ABIMÓVEL, 2021). No ano de 2019, o Brasil produziu 8,2 milhões de m<sup>3</sup> de painéis de fibras de média densidade MDF (*medium density fiberboard*), com aumento de 2,8% na produção em relação ao ano anterior (Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ, 2020). Em paralelo a sua importância econômica, a indústria moveleira gera elevada quantidade de resíduos sólidos de diferentes naturezas durante o processo produtivo, sendo que 85% do total destes são de origem madeireira, compostos principalmente por serragem, maravalha, aparas e pó de madeira, além de outros resíduos de painéis MDF e MDP no momento da fabricação do mobiliário (COUTO e FRANCO, 2020; FARAGE et al., 2013).

Esses resíduos gerados refletem a situação de risco em relação aos problemas ambientais e sanitários, bem como os socioeconômicos, visto que as fábricas devem se adequar a legislação vigente para o controle e gerenciamento de seus resíduos (FARAGE et al., 2013; FERREIRA et al., 2015), sendo esta, a Portaria interministerial nº 274 de abril de 2019 da Política Nacional de Resíduos Sólidos que descreve a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei nº 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto nº 7.404, de 2010 (BRASIL, 2019).

Mas, muitas vezes há o descarte inadequado dos resíduos de painéis de madeira reconstituída, o que gera passivo ambiental, devido principalmente aos adesivos utilizados na sua confecção, ureia-formaldeído e melamina-ureia-formaldeído, além do revestimento com resina melamínica BP (baixa pressão), o qual predomina em marcenarias e empresas de móveis planejados (EMOBILE, 2020).

Algumas possibilidades foram lançadas visando o aproveitamento dos resíduos de painéis, tais como sua utilização como forragem de cama de frango em granjas, queima direta em fornos e caldeiras, e ainda como condicionador de solo (IRLE et al., 2019). No entanto, ressalta-se que pouco se sabe sobre a interação dos componentes não lignocelulósicos com os ambientes onde são utilizados, a exemplo, a queima direta desta biomassa, sem tratamento prévio, pois dependendo

da temperatura da câmara de combustão, esses podem liberar para a atmosfera formaldeído e VOC's - componentes orgânicos voláteis, como tolueno e limoneno, os quais podem causar síndromes respiratórias, além de serem considerados carcinogênicos (GHAFARI et al., 2016; DAZMIRI et al., 2018; CESPRINI et al., 2020).

Logo, buscam-se alternativas tecnológicas de conversão destes resíduos em energia, principalmente, os provenientes de painéis MDF, devido a sua crescente demanda no mercado tanto nacional quanto internacional, e conseqüentemente maior geração de resíduos (ATES et al., 2017; MORENO et al., 2017; MAYER et al., 2018). Dentre as rotas tecnológicas destaca-se a torrefação aliada a briquetagem, as quais têm como objetivo principal a concentração de carbono e aumento da densidade energética, respectivamente (MARTINEZ et al., 2017; MORENO et al., 2017).

A torrefação é um tratamento térmico realizado com temperaturas controladas e baixa disponibilidade de oxigênio, que visa concentrar carbono no material (NUCCHEN et al., 2014; CARDONA et al., 2019). Por outro lado, a briquetagem é um processo de densificação mecânica, cujo objetivo é transformar a biomassa em um biocombustível sólido, denso, com baixo teor de umidade e elevada densidade energética, possuindo formato regular, facilitando assim o manuseio, armazenamento e transporte, além de proporcionar uma queima homogênea nos fornos e caldeiras (SILVA et al., 2019; SANTOS et al., 2019).

A possibilidade de recuperação energética a partir da produção de biocombustíveis sólidos com resíduos de MDF possui perspectiva de aplicabilidade, uma vez que estes materiais possuem potencial energético similar a outras biomassas de origem agroflorestal, e que têm motivado estudos de viabilidade e aplicação em todo o mundo (WEBER; IWAKRI, 2015; CUNHA et al., 2018). Trata-se de uma alternativa que está em conformidade com a premissa de sustentabilidade ambiental e a política nacional de resíduos sólidos (BRASIL, 2019) e que tem valor econômico agregado, uma vez que estes resíduos representam custos operacionais de descarte, gestão e responsabilidade ambiental, bem como se caracteriza como biomassa lignocelulósica considerada fonte energética com grande potencial.

Neste contexto o objetivo principal deste estudo foi avaliar a recuperação energética de resíduos de painéis MDF por meio da torrefação e briquetagem, como

alternativas tecnológicas para o aproveitamento de resíduos de MDF da indústria moveleira.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo principal desta pesquisa foi realizar a recuperação energética de resíduos de painéis MDF por meio da torrefação e briquetagem.

### **2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Avaliar o efeito do tempo de residência do tratamento térmico nas propriedades físicas e químicas dos resíduos de painéis MDF, com e sem revestimento de resina melamínica BP;
- Obter o rendimento em massa e energia das biomassas torrificadas em função do tempo de residência aplicado;
- Avaliar a degradação térmica dos resíduos de painéis MDF tratados termicamente por meio das análises termogravimétricas;
- Verificar a influência do tempo de residência do tratamento térmico dos resíduos de painéis MDF na quantificação de metais pesados;
- Avaliar o efeito do tempo de torrefação nas propriedades físicas, químicas e mecânicas dos briquetes produzidos com os resíduos de painéis MDF;
- Obter a densidade energética dos briquetes em função dos tratamentos térmicos.
- Obter o perfil densitométrico dos briquetes por meio de imagens digitais de raios X.
- Avaliar o comportamento dos briquetes durante a combustão por meio do ensaio de combustibilidade.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Resíduos de MDF (*medium density fiberboard*) da indústria moveleira

Os painéis de fibras de média densidade (MDF) é confeccionados a partir de fibras da madeira, principalmente, eucalipto e pinus, homogêneo, de média densidade (entre 551 a 750 kg/cm<sup>3</sup>), boa usinagem, tendo sua maior aplicação na fabricação de móveis em substituição a madeira sólida (CUNHA et al., 2018). A produção brasileira de painéis de madeira reconstituída foi de 8,2 milhões de m<sup>3</sup> em 2019, com crescimento de 2,8% em relação ao ano anterior. Destes, 4,65 milhões de m<sup>3</sup> são de painéis de MDF (IBÁ, 2020).

No Brasil, o principal consumidor deste produto é a indústria moveleira, que absorve cerca de 90% da produção (IBÁ, 2020). O setor moveleiro é um importante e tradicional setor da indústria de transformação do Brasil, com grande importância para a economia brasileira, com intensiva geração de empregos (BRAINER, 2018), sendo que em 2020, o setor gerou 90,1 mil novos postos de trabalho e movimentou cerca de 7,4 milhões de reais (ABIMOVEL, 2021). Os polos moveleiros mais expressivos no Brasil são: Bento Gonçalves (RS) com cerca de 300 empresas, São Bento do Sul (SC) com cerca de 400 empresas, Araçongas (PR) com 270 empresas, Grande São Paulo (SP) com mais de 2000 empresas de pequeno e médio porte, Mirassol com 85 empresas (SP) com mais de 200 empresas, Ubá (MG) com mais de 350 empresas e Linhares (ES) com cerca de 130 empresas (SPEROTTO, 2018, EMOBILE, 2020).

As indústrias de transformação como marcenarias e empresas de móveis seriadados, que formam toda a cadeia do setor moveleiro, geram grande quantidade de resíduos no processo produtivo (BRAND et al., 2019). Apenas no polo moveleiro de Bento Gonçalves, estima-se que são geradas em média 331 toneladas mensais, o que representa de 10 a 15% do total em matéria prima de MDF (HILLIG et al., 2009). Quanto à destinação dos resíduos de MDF provenientes das indústrias moveleiras, a grande maioria da serragem (pó) e das aparas, são enviados para a queima em olarias, e uma parte é utilizada em aviários e caldeiras para geração de energia (HERSEN et al., 2019; SUHARDI et al., 2019).

No entanto, salienta que no Rio Grande do Sul, a combustão de resíduos do MDF e de madeiras tratadas ou revestidas é totalmente proibida, devido aos

possíveis prejuízos ao meio ambiente, conforme Diretriz técnica N°001/2019, de 18 de julho de 2019, artigo n°4 (FEPAM, 2019), que veta o uso como combustível de qualquer derivado de madeira, em forma de compensados, aglomerados, MDF, MDP e semelhantes, que foram tratados ou contaminados com outros produtos (tintas, antifúngicos, vernizes, adesivos, plásticos, entre outros). Inclusive proibindo a queima em churrasqueiras, fornos ou em qualquer lugar que possa ter contato com produtos alimentícios (FEPAM, 2019).

MORENO et al., (2017), destacaram que esses resíduos não deveriam ser usados em forração de aviários, como adubo de hortas e nem incinerados sem controle, devido à toxicidade das substâncias que os compõem, como a presença de formaldeído, tolueno e outros compostos orgânicos voláteis, além de metais contaminantes de solo e água, como cromo e cádmio.

Essas imposições se devem ao painel MDF conter cerca de 10% adesivos à base de formaldeído em sua composição, e ainda pelo fato das peças receberem algum tipo de pintura, revestimento, laminado plástico ou outro tipo de acabamento (MORENO et al., 2017; BRASIL, 2019).

No entanto, foi publicado o Portaria Interministerial n° 274 de 30 de abril de 2019 que institui o Programa Nacional de Resíduos Sólidos, o qual visa o incentivo e a busca por novas tecnologias para o uso dos resíduos para geração de energia, referida no § 1º do art. 9º da Lei n° 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto n° 7.404, de 2010 (BRASIL, 2019). A norma técnica NBR 16849 (2020), que estabelece os requisitos para aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos com ou sem incorporação de outros resíduos não perigosos, contempla os resíduos do processamento da madeira e da fabricação de painéis, mobiliário, papel e celulose, definindo-se, assim, uma base para o país na implantação de uma gestão correta dos resíduos sólidos (COUTO E FRANCO, 2020). Contudo, salienta que os aspectos legais e as restrições de ordem técnica devem ser ponderados, uma vez que os painéis de madeira revestidos não possuem legislações específicas para combustão em fornalhas de recuperação energética, em âmbito nacional (BRASIL, 2019; COUTO E FRANCO, 2020). Esse paradigma pode ser alterado através do projeto de lei 513/2020, que incentiva o tratamento térmico de resíduos sólidos que não forem reciclados ou processados por meio da compostagem, em face de impossibilidade técnica ou econômica.

Porém, a norma NBR 16849 (2020) possui limites mínimos de poder calorífico inferior da biomassa para uso em recuperação energética de  $\geq 2.390$  kcal/kg, e limites máximos de teores de metais pesados como cloro ( $Cl \leq 3,0\%$ ) e mercúrio ( $Hg \leq 0,5$  mg/kg).

Pesquisas que viabilizem a utilização dos resíduos de painéis MDF dentro das especificidades e normativas são emergenciais como incentivo à Política Nacional de Resíduos Sólidos e melhor destinação aos mesmos, de modo, a tornar mais competitiva à indústria de base florestal. Pesquisas sobre o uso desse resíduo como matéria prima para geração de energia tornam-se necessária, principalmente no que tange a reduzir os teores de componentes indesejáveis a valores mínimos aceitáveis, segundo as normas de resíduos sólidos para uso energético.

### **3.2 Emissão de poluentes pelo tratamento térmico dos resíduos de MDF**

As marcenarias e as fábricas de móveis em série acumulam resíduos dos painéis de MDF e MDP revestidos com pintura laqueada e crus até que sejam encaminhados para caldeiras de geração de vapor e energia ou depositados em áreas inadequadas (MAYER et al., 2018). A gestão dos resíduos desses painéis de MDF revestidos e crus na forma de aparas e serragem são de difícil destinação devido aos adesivos comumente presentes nos mesmos (MORENO et al., 2017; MAYER et al., 2018).

Nos painéis utilizados principalmente nas marcenarias e fábricas de móveis seriados (MDF e MDP), o adesivo ureia-formaldeído é o mais usado para confeccioná-los, pela eficácia e o baixo custo. Além do adesivo uréia-formaldeído utilizado na confecção dos painéis, é comum o uso do revestimento com resina melamínica aplicado sobre pressão (BP – baixa pressão de 30 kgf/cm<sup>2</sup> durante 1 minuto ou AP – alta pressão de 100 kgf/cm<sup>2</sup> durante 1 hora), acrescido de pintura laqueada ou filme de proteção (overlay) e papel decorativo no caso de MDF amadeirados em uma ou ambas as faces dos painéis de MDF, melhorando a usinagem, proteção e a aparência dos painéis, e conseqüentemente, a qualidade do produto final (MAYER et al., 2015; SOUZA et al., 2019).

O adesivo de uréia-formaldeído, caracterizado como um líquido viscoso, de cor branca, possui um pH entre 7,0 e 8,0, teor de sólidos de 60-65% (FIORONI et al., 2019). Já o adesivo de melamina usado no revestimento, é sintetizado a partir da ureia, sendo constituída por um trímico de cianamida, tendo cerca de 66% de sua composição formada por átomos de nitrogênio (WEBER; IWAKIRI, 2015). A queima destes produtos sem tratamento prévio pode resultar em emissões não controladas de formaldeído e VOC's - componentes orgânicos voláteis, como tolueno e limoneno, os quais são tóxicos a saúde humana (CESPRINI et al., 2020).

Os painéis revestidos com pintura laqueada possuem, de modo geral, a presença de dois produtos: 1º) o primer que é indicado para preparar os painéis antes do acabamento final com tinta, de uso interno, com alta cobertura dos poros, fácil lixamento e secagem rápida; e 2º) a tinta, sendo a de poliuretano (PU) mais utilizada pelos marceneiros. Segundo a ficha de informações de segurança de produtos químicos (FISPQ), este produto é inflamável, tóxico e carcinogênico devido a presença do metal cromo em sua composição, além de outros solventes, como xileno, butil glicol e acetato de etilglicol (MORENO et al., 2017). Portanto, a tinta é um componente que contribui negativamente para a deposição no meio ambiente desse tipo de resíduo (SABINO et al., 2021; VAN DEN BOSSCHE et al., 2021).

O revestimento também pode conter aditivos como agentes antimicrobianos e antichamas, definido principalmente por compostos baseado em isotiazolona, triclossano; orto-fenil fenol; piritonas de zinco; piritonas de sódio; azóis (propiconazóis); cloridrato de poli (hexametileno biguarnida); 3,4,4'-triclorocarbanilida; bário monohidratado; cobre ou zinco zeólito ou vidro amorfo em pó (LUIZ, 2010).

A constituição do revestimento, além da própria constituição dos painéis crus, geram resíduos que devem ser incinerados, em ambiente controlado, pois liberam na atmosfera formaldeído e VOC's (componentes orgânicos voláteis), como o tolueno e o limoneno, que podem causar graves problemas respiratórios, além de serem considerados carcinogênicos (PIRAYESH et al., 2013; STEFANOWSKI et al., 2016; CASTRO et al., 2021). Diversos componentes químicos encontradas em tintas e vernizes, como o xileno, possuem alta volatilização e baixa temperatura de fulgor (<37 °C), o que pode favorecer a volatilização desses materiais para o ambiente (WANG et al., 2020; VAN DEN BOSSCHE et al., 2021)

O método de torrefação aplicado aos resíduos dos painéis MDF pode eliminar parcialmente gases derivados de compostos de nitrogênio, como HCN e NO<sub>x</sub> durante a combustão; e NH<sub>3</sub>, HNCO e HCN durante a pirólise (GIRODS et al., 2008). Estes compostos nitrogenados podem ter sua origem na constituição de vernizes e adesivos, como uréia, melanina e formaldeído, comuns nos resíduos de painéis de madeira (GIRODS et al., 2008; DEBAL et al., 2014). O tratamento térmico, realizado com temperatura controlada e baixa disponibilidade de oxigênio, visa concentrar carbono e conseqüentemente acumular mais energia contida na biomassa (HE et al., 2018).

A condensação dos gases da torrefação é outro processo promissor para atingir a produção de produtos químicos de alto valor agregado como compostos fenólicos e derivados, além de compostos nitrogenados e produtos que podem ser misturados com o combustível para veículos automotores. O rendimento e a natureza dos produtos de pirólise dependem do tipo de biomassa, projeto do reator, temperatura, tempo de residência dos gases, tamanho das partículas, etc (MAYER et al., 2018, WANG et al., 2020).

O baixo custo e ampla disponibilidade de resíduos de MDF torna a pirólise lenta/torrefação uma opção viável (CZERNIK et al., 2004; EFFENDI et al., 2007). Este tipo de resíduo tem potencial para gerar produtos líquidos (bio-óleo), sólidos (pellets, briquetes e carvão ativado) e gasosos (gaseificação). O líquido pirolítico é uma mistura complexa, principalmente, de compostos oxigenados, como fenóis, ácidos orgânicos, cetonas, aldeídos, açúcares anidro, entre outros. Em geral, é necessário refinar o bio-óleo para torná-lo apropriado como fonte de combustível, aditivos de combustível ou produtos químicos, por meio de métodos físico-químicos e/ou processos catalíticos (BRIDGWATER, 2012; VICHAPHUND et al., 2014; ENNAERT et al., 2016).

### **3.3 Torrefação de painéis de MDF**

A torrefação pode ser definida como uma pirólise parcial, onde a biomassa é submetida à temperatura constante, geralmente de 200 a 300 °C, com restrição de oxigênio e tempos de residência menores quando comparados a carbonização (VAN DER STELT et al., 2011; NHUCHHEN et al., 2014; WANG et al., 2020). O material sólido resultante pode ser usado diretamente na queima direta para produção de

energia térmica ou como insumo para gaseificação, bem como para produção de *pellets* e briquetes (CARASCHI et al., 2019). Nessas condições ocorre a evaporação da água e redução dos teores de voláteis, principalmente, devido a degradação das hemiceluloses da biomassa, reduzindo o teor de oxigênio do produto sólido final, concentrando os constituintes mais energéticos da biomassa, principalmente a lignina (BACH et al., 2019; BARSKOV et al., 2019; HUANG et al., 2020).

A torrefação dos resíduos de MDF em geral, possui as mesmas características que a torrefação de resíduos de madeira e de outras biomassas lignocelulósicas (ANDRADE et al., 2017). As principais características de interesse energético que a biomassa torrificada tem em relação à biomassa *in natura* são:

- Maior valor energético: a torrefação degrada os constituintes menos energéticos da biomassa (principalmente as hemiceluloses) reduzindo a quantidade de oxigênio e concentrando os constituintes com maiores teores de carbono, como a lignina, que possuem em média  $4800 \text{ kcal.kg}^{-1}$  (DAI, et al., 2019; CAHYANTI et al., 2019);

- Menor dureza: a torrefação destrói parcialmente a estrutura fibrosa da biomassa, diminuindo sua tenacidade e deixando-a mais friável. Há uma redução do consumo de energia necessária para a moagem da biomassa, além de uma melhor sobreposição e compactação das partículas, aumentando a densidade a granel do material (DAI, et al., 2019; CAHYANTI et al., 2019);

- Menor teor de umidade: além de reduzir a umidade da biomassa, a torrefação diminui a higroscopicidade do material. O tratamento aumenta a concentração de lignina, reduzindo a relação constituintes hidrofílicos/constituintes hidrofóbicos. Assim, reduz-se a capacidade da biomassa em absorver umidade do ambiente (DAI et al., 2019; CAHYANTI et al., 2019);

- Maior durabilidade: a composição química da biomassa torrificada faz com que ela seja menos atrativa aos microrganismos decompositores, diminuindo a atividade biológica e aumentando a vida útil de armazenamento sem degradação desse combustível (CASTRO et al., 2019).

A procura de novos tipos de biomassa, como os resíduos de MDF cru e revestido, como fonte de energia tem se intensificado, devido à preocupação com a sustentabilidade e mudanças climáticas, além da crescente instabilidade no preço dos combustíveis fósseis. O processo de pirólise do MDF pode ser dividido em quatro estágios, correspondentes à degradação da resina, hemicelulose, celulose e

lignina, respectivamente. Em um estudo sobre a cinética da pirólise de painéis MDF, Pan et al. (2018), observou as temperaturas iniciais de degradação térmica de cada componente do MDF, 225 °C para as resina, 280 °C para as hemicelulose, 360 °C para celulose e 400 °C para lignina. Dessa forma, o estudo de tratamentos e a cinética de decomposição é conveniente para obter uma combustão mais eficiente, uma vez que, é amplamente conhecido que a combustão incompleta desses materiais é uma importante fonte de algumas emissões tóxicas, como compostos orgânicos voláteis (VOCs) e aromáticos policíclicos hidrocarbonetos (PAHs) (GIRODS et al., 2008; MORENO et al., 2017).

Além disso, os gases gerados pela torrefação dos resíduos de MDF revestidos e não revestidos devem ser queimados em ambiente controlado, em sistema fechado, sem emissão ao ambiente, devido a toxicidade dos gases gerados durante a queima (GIRODS et al., 2008; DEBAL et al., 2014). Estes gases podem ser condensados e coletados para a produção de variados produtos químicos de alto valor agregado (FERREIRA et al., 2015; MORENO et al., 2017; MAYER et al., 2018) ou ainda canalizados para a queima em queimadores.

Resíduos de MDF cru e revestidos utilizados para confecção de móveis contêm adesivos, resinas, tintas, vernizes e óleos, que alteram o comportamento da degradação térmica (CESPRINI et al., 2020). A temperatura de decomposição diminui devido ao efeito catalítico de alguns sais inorgânicos presentes nesses resíduos (KHELFA et al., 2013; MORENO et al., 2017) ou pode aumentar devido à presença de resinas, como ureia formaldeído (UF), melamina formaldeído (MF) e fenol formaldeído (FF) (MORENO et al., 2017).

O aumento da temperatura e do tempo de torrefação, bem como a redução do teor de umidade inicial da matéria-prima, tem efeitos significativos na estrutura e composição da biomassa. Logo, estas mudanças de estrutura permitem que os índices de qualidade para o uso como combustível sólido de biomassa torrificada sejam maiores que a matéria *in natura* (SILVA et al., 2019).

A torrefação pode melhorar as características para uso energético dos resíduos de MDF provenientes da indústria moveleira e marcenarias. Conforme estudo realizado por ANDRADE et al., (2017), em que os autores encontraram valores de poder calorífico até 20% mais alto em partículas de MDF torrificadas à temperatura de 280 °C por 60 minutos. A torrefação aumenta o teor de carbono devido ao acúmulo de lignina na biomassa, que possui uma estrutura composta por

grupos fenilpropano unidos por ligações C–C e C–O–C e um arranjo estrutural denso (CASTRO et al., 2021). Os maiores teores de carbono e hidrogênio são importantes para características energéticas da biomassa para combustão, pirólise ou gaseificação, pois otimizam a geração de energia devido o incremento no poder calorífico.

Para o setor industrial que requer energia térmica em seus processos, a adoção da torrefação de resíduos de MDF pode representar uma alternativa para ganhos em seus processos, pois teria como matéria-prima um produto mais homogêneo em estrutura, menos higroscópico, mais energético (GRASSMANN et al., 2016). Além disso, a torrefação das partículas de diferentes tipos de resíduos diminuiu as diferenças entre os tipos de biomassa lignocelulósica, sendo um processo para melhorar a homogeneidade da matéria-prima (ARAÚJO et al., 2016).

### **3.4 Briquetes de resíduos de MDF**

A briquetagem é um processo que consiste em compactar biomassa lignocelulósica com o objetivo de transformar partículas com granulometria irregular em sólidos geométricos de alta densidade (SANTOS et al., 2019; SILVA et al., 2019). Dessa forma, trata-se de uma alternativa empregada dentro do meio agroflorestal que visa dar destinação aos resíduos com grande potencial de queima e geração de energia (GOUVEA et al., 2017). A produção de briquetes é uma eficiente forma de concentrar a energia disponível na biomassa, no entanto, sua qualidade pode ser afetada pela pressão e temperatura de compactação, bem como pelo tamanho das partículas e umidade do material (CHAI SUWAN et al., 2020).

O processo de briquetagem consiste na trituração e moagem das biomassas para que estejam compreendidas entre 5 e 10 mm de comprimento e largura. Depois de classificado, o material é compactado em altas pressões e temperatura fixa, usualmente entre 100 a 120 °C (HARYADI et al., 2019). O aumento da temperatura no procedimento é importante para a plasticização da lignina que atua como aglutinante. Por isso, faz-se necessário que a biomassa esteja num teor de umidade de até 12% (base seca) para que ocorra melhor a transferência de calor entre as partículas (BRAND et al., 2019; SANTOS et al., 2019).

Resíduo de MDF torreficado pode ser utilizado como material lignocelulósico para a produção de *pellets* e briquetes. Em estudo de CUNHA et al. (2018), a

torrefação de resíduos de MDF gerou *pellets* com densidade energética comparável aos *pellets* comerciais de eucalipto. GOUVEA et al. (2017) produziram briquetes de resíduo de MDF *in natura* com 3,93 Gcal.m<sup>-3</sup> de densidade energética, média comparável à briquetes produzidos com outras biomassas, como resíduos de madeira de eucalipto e pinus. Esta variável é produto da densidade do material compactado e do poder calorífico, assim, quanto maior o poder calorífico, mais energia por unidade de volume e conseqüentemente melhor o aproveitamento energético do material (QUIRINO et al., 2012).

No Brasil, não há normas específicas para análise de propriedades de briquetes. O principal movimento para normatização de briquetes no país é do Serviço Florestal Brasileiro (SFB/MMA) que propõe classes de qualidade para briquetes, baseadas no respectivo teor de cinzas, no tipo de utilização (industrial ou doméstica), na origem dos resíduos e no processo de fabricação. No entanto, essas normas ainda são uma proposta e, caso se tenha como meta o mercado externo, as normas internacionais devem ser consideradas (RANGEL et al., 2018).

No estudo da viabilidade econômico-financeira da implantação de uma central de tratamento dos resíduos gerados pelas fábricas de móveis do Polo Moveleiro de Ubá, realizado por Pires et al. (2008), prevendo a comercialização dos briquetes, identificaram viabilidade financeira para o empreendimento. A rentabilidade foi de 4,87 %, a TIR de 58,62 %, maior que a taxa de desconto (10%), validando a viabilidade econômica. Outro indicador econômico observado nesse estudo foi o VPL de 8.954.390,66 reais, na qual indica o lucro do negócio, corrigido pelas taxas de juros em um horizonte de dez anos, uma vez que o VPL é maior que zero, demonstrando a viabilidade do projeto (PIRES et al., 2008).

### **3.5 Fatores que afetam a briquetagem**

#### **3.5.1 Dimensão das partículas**

A dimensão das partículas que constituem os briquetes está diretamente ligada à sua durabilidade, uma vez que pedaços maiores de resíduo da biomassa podem ocasionar pontos de fraturas no produto final (SETTER et al., 2021).

Os resíduos em uma escala menor, como o caso do MDF triturado e classificados podem ser usados diretamente na compactação, enquanto que

pedaços maiores deste mesmo tipo de material devem ser reduzidos, peneirados e classificados, a fim de gerar maior coesão entre os materiais durante a briquetagem (MARTINEZ et al., 2017).

Dessa forma, quanto menor for o resíduo, melhor será o produto final da compactação, pois haverá maior coesão entre a biomassa devido a uma maior área superficial (BRANDI et al., 2017; HARYADI et al., 2019).

### **3.5.2 Densidade**

A briquetagem diminui drasticamente o volume dos resíduos. Essa é uma característica muito importante para biomassas de menor densidade, mas de alto valor energético, como o resíduo de MDF cru e revestido. Outro fator importante inerente à densidade do material a ser briquetado é a menor resistência à compactação, gerando um produto final muito mais resistente e durável (QUIRINO et al., 2012; MARTINEZ et al., 2021).

A densidade da biomassa é um fator muito importante, pois determina suas condições de armazenamento e transporte, além de estar diretamente ligada ao conceito de densidade energética, que se refere à quantidade de energia que está sendo transportada por unidade de volume (HARYADI et al., 2019; CABAN et al., 2021).

### **3.5.3 Pressão e Temperatura de prensagem**

A compactação da biomassa na indústria geralmente ocorre com pressões superiores a 1200 Psi. O processo de compactação eleva a pressão e temperatura na qual as biomassas são submetidas, geralmente acima de 100 °C, temperatura na qual se inicia a plasticização da lignina contida em biomassas lignocelulósicas (BRAND et al., 2019).

A plasticização da lignina é um importante fator na briquetagem, uma vez que a lignina funciona como um aglutinante presente na biomassa, dispensando o uso de aglutinantes naturais ou sintéticos adicionais. A lignina do pinus e do eucalipto possuem diferenças estruturais e em quantidade, cerca de 28-32% para as fibras de pinus e 20-25% para fibra de eucalipto, dessa forma influenciando nas características finais dos briquetes (GOUVEA et al., 2017).

Características desejáveis nos briquetes como maior densidade energética e maior resistência mecânica estão ligadas intrinsecamente a estes dois fatores. Pois quanto maior a pressão de compactação, maior será a densidade aparente do produto final (MARTINEZ et al., 2021).

### **3.5.4 Teor de umidade**

O teor de umidade da biomassa adequado é muito importante para uma compactação adequada. Dependendo da biomassa, é necessário que seu teor de umidade esteja compreendido entre 8 e 15% (base seca). A presença de água no material favorece a transferência de calor, promovendo a plasticização da lignina e dessa forma, aumentando a coesão entre a biomassa durante a briquetagem (ACHARYA et al., 2015).

A biomassa mais seca (abaixo de 8%) gera briquetes com baixa estabilidade dimensional, que possui pouca resistência mecânica, se desfazendo quando armazenado ou transportado. Em contrapartida, valores elevados de umidade, podem provocar rachaduras e fissuras internas nos briquetes ocasionados pela geração e expulsão de vapor de água interna do briquete (CABAN et al., 2021).

## **4. MATERIAL E METÓDOS**

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) e no Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM), vinculados ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (DEF/UFV), no campus de Viçosa, MG.

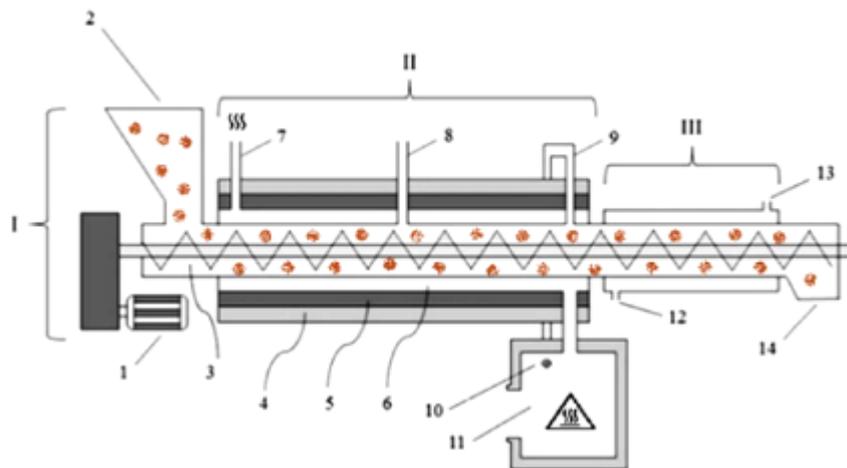
### **4.1 Coleta e preparo do material**

Dois resíduos sólidos da indústria moveleira foram utilizados: a) resíduos de painéis MDF com revestimento de resina melamínica de baixa pressão (BP) dupla face na cor branca fosca; e b) resíduos de painéis MDF sem revestimento (cru). Os resíduos dos painéis de MDF foram doados pela marcenaria da UFV, pertencente ao Departamento de Engenharia Florestal.

Para reduzir a heterogeneidade quanto a granulometria do material para proceder o tratamento térmico, os resíduos foram seccionados nas dimensões de 1,8 cm x 1,8 cm x 1,8 cm e secos em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de  $103 \pm 2$  °C até alcançarem massa constante, ou seja, 0% de umidade na base seca. Foram utilizados aproximadamente 3 kg de biomassa (resíduo) para cada tratamento térmico.

#### 4.2 Torrefação das biomassas – tratamento térmico

A torrefação foi conduzida em reator de fluxo contínuo desenvolvido no LAPEM (SILVA et al., 2018). Na Figura 1 é apresentado o esquema geral do reator, o qual utiliza parte dos gases resultantes da degradação térmica da biomassa como fonte de energia suplementar para o processo. A estrutura primária do reator possui, essencialmente, três sistemas que facilitam a torrefação: (I) transporte; (II) aquecimento; e (III) resfriamento. O primeiro sistema movimenta a biomassa para o processo de homogeneização, que pode ser classificado como contínuo, intermitente ou misto. O segundo sistema produz e transfere calor para a biomassa sob condições controladas para aquecimento direto ou indireto. O terceiro sistema libera a biomassa torreficada dentro dos limites de temperatura segura.



**Figura 1** – Vista lateral do reator de fluxo contínuo utilizado para tratamento térmico das biomassas, onde: I - Sistema de transporte; II - Sistema de aquecimento; III - Sistema de resfriamento; 1 - motor; 2 - entrada de biomassa; 3 - rosca sem-fim; 4 - camada isolante; 5 - camada refratária; 6 - fluxo de gás de aquecimento; 7 - saída de gás de aquecimento; 8 - primeiro chaminé; 9 - segundo chaminé; 10 - conexão do chaminé com o queimador; 11 - queimador; 12 - abastecimento de água; 13 - saída de água; 14 - saída da biomassa torreficada. Fonte: SILVA et al., 2018.

Para cada torrefação, foi aplicada a temperatura de 300 °C e tempos de 20, 30 e 40 minutos. Estes parâmetros foram definidos a partir dos melhores resultados obtidos por Castro et al., (2021) em um estudo de torrefação de resíduos de painéis MDF. O material foi pesado antes e depois do tratamento térmico, a fim de se conhecer a perda de massa no processo e determinar o rendimento gravimétrico, que é a massa de material final (torrificado) em relação à massa inicial, dado em porcentagem.

O rendimento em energia de cada tratamento foi obtido dividindo-se o poder calorífico superior (PCS) dos resíduos torrificados pelo valor médio do PCS dos resíduos *in natura*, multiplicado pelo rendimento em massa.

### 4.3 Propriedades das biomassas

As propriedades das biomassas foram obtidas antes e após os tratamentos térmicos.

O teor de extrativos foi determinado em duplicata, de acordo com a norma TAPPI 204 cm-97 (1997), trocando etanol/benzeno por etanol/tolueno. O teor de lignina insolúvel foi determinado em duplicata pelo método Klason (Tappi T 222 om-02, 2002). A lignina solúvel foi determinada por espectrometria (TAPPI T 249 cm-00, 2002). A soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel permitiu a obtenção do teor de lignina total. O teor de holocelulose (celulose e hemicelulose) foi determinado pela soma do teor de extrativos, lignina total e teor de cinzas, diminuído em 100.

O rendimento gravimétrico da torrefação foi calculado dividindo-se a massa seca das amostras de resíduos de painéis MDF torrificadas pela massa seca das amostras *in natura*. O rendimento energético avalia a energia retida no material, que não foi perdida juntamente com a massa volatilizada. Este rendimento foi calculado pela relação entre o produto da massa pelo poder calorífico superior antes e após a torrefação.

Para determinar a umidade de equilíbrio higroscópico, as amostras foram colocadas em uma câmara climática a 20 °C e 65% de umidade relativa do ar até atingir massa constante. O teor de umidade foi calculado, em base seca, seguindo as normas da ABNT NBR 9484 (2011).

A densidade aparente foi determinada em conformidade com a norma ABNT NBR 9165 (2015). Os corpos de prova foram pesados e medidos após o período de climatização, com teor de umidade de 12%.

O poder calorífico superior foi obtido de acordo com a EN 14918 (DIN, 2010a), utilizando uma bomba calorimétrica adiabática IKA300®.

A análise química imediata foi determinada de acordo com a norma NBR 8112 (ABNT, 1986), para a determinação de materiais voláteis, teor de cinzas e teor fixo de carbono, em base seca.

Os elementos carbono, nitrogênio, hidrogênio e enxofre foram determinados de acordo com a norma EN 15104 (DIN, 2011a), pelo equipamento Vario Micro Cube CHNS, Elementar®. O valor do oxigênio foi obtido pela soma dos teores de carbono, nitrogênio, hidrogênio, enxofre e cinzas diminuídos de 100, conforme a norma EN 15296 (DIN, 2011b).

A análise termogravimétrica das biomassas foi realizada utilizando o equipamento termogravimétrico da empresa *Shimadzu*. As análises foram realizadas sob atmosfera de gás nitrogênio, com uma vazão constante de 50 ml.min<sup>-1</sup>. Os termogramas foram obtidos a partir da temperatura ambiente, em torno de 25 °C, até a temperatura máxima de 500 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/minuto.

Para obtenção do teor de metais pesados presentes nos resíduos de painéis MDF, inicialmente, efetuou-se a análise química específica de Ni, Cu, Pb, Cd, Fe, Zn, Cr, As e S presentes nos extratos obtidos por Mehlich-1, por EDTA e solúveis em água deionizada de acordo com o manual de métodos de análise do solo (EMBRAPA, 1997). E para a determinação dos elementos utilizou-se um espectrômetro de emissão atômica com plasma de argônio acoplado (ICP-AES), Perkin Elmer – Optima 3300 DV<sup>TM</sup> Spectrometer, com o emprego das linhas espectrais: Ni-231,604 nm, Cu-324,752 nm, Pb-220,353 nm, Cd-214,440 nm, Fe-239,562 nm, Zn-213,857 nm, Cr-267,716 nm, As-193,696 nm e S-182,263 nm. As análises de metais pesados foram realizadas pelo laboratório de Análise dos Solos da Universidade Federal de Viçosa.

#### **4.4 Produção dos briquetes com partículas *in natura* e torrificadas**

As amostras de biomassa *in natura* e torrificadas foram moídas em um moinho de facas do tipo Wiley com peneira de abertura de 2 mm, classificadas em

peneiras de 40 e 60 mesh. A granulometria das partículas das amostras variou de 0,5 a 2 mm.

Foram confeccionados 15 briquetes para cada análise, com 17 g de cada biomassa (em equilíbrio higroscópico) em briquetadeira de laboratório Lippel LB-32, à temperatura de 120 ° C e pressão de compactação de 6,21 Mpa. O período de prensagem foi de cinco minutos, seguido de seis minutos de resfriamento na briquetadeira. Não foram adicionados aditivos ao processo. Estes parâmetros foram definidos a partir dos melhores resultados obtidos por Portilho et al., (2020) em um estudo com briquetes com biomassas de bagaço de cana-de-açúcar, resíduos de poda de café e serragem de *eucalyptus* e *pinus*.

#### 4.4.1 Propriedades dos briquetes

Para determinação da umidade de equilíbrio higroscópico, os briquetes foram levados a uma câmara climática a temperatura de 20 °C e 65 % de umidade relativa do ar, obtendo a massa final de equilíbrio. Posteriormente foi obtido o teor de umidade, base seca, de acordo com a norma EN 14774-2 (DIN, 2009).

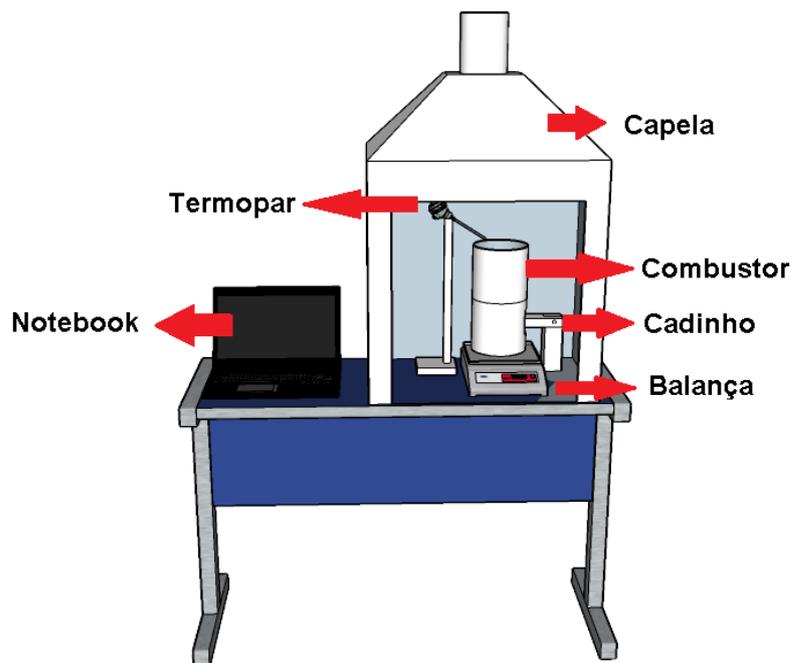
A densidade relativa aparente ( $\text{Kg/m}^3$ ) foi determinada conforme o método descrito por Vital (1984), por meio da imersão em mercúrio. Foram realizadas dez determinações com posterior obtenção da densidade aparente por meio de média aritmética.

Para a obtenção dos perfis de densidade aparente dos briquetes foi utilizado o equipamento de raios X digital modelo Faxitron LX-60, a partir de amostras com 2 milímetros de espessura dos briquetes, de acordo com Quirino et al., (2012) adaptado.

A densidade energética foi obtida a partir da multiplicação do poder calorífico útil pela densidade aparente dos briquetes, em  $\text{Gcal/m}^3$ .

A carga de ruptura dos briquetes foi determinada em uma máquina de ensaios mecânicos universal modelo Contenco®, os quais foram comprimidos continuamente a velocidade constante de  $4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  até a ruptura. Os dados foram obtidos com auxílio do software Pavitest acoplado ao equipamento. Utilizou-se a metodologia adaptada da norma ABNT NBR 11093-9 (2009), uma vez que não existe norma específica para briquetes.

A determinação do perfil de combustão dos briquetes foi realizada conforme Martinez (2021), em um recipiente metálico de inox com uma grade suspensa, onde a queima foi realizada em leito fixo (Figura 2). Abaixo do leito, foi inserido em um cadinho de porcelana, suspenso, contendo 15 gramas de álcool para a ignição. Este conjunto foi posicionado sob uma balança modelo Shimadzu UX200H, e um termopar Ecil WK-2 foi inserido na parte superior, acima do local onde ocorreria a queima da biomassa, ligado a um termômetro de contato e infravermelho Fluke 568, com o programa coleta dos dados de temperatura no notebook, em uma capela que permaneceria ligada durante todo o teste.



**Figura 2.** Esquema do teste de combustibilidade.

No leito de queima foram posicionados três briquetes. A massa e temperatura inicial foram verificadas no tempo zero, a ignição foi realizada com a queima do álcool. Os valores de temperatura foram coletados a cada 5 segundos e de massa a cada 30 segundo. O teste era finalizado quando a temperatura atingisse valores abaixo de 100 °C. Antes da combustão, foi determinado o teor de umidade, base seca, dos briquetes em estufa a  $100 \pm 3$  °C, até massa constante. Foram feitas duas repetições para cada tratamento.

#### **4.5 Delineamento experimental e análise estatística dos dados**

Para avaliar o efeito da torrefação na qualidade da biomassa para uso energético e também nas propriedades dos produtos densificados foi instalado um experimento a partir de um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial, com três tempos de residência de torrefação (*In natura*, 20, 30 e 40 minutos) e dois tipos de biomassa (MDF com e sem revestimento), em quatro repetições.

Para verificar o efeito dos tratamentos antes e após a torrefação, foram realizadas análises de variância e, posteriormente, aplicados os testes de médias de Tukey, ao nível de 95% de probabilidade. A avaliação dos resíduos dos modelos foi efetuada com base no Teste Shapiro Wilk (normalidade) e o Teste Durbin-Watson (ausência de autocorrelação serial).

Para comparar o resultado de densidade aparente obtido na densitometria de raios X com a densidade aparente obtida pelo teste gravimétrico, foi utilizado o Teste t de *Student*, ao nível de significância de 95% objetivando verificar se as duas formas de obtenção de densidade de briquetes foram estatisticamente equivalentes.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Caracterização da biomassa torrificada

Os valores médios dos teores de holocelulose, lignina total e extrativos totais dos resíduos de painéis MDF em função dos tratamentos são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Teor de holoceluloses, lignina total e extrativos totais dos resíduos de MDF sem (MDF cru) x com revestimento (MDF rev.) e *in natura* x torrificados

Tratamento	Holocelulose (%)			
	<i>in natura</i>	20 minutos	30 minutos	40 minutos
MDF <sub>(cru)</sub>	55,28 Bb	56,85 Bb	52,22 Bab	51,35 Ba
MDF <sub>(rev.)</sub>	44,89 Ac	44,93 Ac	40,82 Aab	37,50 Aa
Lignina total (%)				
MDF <sub>(cru)</sub>	32,06 Aa	32,83 Aa	40,23 Ab	42,36 Ab
MDF <sub>(rev.)</sub>	39,69 Ba	41,96 Ba	47,47 Bb	52,02 Bc
Extrativos totais (%)				
MDF <sub>(cru)</sub>	12,66 Ad	10,32 Ac	7,54 Ab	6,27 Aa
MDF <sub>(rev.)</sub>	15,42 Bd	13,11 Bc	11,70 Bb	10,48 Ba

Médias seguidas horizontalmente pela mesma letra minúscula ou verticalmente pela mesma letra maiúscula não diferem pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ) para uma mesma variável.

O teor de holocelulose reduziu somente após trinta minutos de exposição da biomassa à temperatura de 300 °C, e os tratamentos com MDF revestidos obtiveram os menores teores. Os teores de holocelulose no tratamento de 40 minutos de torrefação dos resíduos de MDF cru e revestidos reduziram 7,65 e 16,43%, respectivamente. O tempo de residência dos resíduos de MDF dentro do reator de torrefação possui influência direta no teor de holocelulose, em razão da maior taxa de transferência de calor do reator para a biomassa da região periférica para o interior (centro) da biomassa, dessa forma, as holoceluloses são volatilizadas (WANG et al., 2020).

Os menores teores de holoceluloses observados no MDF revestido se devem, provavelmente, a menor presença dos carboidratos e em detrimento aos maiores valores de extrativos e inorgânicos presentes, oriundo, principalmente, do adesivo e tintas utilizadas nos revestimentos (WEBER; IWAKIRI, 2015). Dessa forma, a presença desses constituintes contribui para a diminuição proporcional observada do conteúdo de holocelulose desse resíduo (TOMELERI et al., 2021).

Para os teores de lignina total, os tratamentos *in natura* e torreficados de resíduo de painéis revestidos foram superiores aos obtidos na biomassa sem revestimento. De modo geral, observa-se uma tendência de aumento no teor de lignina com o aumento do tempo de residência de torrefação. O teor de lignina aumentou proporcionalmente em função da degradação da holocelulose e extrativos, uma vez que a lignina é o composto mais estável termicamente, tendo baixa taxa de perda de massa em temperaturas inferiores a 300 °C, utilizada neste estudo (WATERS et al., 2017; CASTRO et al., 2021).

Os teores de lignina total foram 7,58; 21,76; 15,25 e 18,60 % maiores nos resíduos de MDF revestido em relação aos obtidos nos MDF cru, em todos os tempos de residência, respectivamente (Tabela 1). No entanto, acredita-se que esses valores podem estar superestimados, visto que se aplicou o mesmo método analítico para ambas as amostras. O método utiliza a hidrólise com ácidos fortes para separar a lignina, logo, provavelmente, outros componentes químicos oriundos do adesivo e do revestimento de resina melamínica podem não ter sido hidrolisados na solução e contribuirá para a superestimação da massa retirada no cadinho, na quantificação da lignina insolúvel (CRUZ et al., 2019). Além disso, o material revestido *in natura* teve um teor de lignina total alto para as médias encontradas nas fibras de *Pinus spp.* (cerca de 25-30%), a qual deu origem ao painel de MDF revestido (BRITO et al., 2008; BREBU & VASILE, 2010).

Quanto ao teor de extrativos totais observa-se que houve redução significativa à medida que aumentou o tempo de residência de torrefação dos resíduos de painéis MDF revestidos e cru (Tabela 1).

A redução no teor de extrativos com o aumento do tempo de torrefação se deve a menor estabilidade térmica desses constituintes, sendo degradado juntamente com as hemiceluloses em temperaturas mais baixas. Dessa forma, a diminuição gradual do teor de extrativos com tempos de torrefação maiores está associada à degradação de compostos polares e polioses de baixa massa molecular como ácidos graxos, álcoois, terpenos, resinas, ceras e diversos outros compostos orgânicos (POLETTTO et al., 2012; VALETTE et al., 2017). Os adesivos presentes no MDF e nas tintas do revestimento também são volatilizados quando expostos à temperatura de torrefação (KABOORANI & RIEDL, 2011; CASTRO et al., 2021). A degradação desses materiais é, ambientalmente importante, porque gases tóxicos compostos de nitrogênio, como HCN, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, HNCO, que seriam liberados na

atmosfera no momento da queima, também são removidos parcialmente durante a torrefação (DEBAL et al., 2014).

Independentemente do tempo de residência para torreficar as biomassas, verificou-se que o teor de extrativos nos resíduos de MDF revestido foram superiores em relação ao MDF cru (Tabela 1). Tal resultado se deve aos componentes químicos presentes no revestimento, tais como xileno, glicol e acetato de etilglicol, os quais podem superestimar os valores de extrativos e voláteis desse tipo de resíduo (CASTRO et al., 2021, SABINO et al., 2021), que estão presentes nas tintas, vernizes e adesivos.

Os valores médios de rendimento gravimétrico, densidade aparente, poder calorífico superior, materiais voláteis, carbono fixo e teor de cinzas dos resíduos, para cada tratamento, estão dispostos na Tabela 2.

**Tabela 2.** Rendimento gravimétrico, densidade aparente, poder calorífico superior, materiais voláteis, carbono fixo e teor de cinzas dos resíduos de MDF sem (MDF cru) x com revestimento (MDF rev.) e *in natura* x torreficados

Tratamento	Rendimento gravimétrico (%)			
	<i>in natura</i>	20 minutos	30 minutos	40 minutos
MDF <sub>(cru)</sub>	100 Ac	99,43 Ac	95,78 Ab	90,47 Ba
MDF <sub>(rev.)</sub>	100 Ac	99,45 Ac	95,67 Ab	87,59 Aa
Rendimento energético (%)				
MDF <sub>(cru)</sub>	100 Ac	100,45 Ac	98,12 Ab	95,05 Ba
MDF <sub>(rev.)</sub>	100 Ac	100,94 Ac	97,67 Ab	91,85 Aa
Densidade aparente (g.cm <sup>-3</sup> )				
MDF <sub>(cru)</sub>	0,68 Bc	0,66 Bbc	0,64 Bb	0,61 Ba
MDF <sub>(rev.)</sub>	0,63 Ac	0,61 Abc	0,57 Aab	0,55 Aa
Poder calorífico superior (kcal.kg <sup>-1</sup> )				
MDF <sub>(cru)</sub>	4755,5 Ba	4804,5 Bab	4872,0 Bb	4996,0 Bc
MDF <sub>(rev.)</sub>	4636,0 Aa	4705,0 Aa	4733,0 Aa	4861,5 Ab
Materiais voláteis (%)				
MDF <sub>(cru)</sub>	81,50 Aa	80,95 Aa	81,21 Aa	79,69 Ab
MDF <sub>(rev.)</sub>	82,69 Aa	82,98 Aa	81,05 Aa	78,27 Ab
Carbono fixo (%)				
MDF <sub>(cru)</sub>	18,23 Aa	18,79 Ba	18,50Aa	20,03 Ab
MDF <sub>(rev.)</sub>	16,40 Aa	15,94 Aa	17,90Aa	20,22 Ab
Teor de cinzas (%)				
MDF <sub>(cru)</sub>	0,27 Aa	0,26 Aa	0,29 Aa	0,27 Aa
MDF <sub>(rev.)</sub>	0,91 Ba	1,08 Bb	1,06 Bb	1,51 Bc

Médias seguidas horizontalmente pela mesma letra minúscula ou verticalmente pela mesma letra maiúscula não diferem pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ) para uma mesma variável.

Houve pouca perda de massa quando os resíduos de painéis MDF ficaram expostos à 300 °C por vinte minutos, em que possivelmente, esse tempo pode não ter sido suficiente para que ocorresse a melhor transferência de calor entre o reator e a biomassa. Desse modo, o resíduo de MDF não atingiu a temperatura necessária para a degradação térmica de seus componentes (MORENO et al., 2017; WANG et al., 2020).

De modo geral, observa-se que quanto maior o tempo de torrefação, maior foi a perda de massa, principalmente acima de 30 minutos de residência, resultando em menor rendimento gravimétrico, associado pela degradação dos constituintes lignocelulósicos da biomassa, principalmente hemiceluloses (ARAÚJO et al., 2016, ANDRADE et al., 2017).

O rendimento gravimétrico entre os dois tipos de biomassas (MDF cru e revestido) não diferiram entre si, exceto nos tratamentos de 40 minutos de tempo de residência. O rendimento gravimétrico dos resíduos de MDF cru e revestido diminuíram 9,53 e 12,41%, respectivamente, no tempo de residência de 40 minutos em relação ao material *in natura* (Tabela 2).

Verifica-se que o rendimento energético diminui com o aumento do tempo de residência da torrefação, embora essa diferença seja significativa apenas no tratamento de 40 minutos (Tabela 2). Apesar de ocorrer um aumento do poder calorífico com a duração do tratamento, a perda de massa provoca a diminuição do rendimento energético. Isto é, apesar do aumento da energia presente por unidade de massa de material, a perda de massa provocada pelo tratamento térmico faz com que a energia presente na biomassa restante seja menor.

O rendimento energético entre os dois tipos de biomassas (MDF cru e revestido) não diferiram entre si, exceto nos tratamentos de 40 minutos de tempo de residência. O rendimento energético dos resíduos de MDF cru e revestido diminuíram 4,95 e 8,15 % no tempo de residência de 40 minutos em relação ao material *in natura* (Tabela 2). O valor do rendimento energético representa a taxa entre a energia real remanescente após a torrefação e o poder calorífico inicial da biomassa. Para a maioria dos combustíveis sólidos, a obtenção de poder calorífico mais elevado, reduzindo os custos de pré-tratamento, é o objetivo ideal (WANG et al., 2017).. Esse parâmetro é calculado de forma a se obter um tempo ótimo de torrefação, dessa forma conclui-se que o tratamento térmico de 30 minutos de

residência proporciona o melhor rendimento energético (Tabela 2). (WANG et al., 2017).

A densidade aparente reduziu com o aumento do tempo de torrefação, tendo os resíduos de MDF revestidos, significativamente, os menores valores médios. Nos tratamentos de 40 minutos de residência, a densidade foi 11% (MDF cru) e 13% (MDF revestido) menor comparado com a densidade aparente das amostras *in natura* (Tabela 2). A diminuição da densidade aparente está associada à maior taxa de degradação térmica, perda de massa, da biomassa em relação a sua retratibilidade e perda de volume (VAN DER STELT et al., 2011; CASTRO et al. 2021).

O poder calorífico superior dos resíduos de MDF cru aumentaram com o incremento do tempo de residência em 1,02; 2,39 e 4,81%, respectivamente, quando comparado a biomassa *in natura*. Enquanto, o poder calorífico superior dos resíduos de MDF revestido aumentaram com o tempo de residência em 1,47; 2,05 e 4,86%, quando comparado a biomassa *in natura* (Tabela 2). O maior poder calorífico das biomassas torrificadas por 40 minutos se deve à volatilização das hemiceluloses e outros compostos menos energéticos, aumento proporcional no teor de lignina total, e conseqüentemente na concentração de carbono fixo (PENG et al., 2013; WANG et al., 2020). Vale salientar que o maior poder calorífico da lignina está associado à presença de seus anéis aromáticos, e as ligações duplas de carbono, os quais liberam  $518 \text{ kJ mol}^{-1}$ , enquanto que as ligações simples entre carbonos, liberam  $348 \text{ kJ mol}^{-1}$  (OZYUGURAN & YAMAN, 2017; MORENO et al., 2017).

Os resíduos de MDF sem revestimento tiveram maiores valores de poder calorífico superior, independente do tempo de residência de torrefação, quando comparados com os de MDF revestidos, sendo o maior valor encontrado nos resíduos de MDF cru no tempo de 40 minutos de torrefação (Tabela 2). Os menores valores de poder calorífico entre os tratamentos com resíduo de MDF revestido podem ser explicados pelo maior teor de cinzas, devido à composição química do revestimento de resina melamínica BP, uma vez que elevados teores de cinzas ou de minerais decresce o poder calorífico (PROTÁSSIO et al., 2013). O poder calorífico é um dos principais parâmetros para selecionar a biomassa para fins energéticos e valores elevados resultam em uma maior quantidade de energia liberada, facilitando as operações na caldeira e aumentando o potencial de geração (PEREIRA et al., 2013; DHYANI; BHASKAR, 2018).

Os teores de materiais voláteis dos resíduos de MDF *in natura* estão mais baixos (aproximadamente 85%) que os valores observados na madeira de pinus (PEREZ et al., 2015). Isso se deve provavelmente a confecção desse tipo de painel, em que as fibras de madeira são prensadas à quente, normalmente com temperaturas superiores à 180 °C, juntamente com o adesivo de ureia-formaldeído. Logo, parte dos materiais voláteis podem ter se desprendidos durante a prensagem, além da composição total não ser somente material lignocelulósico (WEBER; IWAKIRI, 2015).

A presença de materiais voláteis não diminuiu, significativamente, nos tratamentos de 20 e 30 minutos de tempo de residência, durante a torrefação dos resíduos de MDF cru e revestido (Tabela 2). Entretanto, ocorreu uma diminuição de 2,22% e 5,34% nos tratamentos de MDF cru e revestido, respectivamente, quando as biomassas foram torrificadas por 40 minutos (Tabela 2). A redução do teor de materiais voláteis se deve a eliminação de componentes menos estáveis termicamente, como as hemiceluloses, na forma de gases condensáveis e não condensáveis (PEREIRA et al., 2013). Contudo, os tempos de 20 e 30 minutos de residência não foram suficientes para que houvesse a transferência de calor entre as amostras de MDF, não ocasionando a degradação térmica dos componentes menos estáveis termicamente.

Os teores de carbono fixo dos resíduos de MDF cru e MDF revestidos foram 8,99 e 18,89%, respectivamente, maiores no tempo de torrefação de 40 minutos, quando comparado com o material *in natura* (Tabela 2). No tempo de torrefação de 20 minutos o teor de carbono fixo nos resíduos de MDF cru foram superiores aos de MDF revestidos. Grande parte do teor de carbono fixo se deve a quantidade de lignina na biomassa torrificada, pois esta possui alta estabilidade térmica e elevado teor de carbono (PEREIRA et al., 2013; NHUCHHEN et al., 2014). A lignina é o composto mais estável das biomassas devido a sua macromolécula formada por ligações éter estáveis e por unidades fenilpropano denominados molignóis (p-hidroxifenila, guaiacila e siringila) (ARAÚJO et al., 2016).

As estruturas químicas da lignina também recebem algumas denominações com base na substituição do anel aromático dos monolignóis. Deste modo, podem ser fenólicas ou eterificadas dependendo da hidroxila no anel aromático, mas também podem ser denominadas em relação à substituição do carbono 5 (C5) da estrutura base do monolignol. Por exemplo, a lignina de gimnospermas, como o

*pinus* que dá origem aos painéis de MDF, é composta somente por unidades G (guaiacil) (ARAÚJO et al., 2016). Logo, espera-se que elevadas proporções do monômero guaiacil na molécula da lignina proporcionem maior resistência à degradação térmica durante a torrefação, pois nestas unidades tem uma posição aromática, C5, disponível para realizar ligações entre átomos de carbono durante o processo de biossíntese da lignina, ocasionando maior polimerização. Estas ligações apresentam elevada estabilidade e, conseqüentemente, maior quantidade de energia será necessária para quebrar as mesmas, o que confere maior resistência à degradação térmica.

De modo geral, o tempo de torrefação não influenciou significativamente o teor de cinzas dos resíduos de painéis MDF cru. Por outro lado, a torrefação aumentou os teores de cinzas do MDF revestido em 14,15 e 39,74% nos tempos 30 e 40 minutos de residência, respectivamente (Tabela 2). Os teores de cinzas dos resíduos de MDF revestidos foram em média 74,75% maiores em relação aos resíduos de MDF cru em todos os tratamentos (Tabela 2). Esta diferença pode estar associada aos metais e outros inorgânicos presentes nas tintas e vernizes (CUNHA et al., 2018). A alcalinidade e acidez (dependendo dos metais que a compõe) das cinzas pode causar corrosão nos elementos metálicos, provocando danos e gastos com manutenção dos equipamentos de queima (SANTOS et al., 2019). Outra questão associada com o alto teor de cinzas é o gasto com o tratamento e disposição dos resíduos, pois na composição da biomassa pode haver elementos tóxicos que estejam fora dos limites estabelecidos pela legislação ambiental vigente para resíduos não perigosos (CUNHA et al., 2018).

Os valores médios dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio das biomassas, para cada tratamento, encontram-se na Tabela 3.

**Tabela 3.** Teor de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio dos resíduos de MDF sem (MDF cru) x com revestimento (MDF rev.) e in natura x torreficados

Tratamento	Carbono (%)			
	<i>in natura</i>	20 minutos	30 minutos	40 minutos
MDF <sub>(cru)</sub>	50,10 Ba	50,90 Bb	51,60 Bc	52,30 Bd
MDF <sub>(rev.)</sub>	49,00 Aa	48,50 Aa	49,90 Ab	50,70 Ac
Tratamento	Hidrogênio (%)			
	<i>in natura</i>	20 minutos	30 minutos	40 minutos
MDF <sub>(cru)</sub>	5,93 Bc	5,83 Bbc	5,74 Aab	5,71 Aa
MDF <sub>(rev.)</sub>	5,71 Aab	5,68 Aab	5,75 Ab	5,62 Aa
Oxigênio (%)				

MDF <sub>(cru)</sub>	40,90 Ac	40,30 Abc	39,93 Aab	39,26 Aa
MDF <sub>(rev.)</sub>	41,20 Bb	41,32 Bb	39,85 Aa	38,89 Aa
<b>Nitrogênio (%)</b>				
MDF <sub>(cru)</sub>	2,78 Aa	2,65 Aa	2,41 Aa	2,42 Aa
MDF <sub>(rev.)</sub>	3,14 Aa	3,39 Ba	3,42 Ba	3,26 Ba
<b>Enxofre (%)</b>				
MDF <sub>(cru)</sub>	0,03 Aa	0,05 Bb	0,03 Aa	0,03 Aa
MDF <sub>(rev.)</sub>	0,03 Aa	0,02 Ab	0,02 Aa	0,02 Aa

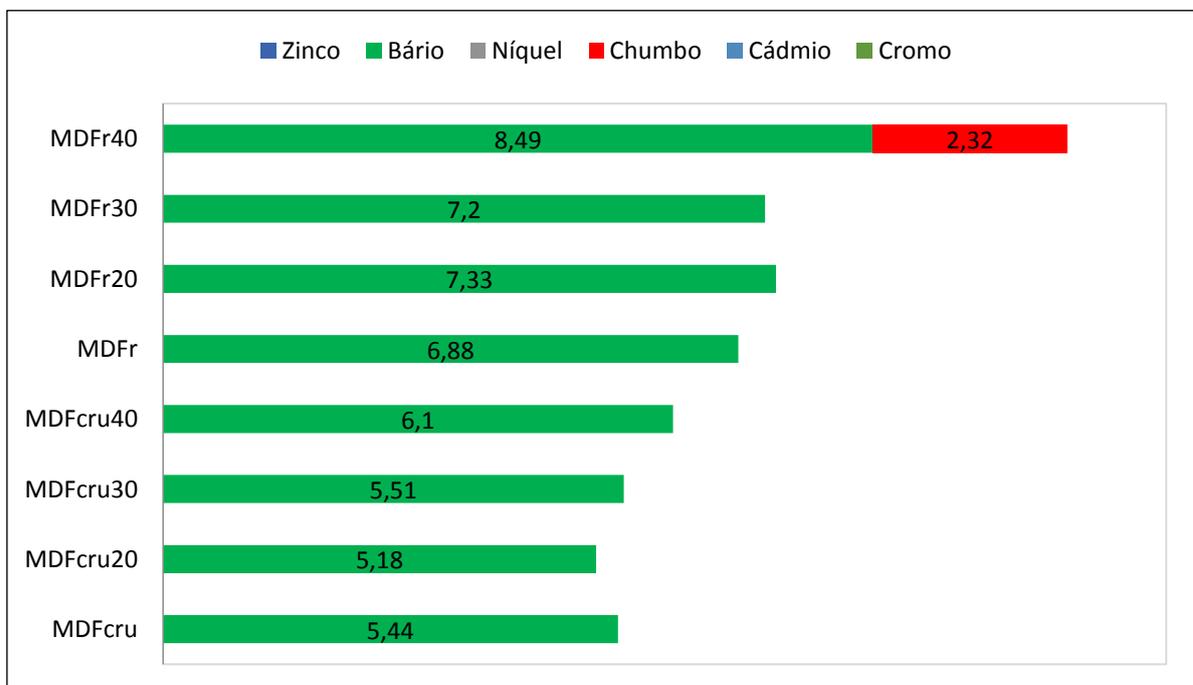
Médias seguidas horizontalmente pela mesma letra minúscula ou verticalmente pela mesma letra maiúscula não diferem pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ) para uma mesma variável.

O teor de carbono aumentou gradualmente 1,57; 2,91 e 4,21% nos resíduos de MDF cru em relação à biomassa *in natura*, respectivamente para os tempos de residência de 20, 30 e 40 minutos, enquanto que nos resíduos de MDF revestido houve um aumento de 1,80 e 3,35% nos tempos de 30 e 40 minutos de residência, respectivamente (Tabela 3). O aumento gradual do teor de carbono com o tempo de torrefação se deve à degradação parcial dos carboidratos, tendo como consequência, a redução nos teores de oxigênio e aumento da concentração de lignina no material, a qual possui estrutura constituída por grupos fenilpropano unidos por ligações C-C e C-O-C e uma densa estrutura molecular, condensada (PEREIRA et al., 2013).

Em contrapartida, os teores de hidrogênio e oxigênio diminuíram nas biomassas de MDF cru e revestido (Tabela 3) com o aumento do tempo de torrefação. Os teores de hidrogênio e oxigênio no tratamento *in natura* e no tempo de torrefação de 20 minutos foram maiores no resíduo de MDF revestido em relação ao MDF cru. Isso se deve, provavelmente, à composição química das tintas do revestimento, que contém moléculas ricas em hidrocarbonetos como o xileno (dimetil-benzeno) e moléculas oxigenadas como acetato de butila e acetato de etila e que não foram degradados em baixos tempos de residência (FERREIRA et al., 2015; MORENO et al., 2017). Para a produção de biocombustíveis sólidos na forma de briquetes, maiores teores de carbono e hidrogênio são desejáveis, enquanto elevados teores de oxigênio são indesejáveis (NHUCHHEN et al., 2014), pois durante a combustão dos briquetes, C e H contribuirão em maior liberação de energia, tendo como produtos da combustão CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e energia (OBERNBERGER; THEK, 2010; CARNEIRO et al., 2014).

De modo geral, os teores de nitrogênio e enxofre não sofreram alterações significativas com o processo de torrefação, independente do tempo de residência. Os teores de nitrogênio em todos os tratamentos foram acima dos 0,6% (Tabela 3). Embora a presença de nitrogênio possa causar impactos negativos no ambiente devido a formação de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) durante a queima do biocombustível, a taxa de formação de  $\text{NO}_x$  térmico é significativa somente para temperaturas de câmara superiores a 1500 °C (WANG et al., 2019; MÍGUEZ et al., 2021), devido à alta energia de ativação exigida. Teores de enxofre superiores a 0,1% podem promover corrosão das fornalhas utilizadas para combustão de biomassa (OBERNBERGER et al., 2006), e teores acima de 0,2% estão associados às emissões de  $\text{SO}_x$  (KARIM et al., 2018). Nenhum tratamento atingiu tais limites de enxofre (Tabela 3), portanto, as emissões de  $\text{SO}_x$  são insignificantes durante a combustão destes biocombustíveis.

Quanto aos metais pesados nos resíduos de MDF cru e revestidos, não foi detectada a presença de zinco (Zn), níquel (Ni), cádmio (Cd) e cromo (Cr). Somente o elemento chumbo (Pb) foi encontrado no MDF revestido torrificado por 40 minutos. O elemento bário (Ba) foi observado em todos as biomassas avaliadas, conforme pode ser verificado na Figura 3.



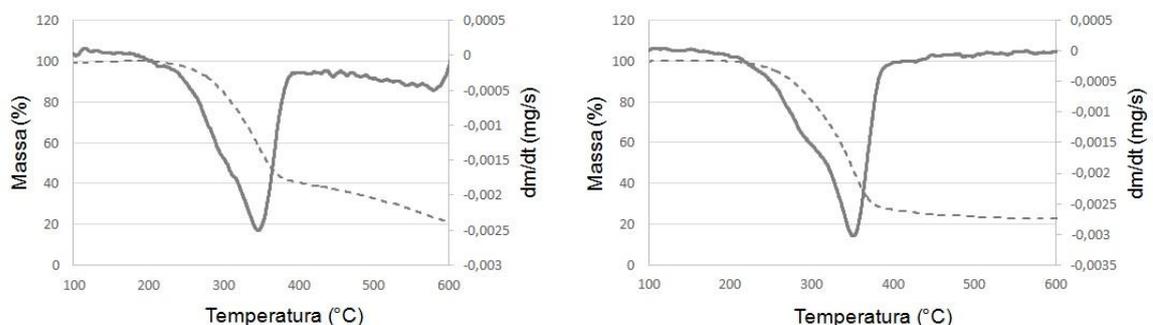
**Figura 3** – Análise de metais pesados nos resíduos de MDF cru e MDF revestido (mg/kg).

Os elementos metálicos zinco, níquel, cádmio e cromo não foram detectados, provavelmente pela baixa concentração destes, uma vez que estes podem ser encontrados nos painéis revestidos, como agentes antimicrobianos (zinco) e tintas (cádmio e cromo). O ajuste da sensibilidade do método de detecção pode não ter sido preciso para detectar a baixa quantidade desses elementos.

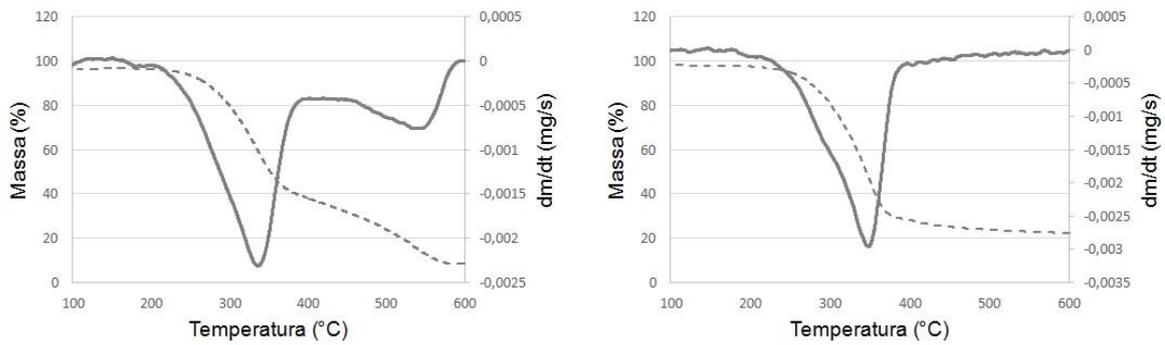
O elemento chumbo foi detectado apenas em um tratamento (MDF revestido, torreficado por 40 minutos). Segundo Tomeleri, et al. (2021), a presença de tintas e revestimentos em geral, tende a aumentar a concentração de zinco, cádmio, chumbo, cromo e mercúrio, devido à presença de compostos para pigmentação, secagem e biocidas. Em estudo sobre a influência de metais pesados na combustão de resíduos sólidos, Krook et al. (2006), obtiveram para resíduos de MDF cru e revestido as concentrações estimadas de cromo (19 mg/kg), chumbo (182 mg/kg), zinco (270 mg/kg), e cádmio (0,7 mg/kg).

O teor de bário observado é comum nessas concentrações nas madeiras que dão origem aos painéis devido ao excesso de sulfato de bário proveniente da reposição de cálcio no solo, por meio, da adição de cal/calcário nas florestas plantadas de pinus (SHIMIZU, 2008). Contudo, conforme apresentado na Figura 3, no resíduo de MDF revestido, os teores de bário são maiores, devido à composição química do revestimento, pois o sulfato de bário usualmente é utilizado como um *filler*, ou seja, sua função é acrescentar volume e influenciar a aplicabilidade de tintas no revestimento de resina melamínica de baixa pressão (LUIZ, 2010).

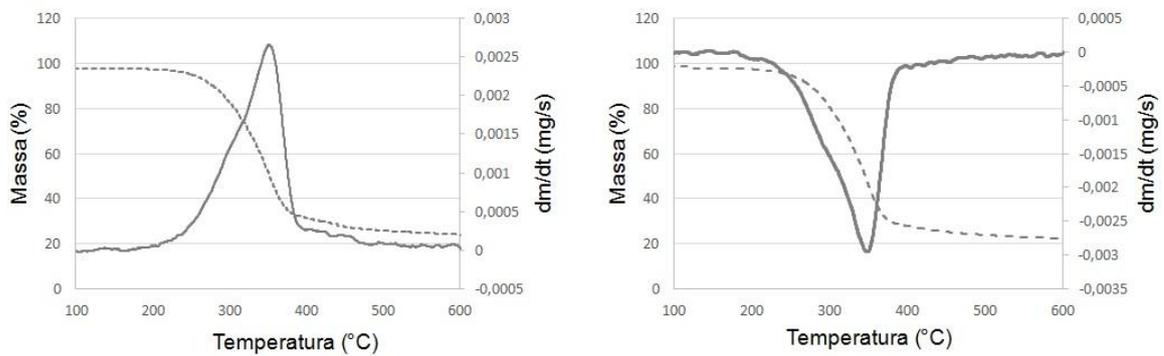
Nas Figuras 4, 5, 6 e 7 estão representadas as curvas termogravimétricas (TG/DTG) dos resíduos de MDF cru e revestido, respectivamente, para cada tempo de torrefação, na faixa de temperatura de 100 a 600 °C.



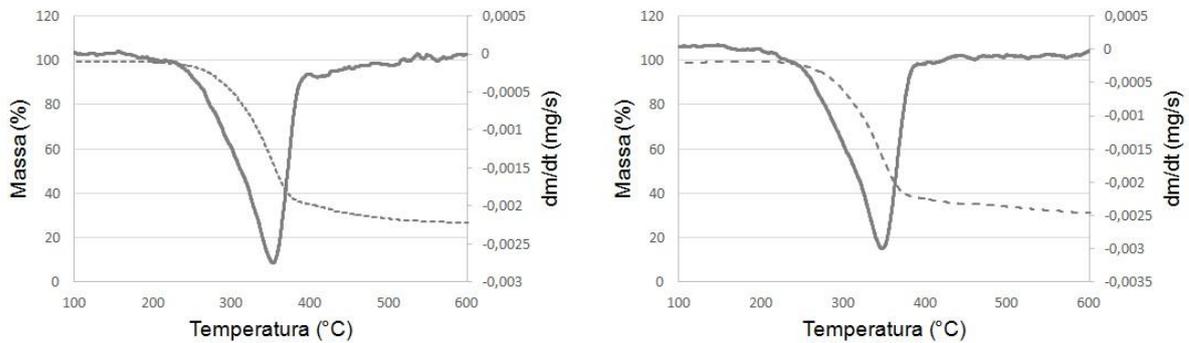
**Figura 4.** Curvas TG/DTG dos resíduos de MDF cru e revestidos *in natura*.



**Figura 5.** Curvas TG/DTG dos resíduos de MDF cru e revestidos torreficados por 20 minutos.



**Figura 6.** Curvas TG/DTG dos resíduos de MDF cru e revestidos torreficados por 30 minutos.



**Figura 7.** Curvas TG/DTG dos resíduos de MDF cru e revestidos torreficados por 40 minutos.

**Tabela 4.** Perda de massa (%) por decomposição térmica dos resíduos de MDF sem (MDF cru) e com revestimento (MDF rev.) *in natura* x torreficados acordo com as faixas de temperatura

Tratamento	Faixas de temperatura (°C)						Massa residual (%)
	100-150	150-250	250-350	350-400	400-450	450-500	
	<b>Perda de massa (%)</b>						
	<i>in natura</i>						
MDF <sub>(cru)</sub>	0,483	2,415	41,068	15,459	3,865	3,865	32,850
MDF <sub>(rev.)</sub>	0	3,688	43,805	17,983	1,844	0,922	31,757
	<b>20 minutos</b>						

MDF <sub>(cru)</sub>	4,902	1,961	42,157	13,235	6,373	7,843	23,529
MDF <sub>(rev.)</sub>	2,073	3,109	49,222	17,617	2,591	1,554	23,834
<b>30 minutos</b>							
MDF <sub>(cru)</sub>	2,162	2,702	42,702	21,081	3,784	1,622	25,945
MDF <sub>(rev.)</sub>	2,073	3,109	48,705	18,135	2,591	1,554	23,834
<b>40 minutos</b>							
MDF <sub>(cru)</sub>	0,524	2,094	41,361	20,942	4,188	2,094	28,976
MDF <sub>(rev.)</sub>	0,485	1,942	42,718	17,476	1,942	1,942	33,495

A baixa degradação térmica das biomassas nas temperaturas entre 100 e 250 °C (Figuras 4, 5, 6 e 7, Tabela 4) foi verificada, como sendo a faixa de temperatura denominada zona de estabilidade térmica, uma vez que a degradação dos principais constituintes da madeira é limitada, ocorrendo apenas à liberação de água e de alguns compostos orgânicos voláteis (VAN DER STELT et al., 2011).

Nota-se que taxa de degradação térmica é drasticamente aumentada na faixa de temperatura de 250 e 400 °C, independente do tempo de residência utilizado para a torrefação (Tabela 4). Nesta faixa de temperatura ocorrem os picos de decomposição térmica das hemiceluloses e celulose (ANDRADE, et al. 2017; ATES et al., 2017). Com o aumento da temperatura, as hemiceluloses e a celulose passam por reações complexas de degradação e desvolatilização (WANG et al., 2020), promovendo grande perda de massa. Ferreira et al. (2015) e Moreno et al. (2017) observaram perda de massa nesta faixa de 60% para biomassa proveniente de MDF.

O resíduo de MDF revestido teve maior degradação térmica na faixa de temperatura que compreende 250 a 400 °C, quando comparado ao resíduo de MDF cru para todos os tratamentos (Tabela 4). O resíduo de MDF revestido foi mais degradado nesse intervalo de temperatura, provavelmente pelo maior conteúdo de materiais voláteis encontrados no revestimento. Segundo a ficha de informações de segurança de produtos químicos referente ao revestimento de resina melamínica e a tinta para revestimentos de painéis MDF e MDP, comumente usados em marcenarias e fábricas de moveis seriados, possuem componentes químicos como xileno, nitrocelulose, acetato de n-butila e glicol que são volatilizados na faixa de 300 °C, contribuindo assim, para a maior degradação térmica dos resíduos de MDF revestidos nessa faixa de temperatura (SABINO et al., 2021; VAN DEN BOSSCHE et al., 2021). A decomposição da lignina ocorre em uma faixa de temperatura mais ampla, variando de 225 a 900 °C (PEREIRA et al., 2013). Entretanto, a sua perda de

massa é inferior em comparação à celulose, hemiceluloses e extrativos (BARSKOV et al., 2019; FIALHO et al., 2019).

A decomposição térmica das biomassas a partir de 450 °C possui tendências diferentes nos resíduos *in natura* e torreficados por 20 minutos, embora sejam, praticamente, iguais nos tempos de torrefação de 30 e 40 minutos. A perda de massa no MDF cru é superior à do MDF revestido nessa faixa (Tabela 4). Quanto maior a massa residual a partir de 500 °C maior a estabilidade térmica da biomassa, devido a maior concentração de lignina em detrimento a degradação das hemiceluloses nas biomassas torreficadas, pois a lignina é o componente mais estável termicamente presente na biomassa (BARSKOV et al., 2019).

## 5.2 Caracterização dos briquetes a partir dos resíduos de MDF torreficados

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios das propriedades dos briquetes em função dos tratamentos.

**Tabela 5.** Propriedades dos briquetes em função dos tratamentos

Tratamento	Umidade de equilíbrio higroscópico (%)			
	<i>in natura</i>	20 minutos	30 minutos	40 minutos
MDF <sub>(cru)</sub>	9,30 Bd	8,94Bc	7,32Ab	6,87Aa
MDF <sub>(rev.)</sub>	8,81 Ad	8,05Ac	7,30Ab	6,34Aa
Densidade aparente (g.cm <sup>-3</sup> )				
MDF <sub>(cru)</sub>	0,937 Ad	0,753 Aa	0,817 Ab	0,845 Ac
MDF <sub>(rev.)</sub>	0,993 Bb	1,028 Bc	0,980 Ba	1,030 Bc
Densidade energética (Gcal.m <sup>-3</sup> )				
MDF <sub>(cru)</sub>	3,72Ad	3,04 Aa	3,40 Ab	3,65 Ac
MDF <sub>(rev.)</sub>	3,87Aa	4,11 Bc	3,99 Bb	4,36 Bd
Carga de ruptura (Kgf)				
MDF <sub>(cru)</sub>	208,70 Ab	233,13 Ac	208,89 Ab	124,38 Aa
MDF <sub>(rev.)</sub>	256,34 Bc	321,55 Bd	229,78 Bb	168,23 Ba

Médias seguidas horizontalmente pela mesma letra minúscula ou verticalmente pela mesma letra maiúscula não diferem pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ), para uma mesma variável.

A torrefação diminuiu significativamente a umidade de equilíbrio higroscópico dos briquetes com o aumento do tempo de torrefação. Verificou-se que os briquetes produzidos com resíduos de MDF cru e revestidos, torreficados por 40 minutos,

tiveram as umidades de equilíbrio reduzidas em 26,13 e 27,70%, respectivamente, em comparação à testemunha (*in natura*). Não houve diferença significativa quanto ao teor de umidade higroscópica entre os briquetes constituídos de MDF cru e revestido torrificados durante 30 e 40 minutos. Os briquetes de biomassa torrificada tendem a ser menos higroscópicos que os constituídos de biomassa *in natura*, uma vez que o material torrificado possui menor quantidade de grupos hidroxílicos disponíveis para a adsorção da água (ACHARYA et al., 2015; MORENO et al., 2017). Tal resultado justifica a torrefação da biomassa para briquetagem, pois reduz o custo de transporte dos briquetes, uma vez que será transportada menor massa de água, além de aumentar o poder calorífico útil dos briquetes (ANDRADE et al., 2017).

A densidade aparente em briquetes é um fator muito importante, pois determina suas condições de armazenamento e transporte, além de estar diretamente ligada ao conceito de densidade energética, que se refere à quantidade de energia que está sendo transportada por unidade de volume (QUIRINO et al., 2012). Briquetes com maior densidade têm maior estabilidade e durabilidade, assim como é desejável que briquetes possuam maior teor de carbono fixo e poder calorífico (CARVALHO et al., 2021).

A densidade aparente dos briquetes constituídos de resíduos de MDF cru diminuiu em 9,82% com o tratamento de 40 minutos (Tabela 5), provavelmente devido a degradação dos extrativos que contribuem de forma positiva para a melhor coesão entre as partículas durante a compactação da biomassa (QUIRINO et al., 2012; MARTINEZ et al., 2017). A densidade aparente dos briquetes produzidos com MDF revestido e torrificados por 40 minutos aumentou em relação àqueles produzidos com biomassa *in natura* (Tabela 5).

O aumento da densidade aparente dos briquetes produzidos com resíduos de MDF revestido pode ser explicado pela maior quantidade de lignina e extrativos que contribuem positivamente para a coesão entre as partículas utilizadas na produção dos briquetes (SETTER et al., 2020; MARTINEZ et al., 2021) (Tabela 2).

A briquetagem é um processo de comprimir o material sob alta pressão, assim, o calor gerado por forças de atrito entre a biomassa e a parede da matriz de compactação, promovem a plasticização da lignina, que age como um aglutinante natural. Portanto, se a biomassa possuir uma densidade aparente menor, como observado no resíduo de MDF revestido (Tabela 5), conseqüentemente, este

possuirá menor resistência à compactação, comprimindo a biomassa de forma mais eficiente, ou seja, eliminando espaços vazios, criando uma maior coesão entre as partículas (MARTINEZ et al., 2017; CABAN et al., 2021; MOSQUERA et al., 2021).

A densidade energética dos briquetes produzidos com MDF revestido, torreficado, foi significativamente maior que os produzidos com resíduos de MDF cru, tendo os torreficados por 40 minutos, 11,2% a mais de energia por unidade de volume em relação ao tratamento testemunha. Isso se deve a maior densidade aparente, uma vez que estes possuem menor poder calorífico quando comparados aos resíduos de MDF cru. A densidade energética dos briquetes é dada pelo produto de densidade aparente pelo poder calorífico útil da biomassa que o constitui (CABAN et al., 2021). Isso pode explicar tais valores, pois enquanto o tratamento térmico promove um incremento em poder calorífico das biomassas, a densidade aparente tende a diminuir conforme o tempo de torrefação aumenta.

A densidade energética dos briquetes de painéis torreficados por 40 minutos foi de 6% a mais que os constituídos de resíduos de painéis torreficados, por 20 minutos, além de maior perda de massa, portanto, recomenda-se para esse tipo de resíduo a torrefação por 20 minutos, uma vez que foi gasto o dobro do tempo de fabricação, reduzindo a produtividade final da planta fabril.

A densidade energética dos briquetes de MDF torreficados, por 40 minutos, foi superior à observada por Souza e Valle et al. (2016) ao estudarem briquetes produzidos com biomassa de tauari (*Couratari oblongifolia*) ( $3,93 \text{ Gcal.m}^{-3}$ ), casca de arroz ( $3,11 \text{ Gcal.m}^{-3}$ ) e bagaço de cana ( $3,95 \text{ Gcal.m}^{-3}$ ). Ao comparar as densidade energética dos briquetes de resíduos de MDF torreficados com outras biomassas, esses tiveram valores próximos aos observados para os briquetes de serragem de *Eucalyptus* ( $4,17 \text{ Gcal.m}^{-3}$ ) e resíduo de colheita de milho ( $4,22 \text{ Gcal.m}^{-3}$ ) (Protásio et al. 2011).

A carga de ruptura máxima é um importante parâmetro no que tange a qualidade dos briquetes, uma vez que determina a resistência à estocagem, manuseio e transporte (BRAND et al., 2019). Vale salientar que a força requerida durante o teste de resistência à compressão expressa a tensão máxima suportada pelo briquete até o seu rompimento e está relacionada com a força de aderência das partículas do material que o constitui (KALYAN e MOREY, 2009).

Os briquetes produzidos com resíduo de MDF revestido obtiveram maior valor de carga de ruptura quando comparados aos de MDF cru, independente do

tempo de residência utilizado na torrefação (Tabela 5). Esses maiores valores se devem à maior densidade aparente observada, também, para esses briquetes, uma vez que carga de ruptura do briquete é diretamente proporcional à densidade aparente (QUIRINO et al., 2012).

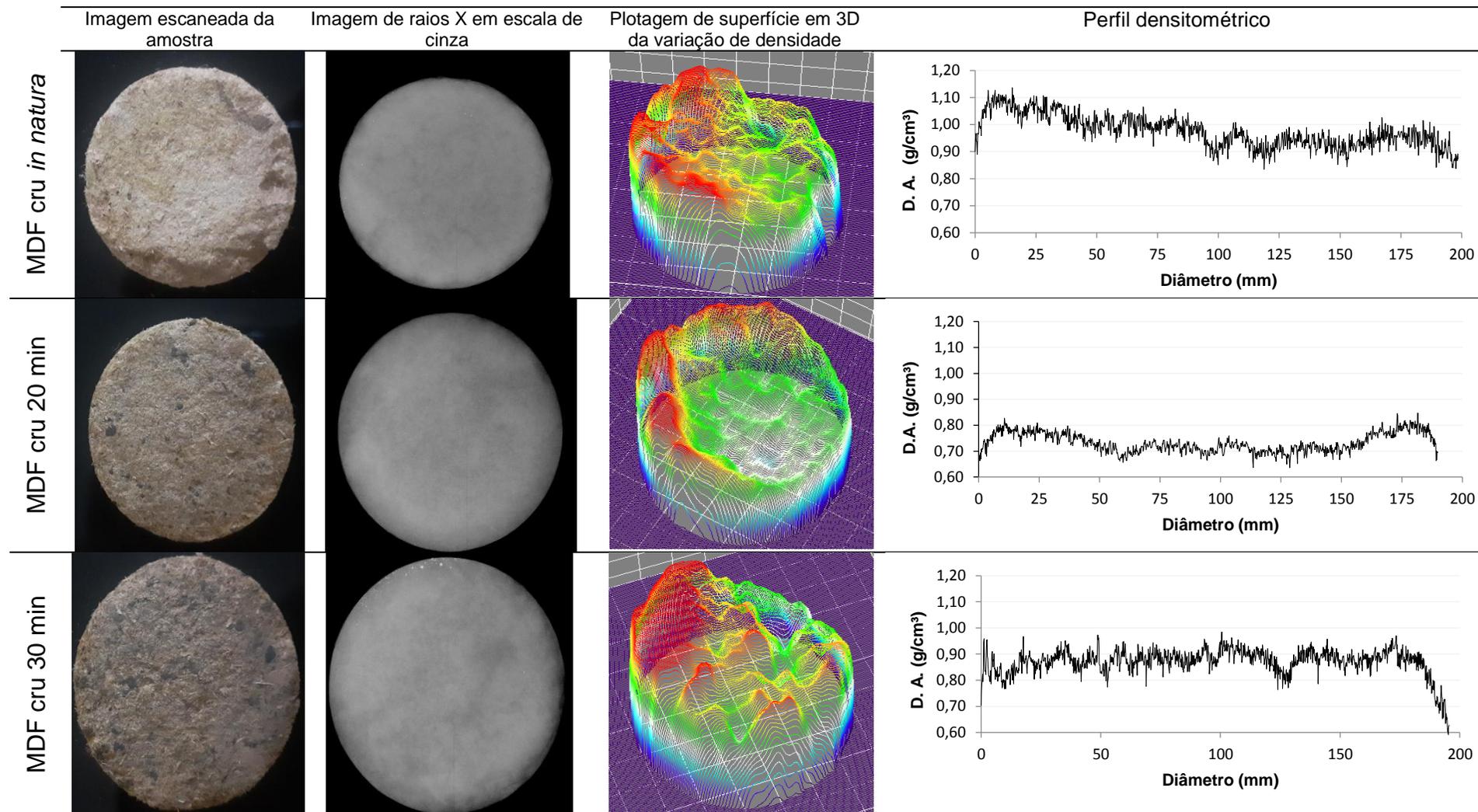
Dias Junior et al. (2014), estudando briquetes de resíduos de bambu, encontraram carga de ruptura de 160,68 Kgf, que é inferior aos valores observados nos briquetes de MDF cru e revestidos. Brand et al. (2017), analisando briquetes de resíduos de casca e palha de arroz, obtiveram valores médios de carga de ruptura de 48 Kgf e 52,4 kgf, respectivamente.

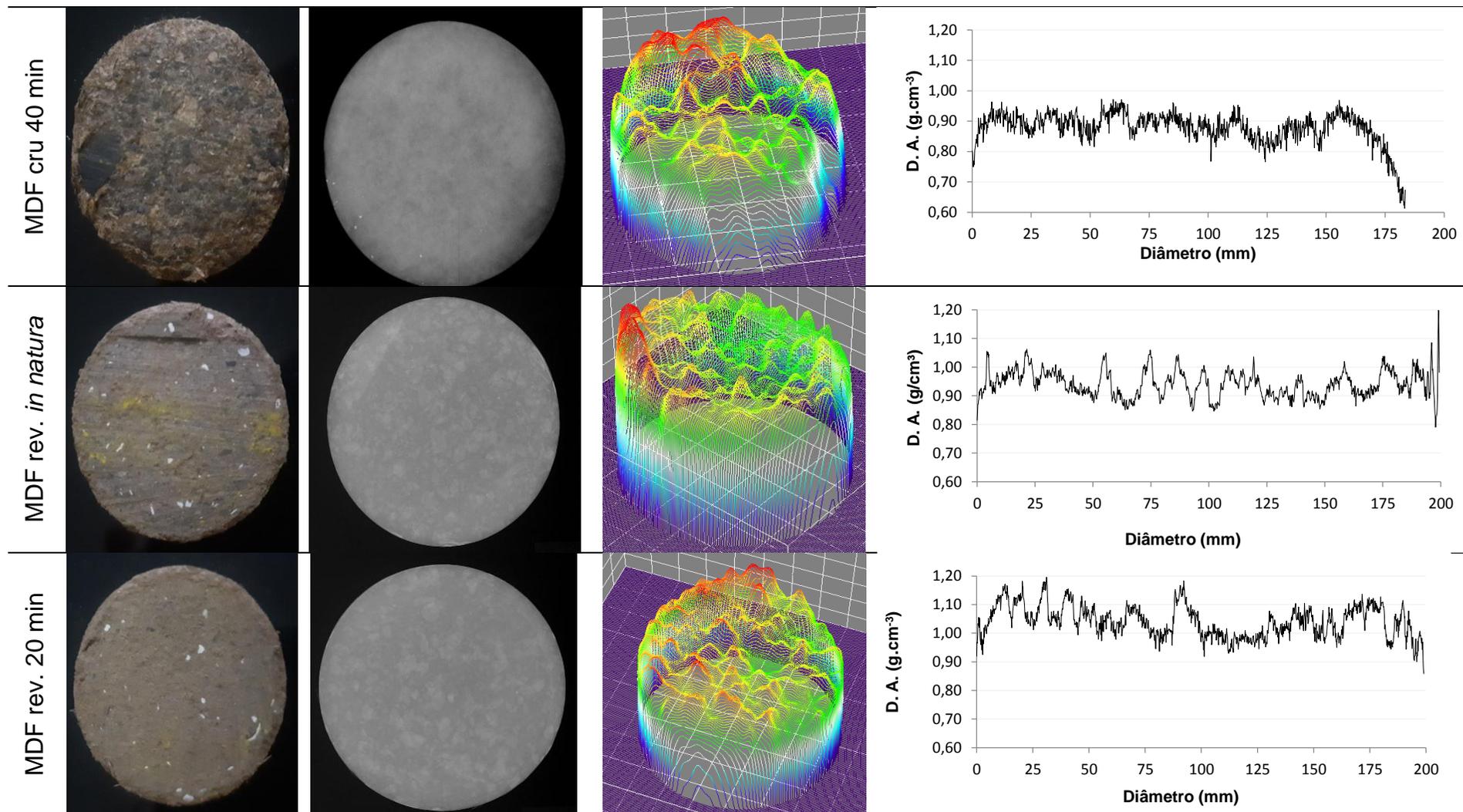
A torrefação no maior tempo de residência afetou significativamente a carga de ruptura dos briquetes produzidos com resíduos de MDF cru e revestido, diminuindo em 47,68 e 46,65%, respectivamente, a resistência dos mesmos quando comparado aos produzidos com 20 minutos, os quais tiveram os maiores valores de carga de ruptura (Tabela 5). Isso se deve, provavelmente, ao tamanho das partículas, composição química e teor de umidade da biomassa após o tratamento térmico, que apesar de concentrar lignina, deixa a biomassa mais quebradiça e friável, contribuindo negativamente para a coesão entre as partículas durante a compactação (KALIYAN e MOREY, 2009; GOUVÊA et al., 2017; BRAND et al., 2019).

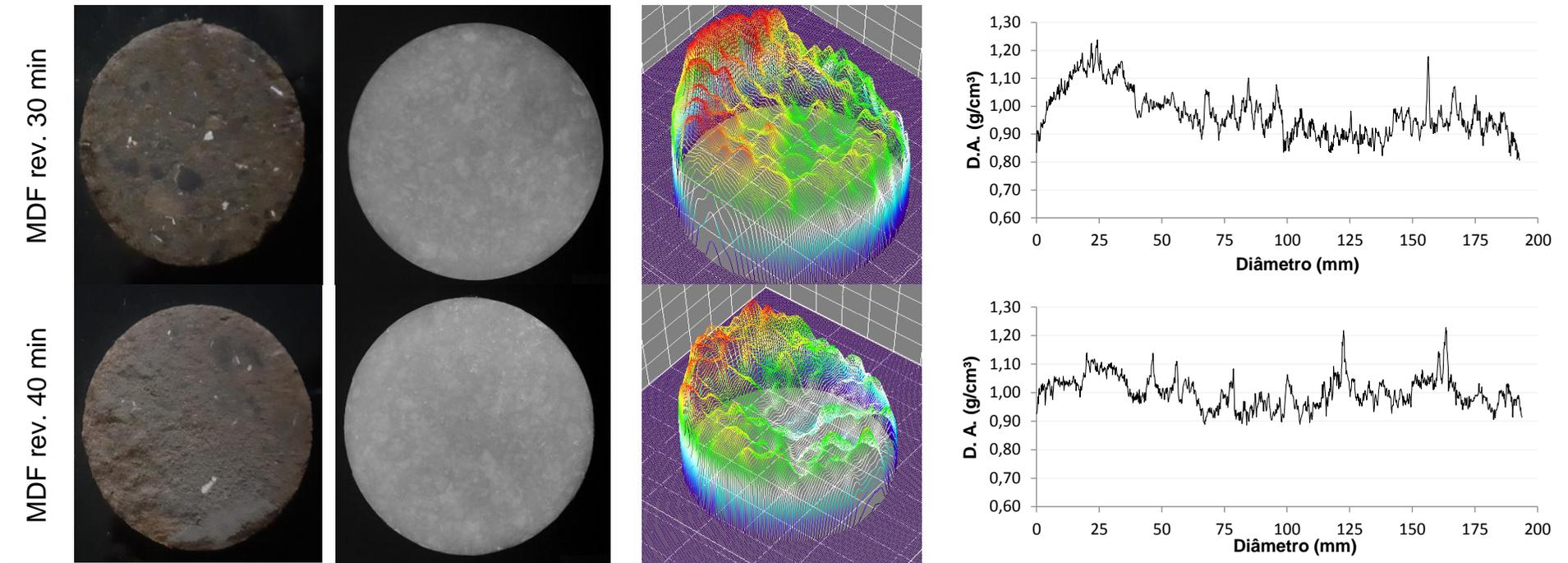
Por meio das imagens digitais dos briquetes (imagem escaneada, imagem de raios X em escala de cinza e a plotagem de superfície 3D de variação da densidade) apresentadas na Figura 8, bem como do perfil densitométrico, evidenciou-se a importância do uso de imagens de raios X para um melhor entendimento da variação da densidade aparente dos briquetes.

Em relação às imagens de raios X em escala de cinza verifica-se a variação de cores indo do branco ao preto, predominando a coloração cinza. As regiões com colorações mais esbranquiçadas representam porções com densidades mais altas, e regiões com colorações mais escuras, porções com densidades mais baixas (QUIRINO et al., 2012). Tanto no briquete de MDF cru, quanto no revestido, verificou-se maior presença de regiões esbranquiçadas nas bordas (periferias), indicativo de maior densidade e regiões mais escuras no centro dos briquetes, propiciado pela melhor transferência de calor entre o cilindro metálico da briquetadeira e a superfície externa dos resíduos de painéis MDF. Verifica-se também que nas imagens de raios X dos briquetes de MDF revestido a presença de

regiões com partículas mais esbranquiçadas (mais densas), indicativo que são partículas da face revestida do painel MDF. Já no MDF cru não foi verificada a presença destas regiões esbranquiçadas com partículas de maior densidade. Uma limitação deste tipo de análise foi a limitação da escala de cores indo do preto ao branco, dificultando a interpretação das imagens devido a pequena faixa de variabilidade de cores. A partir disso, foi realizada a análise de plotagem de superfície 3D de variação da densidade que possibilitou uma maior variedade de cores.







**Figura 8.** Plotagem de superfície 3D de variação de densidade: A) MDF cru *in natura*; B) MDF cru torreficado por 20 min; C) MDF cru torreficado por 30 min; D) MDF cru torreficado por 40 min; E) MDF revestido *in natura*; B) MDF revestido torreficado por 20 min; C) MDF revestido torreficado por 30 min; D) MDF revestido torreficado por 40 min

Na análise da plotagem de superfície 3D de variação da densidade, as cores variaram do azul, passando pelo verde, amarelo e vermelho, aumentando os valores de densidade nessa ordem. Neste tipo de análise, são criadas linhas que representam o aumento (pico) e a diminuição (vale) de densidade em uma escala em 3D colorida (ARANTES et al., 2016; MEDEIROS et al., 2020). Esse tipo de plotagem de variação da superfície de densidade em escala 3D facilita a interpretação da variabilidade da densidade aparente no briquete. Verificou-se a predominância de picos com linhas vermelhas (indicativo de alta densidade) na região esquerda e mais próxima da borda de todos os briquetes avaliados (Figura 8), indicativo que pode ser uma região com maior temperatura da prensa de briquetagem, acarretando na maior coesão entre as partículas e conseqüentemente maior densidade (CASTRO et al., 2019).

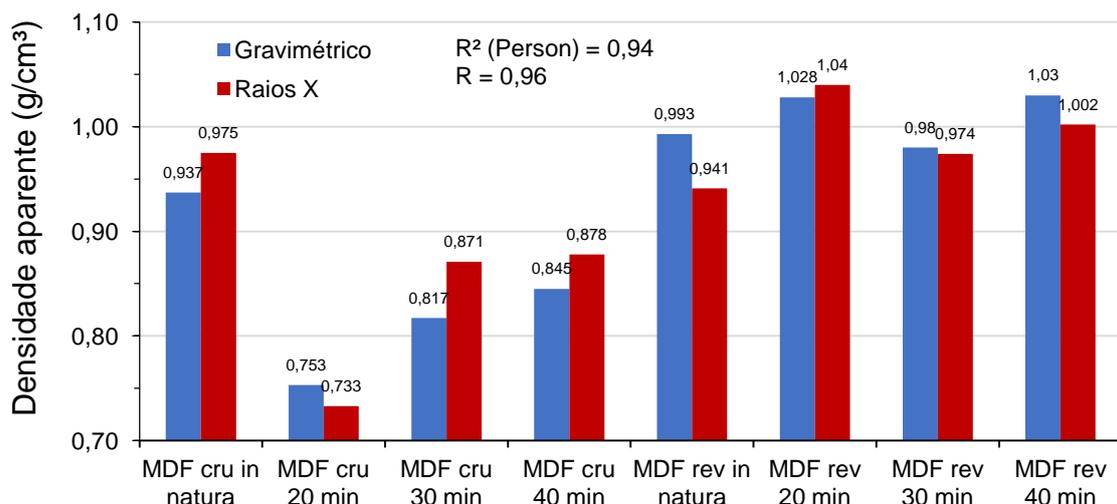
Em relação ao lado direito de todos os briquetes, verificou-se a predominância de vales com linhas verdes (indicativo de baixa densidade). O estudo da estrutura tridimensional da região interna dos materiais estudados e o aumento da velocidade de análise dos dados confirmam resultados satisfatórios, com a utilização da escala 3D para avaliar a densidade dos briquetes. O uso de imagens de raios X, em escala de cinza ou com gradiente de cores em 3D, são métodos não destrutivos importantes como metodologia adicional à tradicional caracterização tecnológica laboratorial (MEDEIROS et al., 2020). O método proposto com maior variabilidade de cores fornece uma solução rápida, fácil de interpretar e confiável para avaliar a densidade aparente, por raios X, dos briquetes produzidos a partir de imagens digitais (ROUSSEAU et al., 2015).

Nos perfis densitométricos construídos a partir das imagens digitais de raios X em escala de cinza na posição central dos briquetes, foi possível avaliar a variação dos valores de densidade aparente ao longo da seção diametral. Verificou-se em todos os tratamentos uma região central diferenciada das extremidades dos briquetes (10 mm na região da borda), delimitando uma parte central do briquete com menores valores de densidade aparente, em relação à parte externa do briquete que foi mais densa. Isso se deve, provavelmente à variação da temperatura interna entre o centro e a periferia no briquete e também variação da pressão interna durante a compactação dos briquetes (QUIRINO et al., 2012). Tal variação também pode ser associada à baixa transferência de calor no sentido radial dos briquetes,

visto que quando as partículas entram em contato com a parede metálica da matriz de compactação, o atrito entre elas promovem o aquecimento, e esse se dá da superfície para o interior dos briquetes, no entanto, devido à baixa condutividade térmica da madeira há pouca transferência de calor para as camadas mais internas, ou seja, as camadas superficiais recebem maior quantidade de calor levando a uma maior temperatura, tendo, portanto, nesta região maior plasticização da lignina (BRAND et al., 2019), aumentando a coesão entre o material e consequentemente a densidade aparente.

Nos briquetes de MDF revestido verificou-se uma densificação mais homogênea quando comparado aos briquetes de MDF cru (Figura 8), indicadas tanto no perfil densitométrico, quanto na plotagem de superfície 3D de variação da densidade. Isso se deve provavelmente pela menor densidade da matéria-prima desses briquetes comparado ao resíduo de MDF cru, uma vez que a biomassa a ser compactada oferece menor resistência a compactação, diminuindo os espaços vazios durante a briquetagem e consequentemente gerando um produto final com maior qualidade (QUIRINO et al., 2012; BRAND et al., 2019).

Na Figura 9 são apresentados os valores médios de densidade aparente dos briquetes obtidos pelo método de densitometria de raios X e o método de deslocamento do mercúrio.

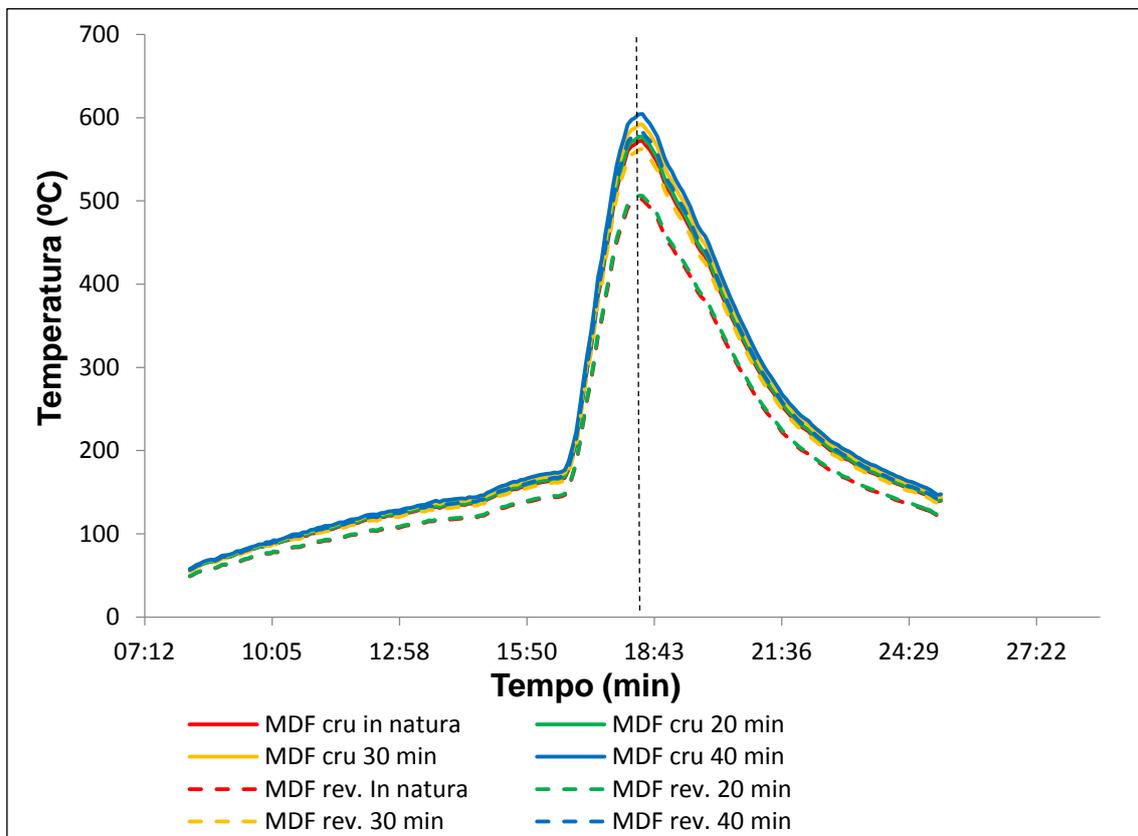


**Figura 9.** Comparação entre os métodos de obtenção da densidade aparente dos briquetes: deslocamento de mercúrio (gravimétrico) e densitometria de raios X

Observa-se que os coeficientes de correlação de Pearson e de determinação são fortes e positivos entre os dois métodos de determinação da

densidade aparente. Isso ressalta a confiabilidade do método de raios X, uma vez que é uma metodologia não destrutiva, rápida e permite estudos de variabilidade da densidade em escala 2D e 3D para um melhor entendimento das variações das propriedades físico-mecânicas nos briquetes.

Na Figura 10 são apresentados os valores de temperatura e tempo de queima dos briquetes de MDF com e sem revestimento, durante o teste de combustibilidade.



**Figura 10.** Temperatura observada durante o teste de combustibilidade dos briquetes em função dos tratamentos.

A temperatura máxima observada durante a queima dos briquetes aumentou com o incremento do tempo de residência de torrefação das amostras de MDF cru e revestido (Figura 10), com temperatura de pico de 605 e 583 °C, respectivamente, para os briquetes produzidos com biomassas torrificadas por 40 minutos. Em geral, o comportamento dos briquetes foram semelhantes, com perda de massa e maiores picos de temperatura próximos de 18 minutos.

As menores temperaturas de pico foram observadas nos briquetes de MDF revestido *in natura* e os torrificados por 20 minutos, com temperatura de 502 e 506 °C, respectivamente. Essas menores temperaturas podem ser atribuídas ao menor teor de carbono, maior teor de nitrogênio e maior teor de oxigênio destas biomassas, conforme pode ser observado na tabela 4. Além disso, o alto teor de cinzas pode, também, ter contribuído para esse comportamento, bem como o potencial energético dos materiais voláteis presentes nestas biomassas.

Martinez et al. (2021) estudando briquetes constituídos de diferentes resíduos de poda de café observaram valores médios de temperatura de pico de 550 °C, sendo os resultados abaixo do observado no presente estudo.

O processo de degradação térmica dos briquetes lignocelulósicos pode ser dividido em três principais seções (Jankovi et al., 2020): Fase 1) secagem e remoção de componentes voláteis leves (<120 °C); Fase 2) liberação dos materiais voláteis, degradação de hemiceluloses (220-315 °C) e celulose (315-400 °C), fase caracterizada pela rápida liberação de energia e combustão com chama (*flaming*); Fase 3) Por fim, a queima do carbono fixo, portanto ocorre a degradação da lignina (> 450 °C), esta fase é caracterizada pela lenta liberação de energia e ausência de chama (*smoldering*).

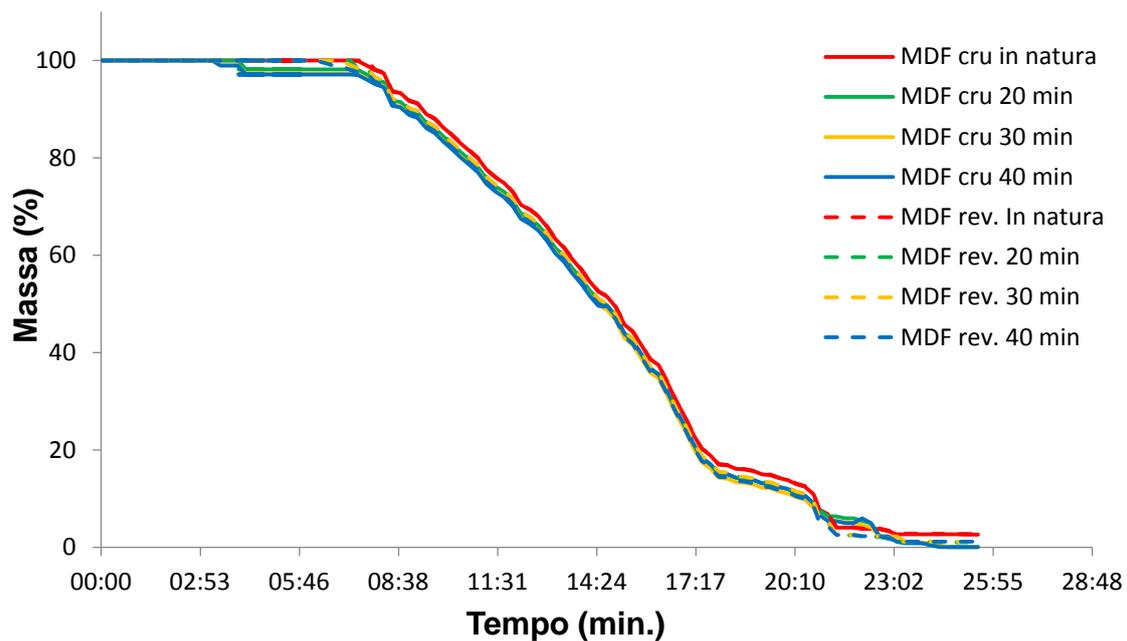
Na Figura 10, observa-se, de modo geral, uma perda de massa de 10%, durante os primeiros 8-9 minutos de queima e baixas temperaturas são observadas devido ao caráter endotermico da reação (THILIZA et al., 2020; MÍGUEZ et al., 2021). Neste intervalo de tempo, caracterizado pela primeira fase (secagem e ignição dos briquetes), o teor de umidade inicial dos briquetes estava entre 6,5 a 9,1%, o que explica este percentual de perda de massa (BAJWA et al., 2018).

A segunda fase é caracterizada pela maior parte da desvolatilização e oxidação das holoceluloses, que foi observada no intervalo de tempo de 9 a 17 minutos (Figura 10). Esta fase também é caracterizada pelas reações exotérmicas nas quais os produtos da combustão completa são CO<sub>2</sub>, vapor de água e calor (BAJWA et al., 2018; JANKOVI et al., 2020). Outra característica inerente a segunda fase da combustão é a liberação rápida de energia durante a queima dos voláteis e chamas visíveis (*flaming*). Em todos os briquetes observou-se labaredas a partir de 8 minutos. Este intervalo de tempo coincide com o ponto de fulgor, temperatura essa, necessária para que os briquetes desprendam vapores e/ou gases inflamáveis, os quais combinados com o oxigênio do ar começam a fornecer energia para o sistema,

e mantendo o fornecimento de energia, tem-se o ponto de ignição, sendo esse com temperatura acima do ponto de fulgor (MARTINEZ et al., 2021).

Observou-se a terceira fase da combustão dos briquetes, onde ocorre a liberação lenta de energia, ou seja, a queima do carbono fixo, quando as chamas se extinguíram, a partir dos 18 minutos de duração do teste de combustibilidade (Figura 10). Salienta-se que nesse intervalo de tempo, embora tenha ocorrido perda de massa do material, foi observada uma menor taxa de degradação térmica até perfil constante. Aproximadamente 83–90% da massa inicial da biomassa foi perdida nos primeiros 18 minutos.

A perda de massa dos briquetes durante o teste de combustibilidade, de modo geral, é semelhante, não observando diferenças entre os tratamentos (Figura 11). Apesar dos briquetes de MDF cru, terem promovidos os maiores picos de temperatura durante o teste de combustibilidade, nota-se que as perdas de massa foram similares, evidenciado pela sobreposição de curvas na Figura 10.



**Figura 11.** Perda de massa durante o teste de combustibilidade dos briquetes em função dos tratamentos.

As maiores perdas de massa são correlacionadas com as maiores temperaturas observadas durante o processo de combustão, resultado da liberação de material volátil presente nos briquetes avaliados. Dois picos de temperatura distintos foram observados no intervalo de 7-17 minutos, que correspondem à

hemicelulose e parte da degradação da celulose, e 17-20 minutos, que correspondem à celulose e parte da lignina (SETTER et al., 2020).

Vale salientar que na massa final resultante do processo de queima, tem-se na sua maior parte, as cinzas. Alto teor de umidade e cinzas em biomassa podem causar graves problemas de ignição e combustão, como redução do taxa de queima e o valor calorífico do combustível (MARTINEZ et al., 2021). Além disso, o ponto de fusão das cinzas coincide com as temperaturas observadas neste estudo, o que pode promover incrustação e escória dificultando a combustão (JANKOVIC et al., 2020).

De acordo com Bajwa et al. (2018) com a densificação e homogeneização da biomassa, o produto resultante tem maior densidade e liberação mais lenta de energia, devido a menor área de contato do combustível com o oxigênio. A compactação reduz a área de contato com o oxigênio, desse modo, a mistura do combustível com o comburente fica ineficiente. Contudo, observou-se que a liberação de materiais voláteis causou modificações estruturais superficiais nos briquetes, gerando um aumento nos locais livres para uma reação de oxidação, o que favorece a combustibilidade dos briquetes a partir desse ponto (THILIZA et al, 2020). Portanto, reduzindo um dos principais problemas dos briquetes como combustíveis sólidos.

## 6. CONCLUSÃO

O tempo de torrefação influenciou positivamente nas propriedades físicas e químicas dos resíduos de MDF cru e revestido, com melhores resultados de poder calorífico e carbono fixo, no tempo de 40 minutos de residência.

O rendimento gravimétrico diminuiu à medida que o tempo de torrefação aumentou. Em contrapartida, o rendimento energético no tempo de 40 minutos foi superior a 90% nos resíduos de MDF cru e revestidos em relação aos tratamentos in natura.

A maior degradação térmica ocorreu na faixa de 250-400 °C a partir dos resultados de TG/DTG para todos tratamentos avaliados. As biomassas de MDF revestido foram mais degradados para esta mesma faixa de temperatura, quando comparados aos resíduos de MDF cru.

Metais pesados tóxicos como cromo, cádmio, zinco não foram observados nas amostras de MDF cru e revestidas. Embora o chumbo no tratamento de MDF revestido torreficado por 40 minutos e bário em todos os tratamentos tenha sido observado em baixas quantidades, não desqualificam essa biomassa como fonte de energia viável em conformidade com a política nacional de resíduos sólidos.

O tempo de torrefação melhorou algumas propriedades físicas nos briquetes de MDF, como a redução da umidade de equilíbrio em todos os tratamentos. Entretanto, a carga de ruptura diminuiu com o aumento do tempo de torrefação em todos os tratamentos, sendo os menores valores de carga de ruptura para os briquetes torreficados por 40 minutos de MDF revestido e não revestido.

O aumento do tempo de torrefação melhorou significativamente a densidade energética dos briquetes, sendo os melhores resultados nos tratamentos com os briquetes de MDF cru e revestidos torreficados por 40 minutos.

A densitometria por raios X dos briquetes obteve uma forte e positiva correlação com o método gravimétrico, verificando dessa forma, a eficácia do método não destrutivo, e, além disso, permitiu avaliar a variabilidade da densidade por meio de imagens em escala 2D e 3D por meio de cores, permitindo um melhor entendimento e detalhamento sobre a qualidade dos briquetes.

O perfil de combustibilidade dos briquetes permitiu observar o comportamento de perda de massa e picos de temperatura dos briquetes de MDF.

Os briquetes de MDF tanto revestidos como os não revestidos torreficados por 40 minutos atingiram uma maior temperatura de pico.

A torrefação associada a briquetagem foi positiva na transformação dos resíduos de MDF cru e revestido em um combustível sólido tecnicamente viável.

## **7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Em função da indisponibilidade de alguns métodos disponíveis e do tempo para a conclusão desta dissertação, recomenda-se para trabalhos futuros a incorporação de estudos dos gases gerados durante a torrefação dos resíduos de painéis MDF revestidos e não revestidos e os gases da combustão dos briquetes produzidos com este material, bem como o estudo das cinzas dos briquetes pós-teste de combustibilidade.

Recomenda-se estudos de cinética da degradação térmica por cromatografia gasosa/ espectrometria de massas com acoplamento py, necessário para a identificação dos compostos voláteis orgânicos presente neste tipo de resíduo e que possuem baixo peso molecular.

Por fim, estudar outros parâmetros tempo x temperatura, com granulometria diferente da forma cúbica utilizada nesse experimento, a fim de obter maiores ganhos energéticos por tempo de tratamento térmico.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACERVO DIGITAL. **Abimóvel**: Relatório de junho/2021. Disponível em: <<http://abimovel.com/capa/acervo-digital/>>. Acesso em: 20 de junho de 2021.

ACERVO DIGITAL. **Emobile**: Indicadores do setor moveleiro. Disponível em: <<https://emobile.com.br/site/setor-moveleiro/>>. Acesso em: 20 de junho de 2021.

ACHARYA, B., DUTTA, A., & MINARET, J. Review on comparative study of dry and wet torrefaction. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, n. 12, 26–37. 2015. DOI: 10.1016/j.seta.2015.08.003

ANDRADE, C. R., BRITO, J. O., JUNIOR, A. F. D., LANA, A. Q. Changes caused by torrefaction on urban wooden waste. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 114, 275-284. 2017. DOI: 10.18671/scifor.v45n114.04

ARANTES, M. D. C., TRUGILHO, P. F., TOMAZELLO FILHO, M., LIMA, J. T. & VIDAURRE, G. B. Densitometria de raios X na madeira e carvão de clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Revista Árvore**, v. 40, 155-162, 2016. DOI: 10.1590/0100-67622016000100017

ARAÚJO, S., VILAS BOAS, M. A., NEIVA, D. M., CARNEIRO, A. C. O., VITAL, B., BREGUEZ, M., PEREIRA, H. Effect of a mild torrefaction for production of eucalypt wood briquettes under different compression pressures. **Biomass Bioenergy**, v. 90, 181–186. 2016. DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.04.007

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9484**: Compensado – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro. 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 8112**: Carvão vegetal: Análise imediata. Rio de Janeiro, 1986, 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR 9165**: Carvão vegetal: Determinação de densidade aparente. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004, NBR 10005, NBR 10006, NBR 10007**. Resíduos Sólidos urbanos para fins energéticos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 16849**. Resíduos Sólidos. Classificação. Procedimentos. Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ARTEAGA-PÉREZ, L. E., SEGURA, C., ESPINOZA, D., RADOVIC, L., JIMÉNEZ, R. Torrefaction of *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus*: A combined experimental and modeling approach to process synthesis. **Energy for Sustainable Development**. v. 29, 0-0. 2015. DOI: 10.1016/j.esd.2015.08.004.

ATES, S., KARA, H. R., OLGUN, C. & OZKAN, O. E. Effects of heat treatment on some properties of MDF (medium-density fiberboard). **Wood Material Science & Engineering**, v. 12, n. 3, 158-164. 2017. DOI: 10.1080/17480272.2015.1073176

- BACH, Q. V., CHEN, W. H., ENG, C. F., WANG, C.-W., LIANG, K.-C., & KUO, J.-Y. Pyrolysis characteristics and non-isothermal torrefaction kinetics of industrial solid wastes. **Fuel**, v. 251, 118–125. 2019. DOI:10.1016/j.fuel.2019.04.024
- BAJWA, D. S., PETERSON, T., SHARMA, N., SHOJAEIARANI, J., BAJWA, S. G. A review of densified solid biomass for energy production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 96, 296–305. 2018.
- BARSKOV, S., ZAPPI, M., BUCHIREDDY, P., DUFRECHE, S., GUILLORY, J., GANG, D., SHARP, R. Torrefaction of biomass: A review of production methods for biocoal from cultured and waste lignocellulosic feedstocks. **Renewable Energy**, v.142, 624-642. 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2019.04.068
- BRAINER, M. S. C. P. Setor moveleiro: aspectos gerais e tendências no Brasil e na área de atuação do BNB. Caderno Setorial **ETENE**, Fortaleza, v. 3, n. 34, 0-0. 2018.
- BRAND, M. A., JACINTO, R. C., ANTUNES, R., da Cunha, A. B. *Production of briquettes as a tool to optimize the use of waste from rice cultivation and industrial processing.* **Renewable Energy**, v. 111, 116–123. 2017. DOI:10.1016/j.renene.2017.03.084
- BRAND, M.A.; JUNIOR, A.L.B.; NONES, D.L.; GAA, A. Z. N. Potential of bamboo species for the production of briquettes. **Pesquisa agropecuária**, Goiânia, v. 49, 2019.
- BRASIL. Leis, decretos, etc. Lei n. 12305, de 02 de agosto de 2010. Institui a política nacional de resíduos sólidos. **Diário Oficial**, Brasília, 03 ago. 2010. Seção 1, p. 3.
- BRASIL. Leis, decretos, etc. Portaria Interministerial n. 274, de 30 de abril de 2019. Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei nº 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto nº 7.404, de 2010.. **Diário Oficial**, Brasília, 30 abril. 2019. Seção 1, p. 57.
- BREBU, M. & VASILE, C. Thermal degradation of lignin—a review. **Cellulose & Chemistry & Technology**. n. 44 v. 9, 353–363. 2010.
- BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p.68-94, 2012.
- CABAN, J., JANDACKA, J., NIEOCZYM, A., HOLUBCIK, M., VRABEL, J. Preliminary studies of fuel briquettes from wood waste. **International Scientific Conference Engineering for Rural Development**, 2021. DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF293
- CAHYANTI, M. N., KRISHNA, T. R., DODDAPANENI, C., & KIKAS, T. Biomass torrefaction: An overview on process parameters, economic and environmental aspects and recent advancements. **Bioresource Technology**, v. 301, 0-0. 2020. doi:10.1016/j.biortech.2020.122737

CARASCHI, J. C., GOVEIA, D., DEZAJACOMO, G., PRATES, M. A. Evaluation of biomass properties for the production of solid biofuels. **Floresta & Ambiente**, v. 26, n. 2, 0-0, 2019.

CARDONA, S., GALLEGO, L. J., VALENCIA, V., MARTÍNEZ, E., & RIOS, L. A. Torrefaction of eucalyptus-tree residues: A new method for energy and mass balances of the process with the best torrefaction conditions. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 31, n. 17, 0-0. 2019. DOI: 10.1016/j.seta.2018.11.002

CARNEIRO, A. D. C. O., CASTRO, A. F. N. M., CASTRO, R. V. O., SANTOS, R. C. D., FERREIRA, L. P., DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus spp.* em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, 375-381, 2014.

CARVALHO, N. R., BARROS, J. L., SILVA, D. A., NAKASHIMA, G. T., YAMAJI, F. M. Caracterização física e química da biomassa usada como combustível sólido em uma caldeira. **Química nova**, v. 44, n. 1, 35-40, 2021. DOI: 10.21577/0100-4042.20170663

CASTRO, V. R., CASTRO FREITAS, M. P., ZANUNCIO, A. J. V., ZANUNCIO, J. C., SURDI, P. G., CARNEIRO, A. D. C. O., & VITAL, B. R. Resistance of in natura and torrefied wood chips to xylophage fungi. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 1-6. 2019.

CASTRO, P. G. S., CASTRO, V. R., ZANUNCIO, A. J. V., ZANUNCIO, J. C., CARNEIRO, A. C. O., GOMINHO, J., ARAÚJO, O. S. Energetic characterization and radiographic analysis of torrefied coated MDF residues. **Scientific Reports**, v. 11, 0-0. 4899. 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-84296-5

CHAI SUWAN, N., KANSAI, N., SUPAKATA, N., PAPONG, S. The Comparison of Environmental Impacts of Carbonized Briquettes from Rain Tree Residues and Coffee Grounds/Tea Waste and Traditional Waste Management. **International Journal of Environmental Science and Development**, v.11. n. 1, 0-0. 2020. DOI: 10.18178/ijesd.2020.11.1.1224

CESPRINI, E., RESENDE, G., CAUSIN, V., URSO, T., CAVALLI, R., ZANETTI, M. Energy recovery of glued wood waste – A review. **Fuel**, v. 262. 411-421. 2020. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116520

COUTO, M.M., FRANCO, A. Management of wood residues: study in a upholstery company in zona da mata, Minas Gerais. **Brazilian Journal of Development**, v. 6. n. 3, 12518-12536. 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n3-206

CUNHA, T. Q. G., BARBOSA, P. V. G., LIMA, P. A. F., PIMENTEL, T. S., PEIXOTO, L. L. S., SETTE JÚNIOR, C. R. Characterization of MDF residue and its use in pellet production. **Nativa, Sinop**, v. 6. n. 3, 300-304. 2018. DOI: 10.31413/nativa.v6i3.5087

CRUZ, V. M. V., DANGELO, J. V. H., OLIVEIRA, V. B. L. G. Determinação do teor de lignina total em amostras do processo de extração da lignina do licor negro. **Congresso Internacional de Celulose e Papel**. São Paulo, 2019.

CZERNIK, S.; BRIDGWATER, A. V. Overview of applications of biomass fast Pyrolysis oil. **Energy & Fuels**, v. 18, 0-0. 2004

DAI, L., WANG, Y., LIU, Y., RUAN, R., HE, C., YU, Z., TIAN, X. Integrated process of lignocellulosic biomass torrefaction and pyrolysis for upgrading bio-oil production: A state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, 20–36. 2019. DOI:10.1016/j.rser.2019.02.015

DAZMIRI, M. K., KIAMAHALLEH, M. V., KIAMAHALLEH, M. V., MANSOURI, H. R., MOAZAMI, V. Revealing the impacts of recycled urea–formaldehyde wastes on the physical–mechanical properties of MDF. **European Journal Wood Products**, v. 77, 293–299. 2019. DOI: 10.1007/s00107-018-1375-z

DEBAL, M., GIRODS, P., LÉMONON, J., KARAMA, J. P., DONNOT, A., & ROGAUME, Y. TG-FTIR kinetic study of the thermal cleaning of wood laminated flooring waste. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 118. n. 1, 141–151. 2014. DOI:10.1007/s10973-014-3942-9

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN **EN 14774-2** - Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 2: Total moisture - Simplified method. Alemanha, 2009.

\_\_\_\_\_. DIN **EN 14918** - Solid Biofuels - Determination of calorific value. Germany, 2010.

\_\_\_\_\_. DIN **EN 15104** - Solid biofuels - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen - Instrumental methods. Germany, 2011.

\_\_\_\_\_. DIN **EN 15296** - Solid biofuels - Conversion of analytical results from one basis to another - Instrumental methods. Germany, 2011.

EFFENDI, A. Ã. GERHAUSER, H., BRIDGWATER, A. V. Production of renewable phenolic resins by thermochemical conversion of biomass: A review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 12, 2092–2116, 2008.

ENNAERT, T., VAN AELST, J. DIJKMANS, J., DE CLERCQ, R., SCHUTYSER, W., DUSSELIER, M., VERBOEKEND, D., SELS, B. F. Potential and challenges of zeolite chemistry in the catalytic conversion of biomass, **Chemical Society Reviews**. v. 45, 584–611. 2016.

FARAGE, R., REZENDE, A., SILVA, C., NUNES, W., CARNEIRO, A., VIEIRA, D. & RODRIGUES, C. Avaliação do potencial de aproveitamento energético dos resíduos de madeira e derivados gerados em fábricas do polo moveleiro de Ubá-MG. **Ciência Florestal**, v. 23. n. 1, 0-0. 2013 DOI: 10.5902/198050988454

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

FERREIRA, S. D., ALTAFINI, C. R., PERONDI, D. & GODINHO, M. Pyrolysis of Medium Density Fiberboard (MDF) wastes in a screw reactor. **Energy Conversion and Management**, v. 92, 223–233. 2015. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.12.032

FIALHO, L. de F., CARNEIRO, A. de C. O., CARVALHO, A. M. M. L., FIGUEIRÓ, C. G., SILVA, C. M. S. da, MAGALHÃES, M. A., & Peres, L. C. Bio-coal production with agroforestry biomasses in Brazil. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, 0–0. 2019. DOI: 10.4067/s0718-221x2019005000308

FIORONI, G., FOUTS, L., LUECKE, J., VARDON, D. Screening of Potential Biomass-Derived Streams as Fuel Blendstocks for Mixing Controlled Compression Ignition Combustion. **SAE international journal of advances and current practices in mobility**, v. 1, n. 3, 1117-1138, 2019. DOI: 10.4271/2019-01-0570

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL - **FEPAM**. Portaria Nº 001/2019. 18. jun. 2012.

GIRODS, P., DUFOUR, A., ROGAUME, Y., ROGAUME, C., ZOULALIAN, A. Thermal removal of nitrogen species from wood waste containing urea formaldehyde and melamine formaldehyde resins. **Journal of Hazardous Materials**, v. 159, 210–221. 2008.

GHAFFARI, R., DOOSTHOSSEINI, K., ABDULKHANI, A., MIRSHOKRAIE, S. A. Replacing formaldehyde by furfural in urea formaldehyde resin: Effect on formaldehyde emission and physical–mechanical properties of particleboards. **European Journal Wood Production**, v.74. n. 4, 609–616. 2016.

GOUVÊA, A. F. G., CARVALHO, A. M. M. L., SILVA, C. M., CARNEIRO, A. C. O., TRUGILHO, P. F., FREITAS, F. P., VALADARES, L. B., GOMES, C. M., COSTA, E. B. Study of the addition of lignin extracted from kraft black liquor in the mechanical properties of briquettes. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, 1029-1036. 2017.

GRASSMANN, G. S. ANDRADE, C. R., JÚNIOR, A. F. D., SILVA JÚNIOR, F. G., BRITO, J. O. Timber wastes torrefaction for energy use. **Maderas, Ciencia y Tecnología**, v. 18, n. 1, 105-112, 2016. DOI: 10.4067/S0718-221X2016005000011

HARYADI, R., VITA, M., UTAMI, I. S., IHSANUDIN, I., SETIANI, Y. & SUHERMAN, A. Briquettes production as teaching aids physics for improving science process skills. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1157. n. 3, 0-0. 2019.

HE, C., TANG, C., LI, C., YUAN, J., TRAN, K. Q., BACK, Q. V., YANG, Y. Wet torrefaction of biomass for high quality solid fuel production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 91, 259–271. 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.097

HERSEN, A., TIMOFEICZYK JUNIOR, R., SILVA, D. A., SILVA, J. C. G. L., LIMA, J. F. de. Forest-Based Industry in Paraná: Bionergy clustering and generation. **Revista Floresta**, v. 50, n. 1, 1099-1106. 2019. DOI: 10.5380/rf.v50 i1.61569

HILLIG, E. É., SCHNEIDER, V. E., PAVONI, E. T. Generation of wood waste and derivatives on furniture industry related to production's variables. **Produção**. V.19, 292–303. 2009.

HUANG, J., QIAO, Y., WANG, Z., LIU, H., WANG, B. & YU, Y. Valorization of food waste via torrefaction: Effect of food waste type on the characteristics of torrefaction products. **Energy & Fuels**. v. 34. n. 5, 6041-6051. 2020. DOI:10.1021/acs.energyfuels.0c00790

IBÁ - Relatório Anual 2020: **Indústria Brasileira de Árvores**. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>>. Acesso em: 30 de junho de 2021.

IRLE, M., PRIVAT, F., COURET, L., BELLONCLE, C., DÉROUBAIX, G., BONNIN, E. & CATHALA, B. Advanced recycling of post-consumer solid wood and MDF. **Wood Material Science & Engineering**, v. 14, n. 1, 19-23, 2019. DOI: 10.1080/17480272.2018.1427144

JANKOVI, B., MANI, M., STOJILJKOVI, D. & JOVANOVI, V. The assessment of spontaneous ignition potential of coals using TGA–DTG technique. **Combust Flame**, v. 211, 32–43. 2020. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.09.020

KARIM, M. R., NASER, J. CFD modelling of combustion and associated emission of wet woody biomass in a 4 MW moving grate boiler. **Fuel**, v. 222, 0-0. 2018. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.02.195

KHELFA, A., BENSAKHRIA, A., & WEBER, J. V. Investigations into the pyrolytic behaviour of birch wood and its main components: Primary degradation mechanisms, additivity and metallic salt effects. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 101, 111–121. 2013. DOI:10.1016/j.jaap.2013.02.004

KROOK, J., MARTENSSON, A., EKLUND, M. Sources of heavy metal contamination in Swedish wood waste used for combustion. **Waste Management**, v. 26, 158-166, 2006. DOI: 10.1016/j.wasman.2005.07.017

MAYER, F. M., TEIXEIRA, C. M., PACHECO, J. G. A., de SOUZA, C. T., BAUER, D. V., CARAMAO, E. B., ESPINDOLA J. S., TRIERWEILER, J. O., PEREZ-LOPEZ, O. W., ZINI, C. A., Characterization of analytical fast pyrolysis vapors of medium-density fibreboard (MDF) using metal modified hzsm-5. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 0-0, 2018.

MARTINEZ, C. L. M., SERMYAGINA, E., Carneiro, A. C. O., VAKKILAINEN, E., & CARDOSO, M. Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 123, 70–77. 2019 DOI:10.1016/j.biombioe.2019.02.013

MARTINEZ, C. L. M., SERMYAGINA, E., JESUS, M. S. & VAKKILAINEN, E. Use of principal component analysis to evaluate thermal properties and combustibility of coffee-pine wood briquettes. **Agronomy Research**, v. 19, 847–867. 2021. DOI: 10.15159/AR.21.098

MEDEIROS, A. D., SILVA, L. J., SILVA, J. M., DIAS, D. C. F. S. & PEREIRA, M. D. IJCropSeed: an open-access for high-throughput analysis of crop seed radiographs. **Computer and Electronics in Agriculture**, v. 175, 0-0. 2020. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105555r

MÍGUEZ, J. L., PORTEIRO, J., BEHRENDT, F., BLANCO, D., PATIÑO, D., DIEGUEZ-ALONSO, A. Review of the use of additives to mitigate operational problems associated with the combustion of biomass with high content in ash-forming species. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 141, 0-0. 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110502

MORENO, A. I., FONT, R. & CONESA, J. A. Physical and chemical evaluation of furniture waste briquettes. **Waste Management**, v. 49, 245–252. 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.01.048

MOSQUERA, L., ALLAN, A. A. A., ARRIETA, M. J. R., CATTANEO, C. R., RENE, E. R., GARCÍA-DEPRAECT, O. Production of solid biofuels from organic waste in developing countries: A review from sustainability and economic feasibility perspectives. **Science of The Total Environment**, v. 795, 0-0. 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148816

NANOU, P., HUIJGEN, W. J. J., CARBO, M. C., & KIEL, J. H. A. The role of lignin in the densification of torrefied wood in relation to the final product properties. **Biomass and Bioenergy**, v. 111, 248–262. 2018. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.05.005

NHUCHHEN, D. R.; BASU, P.; ACHARYA, B. A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. **International Journal of Renewable Energy & Biofuels**, v. 56, 2014.

ÖZYUGURAN, A. & YAMAN, S. Prediction of calorific value of biomass from proximate analysis. **Energy Procedia**. v. 107, 130–136. 2017.

PAN, L.; JIANG, Y.; WANG, L.; XU, W. Kinetic Study on the Pyrolysis of Medium Density Fiberboard: Effects of Secondary Charring Reactions. **Energies**. v. 11, 2481. 2018. DOI: 10.3390/en11092481

PENG, J. H.; BI, X. T.; SOKHANSANJ, S.; LIM, C. J. Torrefaction and densification of different species of softwood residues. **Fuel**, v. 111, p. 411-421, 2013.

PIRAYESH, H., KHANJANZADEH, H., SALARI, A. Effect of using walnut/almond shells on the physical, mechanical properties and formaldehyde emission of particleboard. **Composites Part B: Engineering**. v. 45, 858–863. 2013

PIRES, V. A. V., SILVA, M. L., SILVA, C. M., REZENDE, A. A. N., CORDEIRO, S. A., JACOVINE, L. G. A., SOARES, N. S. Viabilidade Econômica de Implantação da

Central de Gerenciamento de Resíduos no Polo Moveleiro de Ubá - MG. **Cerne**, v.14, n. 4, 295-303, 2008

POHLMANN, J. G., BORREGO, A. G., OSORIO, E., DIEZ, M. A., VILELA, A. C. F. Combustion of eucalyptus charcoals and coals of similar volatile yields aiming at blast furnace injection in a CO<sub>2</sub> mitigation environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, 1-11, 2016.

POLETTO, M., ZATTERA, A. J., SANTANA, R. M. C. Thermal decomposition of wood: kinetics and degradation mechanisms. **Bioresource Technology**. v. 126, 7-12, 2012.

PORTILHO, G. R., CASTRO, V. R., CARNEIRO, A. C. O., ZANUNCIO, J. C., ZANUNCIO, A. J. V., SURDI, P. G.; GOMINHO, J.; ARAÚJO, S. O. Potential of Briquette Produced with Torrefied Agroforestry Biomass to Generate Energy. **Forests**, v. 11, 0-0. 2020. DOI: 10.3390/f111121272

PROTÁSIO, T. de P., ALVES, I. C. N., TRUGILHO, P. F., SILVA, V. O., BALIZA, A. E. R. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, 273-283, 2011. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.68.273

QUIRINO, W. F., PINHA, I. V. O., MOREIRA, A. C. O., SOUZA, F., & TOMAZELLO FILHO, M. X Ray densitometry for waste wood briquetts analysis. **Scientia agrícola**, v.96, n. 40, 525–536. 2012.

RANGEL, I. C., SILVA, F. F. da., SOUZA, C. L. M de., ERTHAL JÚNIOR, M., GRAVINA, A.; SHIMOYA, A. Normas e padrões para produção de biomassa compactada no mundo: em breve o Brasil terá a sua? **Acta Biomedica Brasiliensia**, v. 9, n. 1, 17-35, 2018.

ROUSSEAU, D. Fast virtual histology using X-ray in-line phase tomography: application to the 3D anatomy of maize developing seeds. **Plant Methods**. v. 11, 1-10. 2015. DOI: 10.1186/s13007-015-0098-y

SABINO, T. P. F., SURDI, P. G., VILELA, A. P., METZKER, S. L. O., COELHO, N. P. F., OLIVEIRA, T. J. P., MENDES, R. F. Effect of the post-heat treatment on the properties of medium density particleboard of *Eucalyptus sp.* **Floresta e Ambiente**, v. 28, n. 3. 2021. DOI:10.1590/2179-8087-FLORAM-2020-0079.

SANTOS, R. E. dos, SANTOS, I. F. S. dos, BARROS, R. M., BERNAL, A. P., TIAGO FILHO, G. L. & SILVA, F. das G. B. da. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 231, 198–206. 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.10.015

SETTER, C., SILVA, F. T. M., ASSIS, M. R., ATAÍDE, C. H., TRUGILHO, P. F., OLIVEIRA, T. J. P. Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: characterization of the solid and liquid fractions. **Fuel**, v. 261, 116420. 2020.

SETTER, C., ATAÍDE, C. H., MENDES, R. F., OLIVEIRA, T. J. P. Influence of particle size on the physico-mechanical and energy properties of briquettes produced with coffee husks. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, 8215–8223. 2021. DOI: 10.1007/s11356-020-11124-0

SILVA, D. A., NAKASHIMA, G. T., BARROS, J. L., DA ROZ, A. L., YAMAJI, F. M. Caracterização de biomassas para a briquetagem. **Floresta**, v. 45. n. 4. 713-722. 2015. DOI: 10.5380/ufv.v45i4.39700

SILVA, V. V., SIQUEIRA, W. C., ABRAHÃO, S. A., MORALES, M. M., GUEDES, D. M. Production and physical-mechanical characterization of briquettes, made by woodwork waste, for energy purposes. **Brazilian Journal of Development**, v. 9, n.7, 8880-8903. 2019. DOI:10.34117/bjdv5n7-093

SOUZA, F. de; VALE, A. T. do. Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, 405-413, 2016.

SOUZA, A. J., JEREMIAS, T. D., GONZALEZ, A. R. & AMORIN, H. J. Assessment of melamine-coated MDF surface finish after peripheral milling under different cutting conditions. **European Journal Wood Products**. 77, 559–568. 2019. DOI: 10.1007/s00107-019-01413-y

SOTANDE, O. A. OLUYEGE and ABAH G. B. Physical and combustion properties of briquette of sawdust from *Azadiratha indica*, **Journal of Forestry Research**, v. 21. v. 1, 377-381. 2010.

SPEROTTO, F. Q. Setor moveleiro brasileiro e gaúcho: características, configuração e perspectiva. **Indicadores Econômicos FEE**, Porto Alegre v. 45, n. 4, 43- 60, 2018.

STEFANOWSKI, B., CURLING, S., ORMONDROYD, G. Evaluating mould colonisation and growth on MDF panels modified to sequester volatile organic compounds. **International Wood Products Journal**. v. 7. 188-194. 2016

SUHARDI, B., ANISA, N. & LAKSONO, P. W. Minimizing waste using lean manufacturing and ECRS principle in Indonesian furniture industry. **Cogent Engineering**, v. 6. n.1, 0-0. 2019. DOI: 10.1080/23311916.2019.1567019.

TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI test methods** T 204 cm-88: solvent extractives of wood and pulp. 1996.

\_\_\_\_\_. **TAPPI test methods** T 222 om-02. Acid-insoluble lignin in wood and pulp. 2002c, 5 p.

\_\_\_\_\_. **TAPPI test methods** T 249 cm-02, Carbohydrate composition of extractive-free wood and wood pulp by gas-liquid chromatography. 2002.

TOMELERI, J. O. P., VARANDA, L. D., PITOMBO, L. M., YAMAJI, F. M., PÁDUA, F. A. Influence of Non-Lignocellulosic Elements on the Combustion of Treated Wood and Wooden Panel. **Sustainability**, v. 13, 0-0. 2021. DOI: 10.3390/su13095161

- VALETTE, N., Perrot T, SORMANI, R., GELHAYE, E., MOREL-ROUHIER, M. Antifungal activities of wood extractives. **Fungal Biology Reviews**, v. 31(3), 113-123. 2017. DOI: 10.1016/j.fbr.2017.01.002
- VAN DEN BOSSCHE, G., VANGEEL, T., AELST, K. V., TRULLEMANS, L., NAVARE, K., BOSH, S. V. D., ACKER, K. V., SELS, B. F. Reductive Catalytic Fractionation: From Waste Wood to Functional Phenolic Oligomers for Attractive, Value-Added Applications. **American Chemical Society**, v. 1377, 37-60. 2021. DOI: 10.1021/bk-2021-1377.ch003
- VAN DER STELT, M.J.C.; GERHAUSER, H.; KIEL, J.H.A.; PTASINSKI, K.J. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass and bioenergy**, v. 35, 3748-3762. 2011. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.06.023
- VICHAPHUND, S., AHT-ONG, D., SRICHAROENCHAIKUL, V., ATONG, D. Catalytic upgrading pyrolysis vapors of Jatropha waste using metal promoted ZSM-5 catalysts: An analytical Py-GC/MS, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, 0-0. 2014
- VITAL, B. R. **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa: SIF. Boletim Técnico, n.1, 21. 1984.
- WANG, N., ZHAN, H., ZHUANG, X., XU, B., YIN, X., WANG, X. & WU, C. Torrefaction of waste wood-based panels: More understanding from the combination of upgrading and denitrogenation properties. **Fuel Processing Technology**, v. 206, 106462. 2020. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106462
- WATERS, C. L., JANUPALA, R. R., MALLINSON, R. G., & LOBBAN, L. L. Staged thermal fractionation for segregation of lignin and cellulose pyrolysis products: An experimental study of residence time and temperature effects. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, n. 126, 380–389. 2017. DOI:10.1016/j.jaap.2017.05.008
- WEBER, C., IWAKIRI, S. Utilização de resíduos de compensados, MDF e MDP para produção de painéis aglomerados. **Ciência Florestal**. v. 25, n. 2. 406-413. 2015