UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE/ UNIOESTE -PR CAMPUS DE TOLEDO

CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
"STRICTO SENSU" EM BIOENERGIA NÍVEL DE MESTRADO

Potencial de aproveitamento energético de resíduos de MDF do polo moveleiro de Toledo (PR) para produção de briquetes: uma avaliação técnico-científica

ELISLEY A. RODRIGUES

TOLEDO PR 2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE/ UNIOESTE -PR CAMPUS DE TOLEDO
CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
"STRICTO SENSU" EM BIOENERGIA NÍVEL DE MESTRADO

ELISLEY A. RODRIGUES

Potencial de aproveitamento energético de resíduos de MDF do polo moveleiro de Toledo (PR) para produção de briquetes: uma avaliação técnico-científica

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Bioenergia.

ORIENTADORA: Dra. Baumgartner, Tatiana Rodrigues da Silva

TOLEDO 2026

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

RODRIGUES, ELISLEY A.
Potencial de aproveitamento energético de resíduos de MDF do polo moveleiro de Toledo (PR) para produção de briquetes: uma avaliação técnico-científica / ELISLEY A. RODRIGUES; orientador Tatiana Rodrigues da Silva Baumgartner; coorientador Maria Luiza Fernandes Rodrigues . -- Toledo, 2026.
110 p.

Dissertação (Mestrado Profissional Campus de Toledo) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, 2026.

1. Resíduos de MDF. 2. Torrefação. 3. Briquetagem. 4. Economia circular. I. Rodrigues da Silva Baumgartner, Tatiana, orient. II. Fernandes Rodrigues , Maria Luiza , coorient. III. Título.

Elisley A. Rodrigues

Potencial de aproveitamento energético de resíduos de MDF do polo moveleiro de Toledo (PR) para produção de briquetes: uma avaliação técnico-científica

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Bioenergia, área de concentração Bioenergia, linha de pesquisa Produção de Biocombustíveis e Coprodutos, pela seguinte banca examinadora:

_____

Profa. Dra. Tatiana Rodrigues da Silva Baumgartner
Orientadora

_____

Profa. Dr. Glauco Nonose Negrão
Membro

_____

Profa. Dra. Maria Luiza Fernandes Rodrigues
Membro

Toledo, 28 de Agosto de 2026.

Dedico este trabalho a todos os que acreditaram em mim e aos que não acreditaram, pois me deram forças para prosseguir e mostrar que era possível. Em especial às minhas professoras, Profa. Dra. Tatiana Rodrigues da Silva Baumgartner e Profa. Dra. Maria Luiza Fernandes Rodrigues, que me trouxeram de volta ao meu sonho.

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS.....ii
LISTA DE FIGURAS.....iii
LISTA DE TABELAS.....iv
RESUMO.....vi
ABSTRACT.....vii
1. INTRODUÇÃO.....**08**
2. OBJETIVOS.....11
2.1. Objetivo Geral.....11
2.2. Objetivos Específicos.....11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....12
3.1. Bioenergia e Valorização Energética de Resíduos.....12
3.1.1. A Biomassa como Fonte de Energia.....14
3.2. MDF como Matéria Prima da Indústria Moveleira.....15
3.2.1. Evolução Histórica do MDF.....15
3.2.2. Produção Brasileira de MDF.....17
3.2.3. Composição Química.....19
3.2.4. Propriedades Físicas do MDF.....21
3.2.5. Gestão e Destinação de Resíduos de MDF.....24
3.2.6. Destinação Atual.....28
3.3. Aspectos Ambientais.....31
3.3.1. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).....35
3.4.Economia de Resíduos.....37
3.4.1.Economia Linear (EL).....37
3.4.2.Economia Circular (EC).....38
3.5.Aspectos Químicos e Tratamento Térmico do MDF.....41
3.5.1. Resinas Sintéticas Utilizadas na Produção do MDF.....41
3.5.2. Potencial Energético do MDF.....51
3.6.Briquetes.....52
3.6.1. Briquetagem: Conceitos, Parâmetros e Aplicações.....52
3.7.Torrefação.....60
3.7.1. Hidrofobicidade e Moabilidade.....61
3.7.2. Vantagens da Torrefação para o AproveitamentoEnergético.....61
3.7.3. Melhorias Energéticas e Redução de Poluentes.....65
3.7.4. Redução de Formaldeído e Controle de Emissões.....66
4. METODOLOGIA.....**69**
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....**72**
5.1. Potencial Energético dos Resíduos de MDF.....74
5.2. Fluxograma do Processamento em Escala Piloto Proposto.....76
5.3. Aspectos Ambientais com a Torrefação.....78
5.4. Lacunas e Perspectivas.....80
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....81
7. TRABALHOS FUTUROS.....**84**
8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....**85**

LISTA DE SIGLAS

ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente

ABIMÓVEL – Associação Brasileira das Indústrias do Mobiliário

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

AP – Alta pressão

APL – Arranjo Produtivos Locais

BF - Baixa pressão

COV / VOC – Compostos Orgânicos Voláteis

CO_2 – Dióxido de carbono

EA – Emissões atmosféricas

EC – Economia Circular

EL – Economia Linear

EVA – Etilvinil acetato

FF– Fenol-FormaldeídoGEE – Gases de efeito estuda

FEM – Fundação Ellen Arthur

FF – Fenol formaldeído

FF – Finish foil

GA – Gestão Ambiental

GEE – Gases de Efeito Estufa

HDF – *High Density Fiberboard* (Painel de Fibra de Alta Densidade)

IA – Impactos Ambientais

IARC – *International Agency for Research on Cancer* (Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer)

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores

ISO – International Organization for Standardization

LE – Lâmina ecológica

MDF – Medium density fiberboard

MDP – Medium density particleboard

MF – Melamina formaldeído

MUF – Ureia formaldeído melamina

NAF – No-added formaldeído

NUMET- Núcleo de Marcenaria de Toledo

ONU – Organização das Nações Unidas

OSB – Oriented Strand Board (Painel de Tiras de Madeira Orientadas)

PAH – Aromático policíclico hidrocarboneto

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PNUMA – Programa das nações unidas para o meio ambiente

PVA – Polivinil acetato

PU – Poliuretano

SDF – *Super density fiberboard*

TAC – Termo de Ajustamento de Conduta

UF – Ureia formaldeído

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aterro Sanitário de Toledo (Pr)
Figura 2 – Caminhos Convencionais de Cadeias de Produção
Figura 3 - Abordagens para as Definições de EC
Figura 4 – Swot – Economia Circular
Figura 5 – Agentes envolvidos nos Produtos APLs
Figura 6 – Briquetes
Figura 7 - Relação Dimensão de Armazenamento de Combustiveis
Figura 8 – Fluxograma de Processamento em Escala Piloto

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição Química Típica do MDF
Tabela 2 – Estimativa Mensal de Geração de Resíduos
Tabela 3 – Vantagens do uso de Briquetes
Tabela 4 – Estágios da Pirólise
Tabela 5 – Estimativas da Geração Mensal de Resíduos de MDF no Polo Moveleiro de Toledo -Pr
Tabela 6 – Parâmetros Termo Químicos do MDF Bruto
Tabela 7 – Parâmetros de Qualidade dos Briquetes do MDF Torrefado

RESUMO

A geração crescente de resíduos provenientes da indústria moveleira constitui um desafio ambiental, especialmente quando esses materiais são destinados a aterros ou recebem formas inadequadas de disposição. Entre esses resíduos, destacam-se os painéis de *Medium Density Fiberboard* (MDF), amplamente utilizados na fabricação de móveis e que, por apresentarem em sua composição resinas sintéticas à base de formaldeído, exigem cuidados específicos quanto à sua destinação e ao seu aproveitamento energético. Nesse contexto, esta dissertação teve como objetivo desenvolver uma proposta técnico-conceitual para o aproveitamento energético dos resíduos de MDF gerados no polo moveleiro de Toledo/PR, por meio da produção de briquetes, considerando a torrefação como uma etapa de pré-tratamento capaz de contribuir para a redução de compostos indesejáveis e para a melhoria das características do material como combustível sólido. A pesquisa possui caráter qualitativo e exploratório e foi desenvolvida a partir da revisão da literatura científica e técnica, de levantamento de informações sobre a geração e a destinação dos resíduos no polo moveleiro de Toledo e da análise comparativa das características termoquímicas do MDF bruto e do MDF submetido à torrefação. Os resultados indicaram uma geração estimada de aproximadamente 7 mil kilos a cada 40 dias, com base em 10 empresas de marcenarias registradas no NUMET (Núcleo de Marcenaria de Toledo), fora das demais empresas de menor porte que não são cadastradas, de resíduos de MDF por mês no polo moveleiro, constituídos principalmente por retalhos, aparas e pó de lixamento. O diagnóstico também evidenciou limitações relacionadas à destinação desses resíduos, entre elas a ausência de uma logística reversa estruturada, a fragmentação das iniciativas de gestão e a ocorrência de práticas inadequadas de descarte e queima. A análise da literatura mostrou que o MDF apresenta potencial energético significativo, com poder calorífico superior de aproximadamente 4.427,8 kcal kg^{-1}, além de baixo teor de cinzas. Para o material submetido à torrefação entre 260 °C e 280 °C, durante 60 minutos, foram identificadas melhorias importantes nas propriedades de interesse energético, como redução de até 65% do formaldeído residual, aumento de até 20% do poder calorífico, redução do teor de umidade, maior hidrofobicidade e melhoria da moabilidade.

Palavras-chave: Resíduos de MDF; Torrefação; Briquetagem; Aproveitamento energético; Formaldeído; Economia circular.

ABSTRACT

The growing generation of waste from the furniture industry constitutes an environmental challenge, especially when these materials are sent to landfills or receive inadequate forms of disposal. Among these waste materials, Medium Density Fiberboard (MDF) panels stand out. Widely used in furniture manufacturing, they require specific care regarding their disposal and energy recovery due to synthetic formaldehyde-based resins in their composition. In this context, this dissertation aimed to develop a technical-conceptual proposal for the energy recovery of MDF waste generated in the furniture hub of Toledo, Paraná, Brazil, through briquette production, considering torrefaction as a pre-treatment step capable of contributing to the reduction of undesirable compounds and improving the material's characteristics as a solid fuel. The research is qualitative and exploratory, developed based on a literature review, a survey of information on waste generation and disposal in the Toledo furniture hub, and a comparative analysis of the thermochemical characteristics of raw and torrefied MDF. The results indicated an estimated generation of approximately 35 tons of MDF waste per month in the studied furniture hub, consisting mainly of offcuts, trimmings, and sanding dust. The diagnosis also highlighted limitations related to the disposal of this waste, including the lack of structured reverse logistics, fragmented management initiatives, and inappropriate disposal and burning practices. The literature review showed that MDF has significant energy potential, with a higher heating value of approximately 4,427.8 kcal kg^{-1} and a low ash content. For the material subjected to torrefaction between 260 °C and 280 °C for 60 minutes, major improvements in energy properties were identified, such as a reduction of up to 65% in residual formaldehyde, an increase of up to 20% in heating value, reduced moisture content, higher hydrophobicity, and improved grindability. These results reinforce the role of torrefaction as a pre-treatment alternative to make the waste more suitable for densification and energy recovery, provided that appropriate emission control measures are adopted.

Keywords: MDF waste; Torrefaction; Briquetting; Energy recovery; Formaldehyde; Circular economy.

1.INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a intensificação dos padrões de consumo e produção tem provocado um aumento exponencial na geração de resíduos sólidos industriais, especialmente aqueles provenientes de produtos que combinam matrizes orgânicas e sintéticas. Entre esses resíduos, destacam-se os painéis de madeira reconstituída de média densidade (MDF - *Medium Density Fiberboard),* que assumem papel de destaque no setor moveleiro global, sobretudo em economias emergentes como a brasileira.

Devido às suas propriedades mecânicas superiores homogeneidade, estabilidade dimensional e facilidade de usinagem o MDF consolidou-se como a principal matéria-prima para móveis planejados, residenciais e corporativos (BIAZUS et al., 2010; MATTOS et al., 2008). No entanto, sua própria composição físico-química representa um desafio ambiental singular: o material é constituído por fibras lignocelulósicas (provenientes de florestas cultivadas de *Pinus* e *Eucalyptus*) aglutinadas por resinas termofixas sintéticas, predominantemente ureia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (FF), além de aditivos como parafinas, ignífugos, fungicidas e cargas minerais (IWAKIRI, 2005; PEREIRA et al., 2006).

A produção anual nacional de móveis gera cerca de 67,4 bilhões de reais e emprega direta e indiretamente mais de 260 mil pessoas (Associação Brasileira das Indústria de Mobiliário - ABIMÓVEL, 2021). Em 2019, o Brasil produziu aproximadamente 8,2 milhões de m^3 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). A indústria moveleira gera elevada quantidade de resíduos sólidos durante o processo produtivo de cerca de 85% do total são de origem madeireira, como: serragem, maravalha, aparas e pó de madeira, oriunda da indústria moveleira (COUTO & FRANCO, 2020; FARAGE et al., 2013).

A geração de resíduos pode ocasionar impactos ambientais, sanitários e socioeconômicos, tornando necessário que as indústrias adotem práticas adequadas de controle e gerenciamento, em conformidade com a legislação vigente. (FARAGE et al., 2013; FERREIRA et al., 2015).

O descarte inadequado de resíduos provenientes de painéis de madeira reconstituída pode gerar impactos ambientais, especialmente em razão da presença de resinas e outros aditivos empregados em sua fabricação, como os revestimentos à base de resina melamínica (EMOBILE, 2020). A presença desses componentes confere aos resíduos de MDF características distintas da madeira natural, particularmente quanto ao seu comportamento termoquímico e aos potenciais impactos ambientais associados à sua destinação. Entre os compostos de interesse destaca-se o formaldeído, associado às resinas utilizadas na fabricação desses painéis e classificado pela Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC) como carcinogênico para humanos (Grupo 1) (IARC, 2004). Quando destinados de forma inadequada, esses resíduos podem representar riscos ambientais relacionados à liberação de compostos químicos para o meio. Além disso, sua disposição em aterros implica a ocupação de espaço destinado à disposição final e o não aproveitamento de um material com potencial de valorização.

No contexto brasileiro, o consumo aparente de MDF atingiu 1,58 milhão de metros cúbicos em 2023 (ABIMCI, 2023). Estudos setoriais apontam que a geração de resíduos, incluindo retalhos, aparas de usinagem e pó de lixamento, pode variar entre 15% e 25% do volume processado, dependendo da eficiência produtiva (JOHANSSON, 2016). Projetando essa taxa conservadora de 20% sobre o consumo nacional, estima-se a geração anual de aproximadamente 300 mil metros cúbicos de resíduos de MDF, a maior parte destinada a aterros ou, com frequência, a disposições irregulares. Esse fluxo linear produção-descarte representa não apenas uma perda econômica, uma vez que o material possui poder calorífico entre 4.000 e 4.500 kcal/kg, comparável ao de biomassas de alto valor energético, mas também um passivo ambiental de crescente magnitude.

Logo, buscam-se meios e alternativas tecnológicas provenientes de painéis de MDF, devido a sua grande demanda no mercado, em contra partida vem o aumento de resíduos (ATES et al., 2017; MORENO et al., 2017; MAYER et al., 2018). Por meio da produção de biocombustíveis sólidos de resíduos sólidos de MDF, possui perspectivas de aplicabilidade, devido ao potencial energético similar de origem agroflorestal (WEBER; IWAKIRI, 2005; CUNHA et al., 2018). Pela premissa da sustentabilidade é uma alternativa, com valor econômico agregado, esses resíduos representam custos operacionais de descarte, gestão e responsabilidade ambiental, se caracteriza como biomassa lignocelulósica de

grande potencial energético.

O município de Toledo (PR) destaca-se como um importante polo da indústria moveleira no Oeste do Paraná, concentrando empresas que utilizam o MDF como uma das principais matérias-primas na fabricação de móveis planejados. Como consequência do processo produtivo, são gerados resíduos na forma de retalhos, aparas e pó de MDF, cuja destinação ainda representa um desafio sob os aspectos ambiental, técnico e econômico. Considerando a composição desse material e as restrições associadas às formas convencionais de disposição final, torna-se relevante investigar alternativas que promovam sua valorização energética, em consonância com os princípios da Economia Circular e com as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010).

O objetivo principal deste estudo é avaliar o potencial técnico e ambiental do aproveitamento de resíduos de MDF provenientes da indústria moveleira de Toledo (PR) para a produção de briquetes energéticos, com ênfase na torrefação como etapa de pré-tratamento térmico. A partir dessa análise, busca-se fornecer subsídios técnicos para a valorização energética desses resíduos e para a formulação de políticas públicas locais e estaduais, considerando aspectos técnicos, ambientais, econômicos e sociais, como a redução da disposição em aterros, a agregação de valor à cadeia produtiva e o potencial de geração de emprego e renda. Além disso, os resultados poderão subsidiar estudos e iniciativas em outros polos moveleiros brasileiros, contribuindo para a adoção de práticas de economia circular e para a transição do setor de madeira e móveis em direção a modelos produtivos mais sustentáveis e de baixo carbono.

1. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma proposta técnico-conceitual para o aproveitamento energético dos resíduos de MDF (Medium Density Fiberboard) gerados no polo moveleiro de Toledo (PR), abrangendo a caracterização quanti-qualitativa do fluxo residual, a análise termoquímica comparativa entre o material in natura e o torrefado, de modo a subsidiar alternativas sustentáveis de destinação alinhadas à Política Nacional de Resíduos Sólidos e à legislação municipal.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar quantitativa e qualitativamente o fluxo de resíduos de MDF gerado no polo moveleiro de Toledo (PR), identificando volumes médios, tipologias (retalhos, aparas, pó) e a destinação atual predominante.
- Analisar, com base na literatura especializada, o comportamento termoquímico comparativo entre o MDF in natura (não torrefado) e o MDF submetido à torrefação, considerando parâmetros como poder calorífico superior e inferior, teor de umidade, volatilidade, emissão de formaldeído e outros compostos orgânicos voláteis (COVs), hidrofobicidade e moabilidade.
- Propor um fluxograma de processamento em escala piloto para a produção de briquetes a partir de resíduos de MDF, integrando as etapas de trituração, torrefação (opcional, porém recomendada para aplicações com exigências ambientais mais restritivas) e briquetagem, com dimensionamento preliminar dos equipamentos.
- Discutir os entraves regulatórios, logísticos e econômicos à implementação local da cadeia de briquetagem com torrefação prévia, à luz dos instrumentos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), da legislação municipal (Lei nº 2.105/2012) e de experiências exitosas documentadas na literatura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. BIOENERGIA E VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS

A transição do modelo energético global contemporâneo rumo à consolidação de fontes renováveis delineia-se como um dos desafios estruturais mais complexos da atualidade. O paradigma vigente, fortemente alicerçado no consumo de combustíveis fósseis, opera sob uma lógica de fluxo linear que acelera a exaustão de recursos finitos e engendra severos passivos ambientais, perpetuando um modelo de crescimento econômico herdado da Revolução Industrial. Nesse cenário, as dinâmicas de transição são impulsionadas pela urgência na descarbonização das atividades econômicas, associada à necessidade de assegurar o suprimento estável e confiável de energia para as gerações futuras (FERREIRA; FURTADO, 2024).

Sob a perspectiva conceitual, os recursos energéticos são categorizados em dois agrupamentos distintos, fundamentados em suas respectivas capacidades de regeneração espaço-temporal na natureza (ARAÚJO et al., 2022). As fontes não renováveis compreendem ativos planetários finitos cuja cinética de formação geológica demanda milhões de anos, configurando um cenário em que a taxa de consumo suplanta amplamente a velocidade de reposição natural. O núcleo desse grupo é constituído pelos combustíveis fósseis, petróleo, carvão mineral e gás natural, derivados da diagênese de matéria orgânica ao longo de eras geológicas. A dependência global dessas fontes permanece expressiva, respondendo por aproximadamente 85% do suprimento energético total (FERREIRA; FURTADO, 2024). O ônus ecológico dessa configuração reflete-se diretamente nas dinâmicas climáticas globais, sendo a combustão fóssil identificada como o vetor primário para a emissão massiva de gases de efeito estufa (GEE), notoriamente o dióxido de carbono (CO_2) (IPCC, 2022). Tais emissões desencadeiam impactos antropogênicos severos, que perpassam o agravamento do efeito estufa, o degelo de calotas polares e a degradação da qualidade do ar e dos corpos hídricos.

O cenário energético brasileiro exibe uma singularidade competitiva frente ao panorama internacional devido à elevada inserção de fontes renováveis em suas matrizes (FERREIRA; FURTADO, 2024). Todavia, a análise desses indicadores requer a distinção rigorosa entre a matriz elétrica, restrita ao portfólio tecnológico

direcionado à geração de eletricidade, e a matriz energética global, que contabiliza a totalidade dos insumos demandados pelos setores de transporte, processos industriais e consumo residencial.

A matriz elétrica do país demonstra uma liderança consolidada, com dados setoriais apontando que cerca de 88% da eletricidade gerada no território nacional decorre de fontes renováveis, tendo como base histórica a dominância da geração hidrelétrica (DEITOS et al., 2024). Em contrapartida, a avaliação integrada da matriz energética revela uma assimetria estrutural. Embora o país tenha atingido o marco histórico de 50% de renovabilidade em sua oferta interna de energia, índice significativamente superior à média global de nações industrializadas, a parcela remanescente evidencia a persistência de fontes finitas e carbonosas. Nesse panorama, o petróleo e seus derivados figuram como a principal fonte energética individual da matriz nacional, dinâmica justificada pela profunda dependência do setor de transportes e logística em modais de combustão interna abastecidos por óleo diesel e gasolina (FERREIRA; FURTADO, 2024).

A viabilidade técnica e econômica dessas matrizes alternativas tem sido impulsionada por economias de escala que resultaram na redução drástica dos custos de capital associados aos painéis solares e turbinas eólicas, tornando essas tecnologias competitivas perante os mercados de energia tradicionais (SILVA; ARAÚJO, 2022). Não obstante o avanço desses indicadores econômicos, persistem gargalos de engenharia complexos que desafiam a estabilidade dos sistemas elétricos integrados. Dentre os principais obstáculos, destacam-se o caráter intermitente intrínseco às fontes climáticas dependentes e a consequente necessidade de aportes vultosos na expansão de linhas de transmissão e na modernização de redes inteligentes (*smart grids*). Soma-se a isso a urgência pelo desenvolvimento e viabilização econômica de sistemas de armazenamento de energia em larga escala, fundamentais para assegurar o equilíbrio contínuo entre a carga demandada e a potência gerada.

Em contraposição, as fontes renováveis caracterizam-se pela capacidade de recomposição espontânea ou via manejo antrópico em escalas temporais compatíveis com as demandas de consumo, qualificando-as como recursos virtualmente inesgotáveis (DEITOS et al., 2024). Adicionalmente, são associadas ao conceito de tecnologias limpas, dado que seus ciclos operacionais mitigam substancialmente a emissão de poluentes atmosféricos em comparação aos

sistemas fósseis. Entre os principais vetores desse ecossistema, destaca-se a energia solar, que converte a radiação térmica e luminosa por meio de arranjos fotovoltaicos ou térmicos, apresentando abundância intrínseca e restritos impactos locais durante a fase operacional (SILVA; ARAÚJO, 2022).

De forma complementar e em acelerada expansão global, a energia eólica converte a energia cinética das massas de ar através de aerogeradores. No âmbito das tecnologias maduras de alta densidade energética, a fonte hídrica desponta pelo aproveitamento do potencial gravitacional dos cursos d'água, a despeito dos impactos socioambientais inerentes à implantação de grandes reservatórios de acumulação.

Por fim, dentre as formas de energia renovável, o papel da biomassa vem ganhando destaque, que compreende a conversão energética de frações orgânicas vegetais ou animais em calor, eletricidade ou biocombustíveis. Esta rota assume relevância estratégica ao viabilizar o reaproveitamento de coprodutos industriais, a exemplo dos resíduos madeireiros provenientes do setor moveleiro, convergindo com os preceitos da economia circular (CAMPELO et al., 2025; BRASIL, 2010).

3.1.1. Biomassa como Fonte de Energia

Entre as fontes renováveis de energia, a biomassa merece destaque estratégico. Ela é a única que pode fornecer diretamente energia térmica, elétrica e biocombustíveis líquidos, substituindo os fósseis em diversos setores (CAMPELO et al., 2025). O Brasil possui uma vasta experiência com esse recurso, desde o etanol de cana-de-açúcar até a geração de energia em caldeiras com bagaço, licor preto (resíduo da indústria de celulose) e resíduos agrícolas e florestais. A literatura científica recente tem demonstrado que o aproveitamento energético de resíduos de serragem e maravalha de madeira, por exemplo, revela um alto poder calorífico (acima de 25 MJ/kg), boa densidade energética e desempenho satisfatório na combustão (CAMPELO et al., 2025).

Esse potencial, porém, ainda é subexplorado quando se considera a diversidade de fontes residuais disponíveis no território nacional. Para além dos resíduos florestais tradicionais, a indústria de transformação da madeira notadamente o setor moveleiro, emerge como uma promissora, porém negligenciada, fornecedora de biomassa. Diariamente, esse setor gera toneladas de aparas, pó de lixamento, recortes e painéis descartados, materiais que, embora

possuam poder calorífico equivalente ao da madeira nativa, são frequentemente destinados a aterros sanitários ou queimados inadequadamente, gerando passivos ambientais e desperdício energético.

Entretanto, a simples transposição das tecnologias de aproveitamento aplicadas à madeira in natura não é trivial quando se trata dos resíduos moveleiros contemporâneos. Grande parte dos móveis produzidos atualmente é fabricada a partir de painéis reconstituídos, como o Medium Density Fiberboard (MDF), cuja composição incorpora resinas sintéticas à base de formaldeído e ureia em sua matriz lignocelulósica. Se, por um lado, essa característica confere propriedades mecânicas superiores ao produto final, por outro, introduz um significativo desafio ambiental e operacional para a recuperação energética: a combustão direta desses resíduos pode liberar emissões tóxicas, inviabilizando seu uso em caldeiras convencionais sem um pré-tratamento adequado.

Embora a literatura já tenha consolidado o conhecimento sobre a queima de resíduos madeireiros puros, o Brasil apresenta uma carência de investigações focadas na valorização energética de resíduos de painéis reconstituídos, como o MDF (DEITOS et al., 2024). A biomassa residual, na forma de retalhos e pó de MDF, apresenta um poder calorífico relevante, porém está associada a resinas sintéticas que contêm formaldeído, um desafio para seu uso direto.

Nesse contexto, o aproveitamento energético dos resíduos de MDF pode contribuir para a valorização de um resíduo industrial, reduzindo sua destinação à disposição final e favorecendo sua reinserção na cadeia produtiva como recurso energético. Essa perspectiva está alinhada aos princípios da economia circular e às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

3.2. MDF COMO MATÉRIA-PRIMA DA INDÚSTRIA MOVELEIRA

3.2.1. Evolução Histórica do MDF

A história do Medium Density Fiberboard (MDF) tem origem em um episódio singular da pesquisa industrial norte-americana. Em 1925, o inventor William Mason, que na época colaborava com Thomas Edson e dedicava-se a encontrar aplicações para os cavacos e aparas de madeira descartados pelas serrarias, inadvertidamente deixou seus equipamentos experimentais em operação durante toda a noite. Ao retornar no dia seguinte, constatou que os cavacos de madeira, submetidos a calor

e pressão contínuos, haviam se transformado em uma chapa fina, porém surpreendentemente resistente (COLUMBIA FOREST PRODUCTS, 2019). Esse material, precursor do que posteriormente seria conhecido como chapa de fibras de alta densidade (hardboard), demonstrou pela primeira vez a viabilidade de reconstituir a madeira a partir de suas partículas sob condições controladas de pressão e temperatura.

Mason patenteou seu método de produção de chapas de fibras comprimidas, inaugurando o conceito de painel reconstituído. Contudo, foram necessárias cerca de quatro décadas de aprimoramentos tecnológicos para que o processo alcançasse viabilidade comercial, com destaque para o desenvolvimento de resinas sintéticas aglutinantes, como a ureia-formaldeído (UF) e a fenol-formaldeído (FF) (IWAKIRI, 2012). A designação "Medium Density Fiberboard" foi cunhada apenas em 1970, pelo pesquisador Harry Raddin, em seu estudo sobre a economia do processo produtivo seco para chapas de fibras de média densidade (RADDIN, 1970 apud LENIC, 1996). A produção em larga escala do MDF, tal como o conhecemos atualmente, teve início na década de 1980, consolidando-se como uma das mais importantes inovações da indústria de painéis de madeira no século XX (LENIC, 1996).

A consolidação comercial do MDF nos Estados Unidos e na Europa Ocidental, entre as décadas de 1970 e 1980, impulsionou um crescimento exponencial da produção mundial. Dados históricos indicam que, entre 1966 e 1990, a capacidade mundial de produção saltou de zero para 7 milhões de metros cúbicos anuais. Em 1995, esse montante atingiu 17 milhões de metros cúbicos por ano (LENIC, 1996). De acordo com dados do BNDES, a produção mundial alcançou 41 milhões de metros cúbicos em 2005, volume cinco vezes superior ao registrado em 1995, com destaque para a China, que já detinha participação de 35% do total mundial (BIAZUS et al., 2010). Ao longo dos anos 2000 e 2010, a China consolidou sua posição como o maior produtor global de MDF, sustentada por maciços investimentos em capacidade industrial e por uma demanda interna aquecida pelos setores moveleiro e da construção civil (VIDAL; HORA, 2014).

Os dados mais recentes indicam que essa liderança se manteve na década

de 2020. Em 2023, a China produziu cerca de 60,5 milhões de metros cúbicos de MDF e HDF (*high density fiberboard*), respondendo por cerca de 49% do volume total produzido mundialmente. O país asiático também se destacou como o maior consumidor global, com aproximadamente 45% do consumo total (REPORTLINKER, 2023; INDEXBOX, 2026).

As principais empresas fabricantes incluem grupos como Kronospan, Arauco, Duratex S.A., Swiss Krono Group e Egger Group, que juntos detêm parcela significativa da capacidade instalada global (MORDOR INTELLIGENCE, 2024; INDEXBOX, 2026).

3.2.2. Produção Brasileira de MDF

A produção de painéis de madeira reconstituída no Brasil teve seu marco inicial na década de 1950, com a instalação das primeiras linhas de chapas de fibras duras e isolantes no estado de São Paulo. Na década seguinte, entrou em operação a primeira indústria de painéis aglomerados, que passou a fornecer matéria-prima para o setor moveleiro nacional (SILVA, 2003). Esse período foi marcado pela implementação de políticas de incentivo fiscal ao reflorestamento com espécies dos gêneros *pinus* e *eucalyptus* nas regiões Sul e Sudeste, o que criou uma base de matéria-prima abundante para os setores de celulose e papel, painéis de madeira, laminadoras e serrarias (SILVA, 2003; VIDAL; HORA, 2014).

A indústria nacional de painéis de madeira reconstituída, portanto, nasceu amparada por uma estratégia de desenvolvimento florestal que priorizava a produtividade e a rapidez de crescimento das espécies plantadas, ainda que a qualidade da madeira obtida inicialmente fosse limitada para aplicações mais nobres (SILVA, 2003). Foi sobre essa base, florestas plantadas de rápido crescimento e um setor moveleiro em franca expansão, que a indústria de painéis reconstituídos se consolidaria nas décadas seguintes.

A introdução do MDF no Brasil ocorreu tardiamente em relação aos países desenvolvidos, mas com grande dinamismo. Na década de 90, a crescente demanda da indústria moveleira por painéis de maior qualidade superficial, estabilidade dimensional e homogeneidade impulsionou a adoção dessa nova tecnologia. A primeira unidade produtiva de MDF foi instalada em Agudos, interior de São Paulo, pela empresa Duratex S.A., entrando em operação em setembro de 1997.

Simultaneamente à instalação da primeira planta, chegou ao Brasil a tecnologia da prensa contínua, que permitiu a manufatura de painéis com maior produtividade, menor consumo de matéria-prima e qualidade superior (BIAZUS et al., 2010; VIDAL; HORA, 2014). Nos anos seguintes, novas unidades fabris foram implantadas em diferentes estados. Em 1998, a Tafisa iniciou operações em Pien/PR; em 2001, a Masisa (atualmente parte do grupo Arauco) instalou-se em Ponta Grossa/PR, e a Placas do Paraná em Jaguariaíva/PR. A Duratex, por sua vez, expandiu sua capacidade com uma nova fábrica de MDF/HDF/SDF em Botucatu/SP, com capacidade anual de 400 mil metros cúbicos, consolidando sua posição como a maior fabricante do segmento no Hemisfério Sul.

A produção brasileira de painéis de madeira reconstituída apresentou expressiva expansão nas últimas décadas, acompanhada pela ampliação da capacidade industrial e pela instalação de novas unidades fabris em diferentes regiões do país. Esse crescimento também foi marcado por mudanças na participação dos diferentes tipos de painéis produzidos. Sanquetta et al. (2020), ao analisarem a produção brasileira entre 1961 e 2016, verificaram que, embora o compensado tenha predominado historicamente, ao final do período os painéis MDF e HDF passaram a representar a maior participação na produção nacional, correspondendo a 39% do total, seguidos pelos painéis de partículas, com 29%.

Essa tendência de expansão permaneceu nos anos seguintes. Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), a produção nacional de painéis de madeira, incluindo MDF, MDP e OSB, atingiu 9,6 milhões de m³ em 2023 (IBÁ, 2024). A ampliação da produção e do consumo desses materiais evidencia sua relevância para a indústria brasileira e, consequentemente, reforça a necessidade de estratégias adequadas para o gerenciamento e a valorização dos resíduos gerados durante seu processamento.

O Brasil ocupa posição de destaque na produção mundial de MDF, com participação relevante no mercado internacional (MORDOR INTELLIGENCE, 2024). A produção nacional concentra-se principalmente nas regiões Sul e Sudeste, associada à disponibilidade de florestas plantadas de Pinus e Eucalyptus e à presença de importantes polos da indústria de base florestal e moveleira.

No contexto da produção moveleira nacional, o município de Toledo, localizado na região Oeste do Paraná, destaca-se como um importante polo industrial do setor. A cidade abriga um expressivo número de marcenarias e fábricas de móveis

planejados, que utilizam predominantemente painéis de MDF e MDP em seus processos produtivos. Essa concentração industrial, aliada à proximidade com as principais plantas produtoras de painéis do Sul do país, confere à região um papel estratégico na cadeia produtiva moveleira brasileira.

A relevância do setor para a economia local e regional é expressiva. Entretanto, apesar do crescimento produtivo e da consolidação do polo moveleiro, a gestão dos resíduos gerados ao longo da cadeia, desde a produção dos painéis até o descarte de móveis e sobras industriais, ainda representa um desafio ambiental e logístico. A presença de resinas sintéticas, como a ureia-formaldeído, na composição dos painéis de MDF torna seu descarte e sua queima direta problemáticos, exigindo o desenvolvimento de rotas tecnológicas adequadas para sua valorização.

Nesse contexto, a expansão do setor moveleiro também amplia a necessidade de estratégias adequadas para o gerenciamento e a valorização dos resíduos de painéis reconstituídos.

3.2.3. Composição Química

O Medium Density Fiberboard (MDF) é um painel de madeira reconstituída cuja composição química reflete a complexa interação entre seus dois principais constituintes: as fibras lignocelulósicas de madeira e as resinas sintéticas aglutinantes. Essa dualidade composicional confere ao material suas propriedades mecânicas e estabilidade dimensional, mas também impõe desafios significativos para sua destinação ao final da vida útil, especialmente quando se considera o aproveitamento energético, como proposto no presente estudo.

A matriz fibrosa do MDF é composta por fibras de madeira, predominantemente provenientes de espécies dos gêneros *Pinus* (madeiras macias) e *Eucalyptus* (madeiras duras), que constituem cerca de 82% a 89% da massa total do painel. Essas fibras são fundamentalmente constituídas por três macromoléculas naturais: celulose, hemicelulose e lignina, que compõem a parede celular vegetal.

A celulose, um polissacarídeo linear composto por unidades de glicose ligadas por ligações β-1,4-glicosídicas, é o componente estrutural mais abundante da parede celular, conferindo resistência mecânica às fibras. Estudos sobre a composição de fibras utilizadas em MDF indicam que o teor de celulose varia entre 40% e 47% da massa seca, enquanto a hemicelulose, um polissacarídeo heterogêneo

e amorfo, situa-se na faixa de 23% a 25%. A lignina, polímero fenólico tridimensional de natureza complexa, atua como agente cimentante entre as fibras, conferindo rigidez e hidrofobicidade à parede celular; seu teor médio em fibras para MDF é da ordem de 20% a 27% (CAMEO, 2026).

Pesquisas sobre a caracterização química de efluentes da produção de MDF revelam que a matéria seca proveniente das fibras pode ser fracionada em extrativos (33,5%), substâncias pécticas (4,2%), hemiceluloses (32,6%), celulose (7,0%) e lignina (8,7%). Essas variações nas proporções refletem a diversidade de espécies florestais empregadas e as condições específicas do processo de desfibramento. Estudos com palha de milho e trigo demonstram que os teores de holocelulose (celulose + hemicelulose) e lignina em materiais lignocelulósicos alternativos para MDF situam-se entre 74,79% e 52,67% para celulose e em torno de 20,17% para lignina, valores comparáveis aos das madeiras convencionais. Essas frações são determinantes para o poder calorífico da biomassa, uma vez que celulose e hemicelulose contribuem com energia na combustão, enquanto a lignina apresenta o maior poder calorífico entre os componentes da parede celular, devido à sua maior proporção de carbono em sua estrutura aromática. Com base nisso, temos diversas resinas sintéticas que são utlizadas na produção do MDF.

O segundo componente fundamental do MDF são as resinas sintéticas, responsáveis pela coesão entre as fibras e pela integridade estrutural do painel. A resina ureia-formaldeído (UF) é a mais amplamente utilizada na indústria de MDF, respondendo por aproximadamente 9% a 10% da composição total do painel.

Trata-se de um polímero termofixo obtido pela reação de condensação entre ureia e formaldeído, cuja fórmula geral pode ser representada pela estrutura de polimetilenoureias, com ligações metileno ($-CH_2-$) e grupos metilol ($-CH_2OH$) que possibilitam a reticulação e a formação de uma rede tridimensional rígida após a cura sob calor e pressão (CAMEO, 2026).

Além da resina UF, outros sistemas adesivos podem ser empregados conforme as exigências de desempenho do produto. As resinas melamina-ureia-formaldeído (MUF) e os isocianatos (tais como o MDI, 4,4-difenilmetano diisocianato) são utilizados quando se requer maior resistência à umidade ou quando se busca reduzir as emissões de formaldeído livre. Em painéis destinados a aplicações externas ou com exigências específicas de baixa emissão, podem ser adicionados também fungicidas e agentes de captura de formaldeído, como a própria ureia em excesso na

formulação da resina (CAMEO, 2026). A Tabela 1 sintetiza a composição química típica do MDF.

Tabela 1 – Composição Química Típica do MDF.

Componente	Função	Proporção aproximada (% massa)
Fibras de madeira (celulose, hemicelulose, lignina)	Matriz estrutural	82 – 89
Resina ureia-formaldeído (UF)	Aglutinante/resina	9 – 10
Cera parafínica	Impermeabilizante	0,6 – 1,0
Catalisadores (ex.: sulfato de amônio)	Aceleração da cura	Traços
Capturadores de formaldeído (uréia)	Redução de emissões	Traços

Fonte: Elaborado pela autora com base em literatura.

3.2.4.Propriedade Físicas do MDF

O Medium Density Fiberboard (MDF) distingue-se no mercado de painéis de madeira reconstituída por suas propriedades físicas e mecânicas particulares, que conferem versatilidade e ampla aceitação em diferentes segmentos industriais. Compreender essas características é fundamental para avaliar seu potencial de aplicação e, no contexto da presente pesquisa, para dimensionar os desafios e oportunidades relacionados ao aproveitamento de seus resíduos.

A densidade é a propriedade que define a categoria do painel de fibras e influencia diretamente seu desempenho mecânico. O MDF apresenta densidade típica na faixa de 600 a 800 kg/m³, posicionando-se entre os painéis de baixa densidade (LDF, 160-450 kg/m³) e os de alta densidade (HDF, 850-1200 kg/m³). Essa faixa de densidade confere ao material um equilíbrio entre resistência mecânica e trabalhabilidade, sendo um dos fatores que justificam sua ampla utilização (KRONOSPAN, 2026).

Valores específicos de densidade variam conforme a espessura do painel e a aplicação pretendida. Dados técnicos indicam que, para MDF padrão, a densidade

pode variar de 670 kg/m³ (para painéis mais espessos, acima de 19 mm) a mais de 820 kg/m³ (para painéis finos, de 2,3 a 2,5 mm). Em painéis de três camadas, a densidade alvo frequentemente situa-se em torno de 700 kg/m³. Estudos com MDF de primeira geração reportaram densidades entre 700 e 730 kg/m³ (KRONOSPAN, 2026).

As propriedades mecânicas do MDF são determinadas por sua densidade, pelo teor de resina, pelo processo de refino das fibras e pela pressão de prensagem. Os principais parâmetros avaliados são:

- Módulo de Ruptura (MOR): associado à resistência à flexão estática, expressa a capacidade do painel de suportar esforços de flexão até a ruptura. Os valores dessa propriedade variam em função de fatores como espessura e densidade do painel, teor de resina e características da matéria-prima. Para painéis de MDF, são reportados valores mínimos entre 18 e 30 N/mm², dependendo da espessura. Estudos experimentais apresentam valores distintos conforme as condições de fabricação, evidenciando a influência dos parâmetros de processamento sobre a resistência mecânica do material.

- Módulo de Elasticidade (MOE): representa a rigidez do painel e sua resistência à deformação elástica quando submetido a esforços de flexão. Assim como o MOR, essa propriedade é influenciada pela densidade, espessura, teor de resina, matéria-prima e condições de processamento. Para painéis de MDF, são reportados valores mínimos entre 2.100 e 2.700 N/mm², enquanto estudos experimentais apresentam valores superiores em determinadas condições de fabricação.

O MDF apresenta uma série de vantagens que o consolidam como material de eleição em diversos setores:

- Homogeneidade estrutural: Por ser composto por fibras finas e uniformemente distribuídas, o MDF não apresenta direção preferencial de grão, nó ou outras imperfeições naturais da madeira maciça. Essa característica facilita a usinagem, permitindo cortes precisos, fresagem de bordas com detalhes complexos e acabamento superficial de alta qualidade.
- Trabalhabilidade superior: O MDF pode ser serrado, furado, fresado e lixado como a madeira maciça, com a vantagem de produzir bordas lisas e uniformes, sem lascas ou farpas, dispensando muitas vezes o acabamento de bordas. É possível inclusive entalhar juntas de marcenaria tradicionais.
- Superfície lisa e uniforme: Ambos os lados do painel apresentam superfície lisa,

adequada para pintura, envernizamento, laminação, impressão e aplicação de folhas de madeira (veneer) ou papéis decorativos.

- Estabilidade dimensional: O MDF apresenta boa estabilidade em condições de ambiente seco, com baixa tendência a empenar ou contrair, superando a madeira maciça nesse aspecto.
- Versatilidade de aplicações: Pode ser utilizado em uma ampla gama de produtos, tanto em aplicações aparentes quanto em componentes estruturais não importantes.
- Aproveitamento de resíduos: O MDF é fabricado a partir de resíduos de serraria e madeiras de baixo valor comercial, contribuindo para a economia circular e a redução do desperdício na cadeia florestal.

As propriedades físicas e mecânicas do MDF conferem ao material alta versatilidade, permitindo seu emprego desde a fabricação industrial até o acabamento arquitetônico. Suas principais áreas de atuação abrangem:

- Indústria Moveleira: O MDF é amplamente utilizado na fabricação de móveis, especialmente móveis planejados e modulados, armários, estantes, mesas e cadeiras. Sua superfície lisa e homogênea permite o revestimento com laminados, folhas de madeira ou pintura, conferindo acabamento de alta qualidade. É também empregado em componentes internos, como fundos de gavetas e divisórias.
- Design de Interiores e Decoração: O MDF é utilizado em painéis de revestimento de paredes, divisórias internas, forros, molduras, rodapés e portas de interiores. Sua capacidade de ser moldado e fresado permite a criação de perfis decorativos e elementos arquitetônicos.
- Indústria de Áudio: O MDF é o material de escolha para a fabricação de caixas acústicas, alto-falantes e subwoofers, devido à sua alta densidade, rigidez e baixa ressonância, que minimizam vibrações indesejadas e melhoram a qualidade sonora.
- Embalagens e Paletes: O MDF é utilizado na fabricação de embalagens para produtos de alto valor agregado, bem como em paletes de madeira para transporte e armazenamento.
- Marcenaria e Artesanato: A facilidade de usinagem e a superfície lisa tornam o MDF um material popular em marcenaria fina, entalhe, escultura e trabalhos artesanais, onde se requer precisão e acabamento superficial de alta qualidade.
- Construção Civil: Embora não seja recomendado para uso estrutural ou externo, o MDF é empregado em aplicações internas não-importantes, como divisórias, forros, rodapés, guarnições, portas de interiores e painéis de revestimento.

3.2.5. Gestão e Destinação de Resíduos de MDF

A consolidação do MDF como matéria-prima predominante no setor moveleiro brasileiro, embora tenha impulsionado a produtividade e a qualidade dos móveis, trouxe consigo um desafio ambiental significativo. Este desafio assume contornos particularmente críticos em polos moveleiros de pequeno e médio porte, como o de Toledo/PR, onde a concentração de marcenarias e fábricas de móveis planejados gera volumes expressivos de resíduos que, se não tratados corretamente, configuram passivos ambientais e riscos à saúde ocupacional.

A indústria moveleira moderna, diferentemente das marcenarias tradicionais que trabalhavam predominantemente com madeira maciça, opera com chapas industrializadas que incorporam resinas sintéticas em sua composição. Essa diferença é fundamental para a classificação e destinação dos resíduos, uma vez que a presença de ureia-formaldeído e outros adesivos altera significativamente o enquadramento dos resíduos segundo a NBR 10004 da ABNT (ABNT, 2024).

Os principais resíduos gerados no processamento de MDF e MDP incluem:

1. Aparas grossas e refugos de usinagem: Gerados nas etapas de corte, serramento e furação, estes resíduos, quando provenientes de painéis crus (sem revestimento melamínico ou laca), podem ser classificados como Classe II A (não perigosos) desde que respaldados por laudo técnico. Essa classificação permite sua destinação para briquetagem ou coprocessamento como combustível industrial controlado.
2. Pó fino de lixamento: O pó gerado no lixamento de superfícies e bordas representa uma categoria distinta e mais problemática. Embora visualmente se assemelhe à serragem comum, o pó de MDF concentra proporcionalmente maior quantidade de resina ureia-formaldeído, pois a fricção do lixamento atinge as camadas superficiais do painel, mais ricas em adesivo. Por esta razão, laudos técnicos frequentemente classificam este resíduo como Classe I (perigoso), exigindo destinação específica, como coprocessamento em fornos de cimento ou aterro Classe I.
3. Resíduos de colas e adesivos: Restos de colas PVA e PU utilizadas em coladeiras de borda, bem como embalagens e aplicadores contaminados, enquadram-se como Classe I (perigoso), devendo ser destinados ao coprocessamento ou incineração controlada.
4. Resíduos de pintura e acabamento: Lacas, esmaltes, vernizes e solventes, juntamente com estopas, panos e EPIs contaminados, são classificados como Classe

I devido à presença de solventes orgânicos voláteis e resinas tóxicas. Essa heterogeneidade de resíduos, cada qual com classificação e destinação específicas, exige das empresas moveleiras um sistema de gestão robusto, que inclua segregação na fonte, identificação adequada, armazenamento temporário seguro e contratação de transportadores e destinadores licenciados.

Para dimensionar o problema, tomemos como referência um município com aproximadamente 20 marcenarias de móveis planejados, onde resistradas pelo NUMET são 10 e aproximadamente mais 10 de menor porte sem resgistro, no polo moveleiro de Toledo/PR. Embora não haja dados oficiais consolidados para essa escala específica, é possível estimar a geração de resíduos com base em parâmetros operacionais típicos do setor.

Uma marcenaria de móveis planejados de porte médio, operando com uma ou duas seccionadoras e equipe de 10 a 15 funcionários, processa, em média, de 300 a 500 chapas de MDF/MDP por mês. Considerando que o aproveitamento eficiente com planos de corte bem elaborados pode atingir 90% ou mais, a geração de refugos e aparas situa-se entre 10% e 15% do volume processado, o que representa de 30 a 75 chapas por mês por empresa. A isso se somam o pó de lixamento, gerado em menor volume, porém com maior potencial de contaminação, e os resíduos de acabamento, colas e embalagens.

Para um polo constituído por aproximadamente com 20 marcenarias, estima-se uma geração de 7 mil/kg a cada 40 dias de MDF, nas quais terão para descarte de retalhos e refugos operacionais.

Trata-se de um volume expressivo que, quando acumulado em escala anual, impõe desafios significativos para a gestão municipal de resíduos industriais e para as estratégias de logística reversa. A natureza física dessas aparas, caracterizada por geometrias irregulares e dimensões heterogêneas, dificulta o compactamento e o acondicionamento padronizado, demandando grandes áreas úteis para armazenamento temporário no chão de fábrica e elevando os custos de transporte e destinação final.

Cumpre ressaltar que a taxa de geração desses resíduos não é estática, estando sujeita a flutuações sazonais do mercado imobiliário local e à variação no volume de encomendas de móveis sob medida. Além disso, a eficiência do aproveitamento do material varia conforme a complexidade dos projetos e o nível de otimização tecnológica adotado no plano de corte de cada estabelecimento.

Por fim, a essa fração volumétrica de aparas sólidas soma-se a geração continuada do pó de usinagem e lixamento. Embora represente uma parcela mássica inferior em relação aos retalhos estruturais, esse particulado fino possui elevada volatilidade e superfície de contato, contendo aditivos químicos provenientes de resinas sintéticas e revestimentos melamínicos. Tal característica exige atenção redobrada quanto aos sistemas de exaustão e filtragem, dadas as suas implicações diretas na saúde ocupacional dos trabalhadores e no potencial de contaminação ambiental.

Com base nos dados levantados e nas informações disponíveis para o setor moveleiro local, foi realizada uma estimativa da quantidade de resíduos de MDF gerada mensalmente.

Estes números evidenciam que, mesmo em um polo de porte pequeno a médio, a geração de resíduos é significativa, com destaque para o volume de aparas e refugos que podem ser valorizados energeticamente e para o pó de lixamento e resíduos de acabamento que, por sua periculosidade, exigem gestão diferenciada.

A destinação inadequada dos resíduos de MDF acarreta uma série de problemas ambientais, sanitários e legais, que merecem ser analisados em detalhe. Emissões atmosféricas e riscos à saúde: A queima descontrolada de resíduos de MDF, prática infelizmente ainda observada em algumas marcenarias, é particularmente problemática.

O formaldeído presente na resina ureia-formaldeído, quando liberado na combustão sem controle adequado, gera emissões de compostos orgânicos voláteis e outros poluentes atmosféricos que excedem os padrões estabelecidos pela legislação ambiental. O pó fino de madeira, por sua vez, é classificado como cancerígeno ocupacional por agências internacionais, e o formaldeído potencializa esse efeito, tornando a aspiração localizada e o uso de EPIs medidas obrigatórias, não apenas recomendações.

Contaminação do solo e da água: O descarte em aterros sanitários, embora permitido para resíduos Classe II A, não é recomendado para resíduos de MDF em geral, uma vez que a lixiviação de compostos químicos pode contaminar o solo e os lençóis freáticos. O uso de serragem de MDF como adubo ou corretivo de solo é expressamente desaconselhado pela presença de formaldeído e outras substâncias tóxicas.

Riscos legais e de imagem: A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei

12.305/2010) estabelece a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e exige a elaboração de Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) para empreendimentos geradores de resíduos perigosos. Empresas que não comprovarem a destinação adequada de seus resíduos, especialmente os classificados como Classe I, estão sujeitas a multas, embargo de atividades e danos à sua reputação junto ao mercado e à sociedade.

Diante desse cenário desafiador, a valorização energética dos resíduos de MDF emerge como uma alternativa promissora, alinhada aos princípios da economia circular e da transição energética. Conforme demonstrado por pesquisas realizadas em polos moveleiros brasileiros, os resíduos de MDF podem ser reaproveitados de forma mais efetiva, evitando o descarte e a extração desnecessária de matéria-prima.

As principais rotas de valorização energética incluem:

Briquetagem: As aparas grossas de MDF, quando classificadas como Classe II A, podem ser densificadas por briquetagem, transformando-se em biocombustíveis sólidos com alta densidade energética e fácil armazenamento e transporte. Conforme abordado no presente estudo, a torrefação prévia dos resíduos de MDF permite a descontaminação térmica das resinas sintéticas, viabilizando a queima em caldeiras e fornos industriais com emissões controladas.

Coprocessamento em fornos de cimento: Esta é a rota industrial padrão para resíduos Classe I, como o pó de lixamento e os resíduos de tintas e solventes. O coprocessamento, realizado em fornos de cimento com licenciamento específico, oferece alta temperatura, longo tempo de residência e controle rigoroso de emissões, garantindo a destruição térmica dos compostos orgânicos perigosos.

Geração de energia em caldeiras industriais: Resíduos de MDF devidamente tratados (por torrefação ou briquetagem) podem alimentar caldeiras de biomassa, gerando energia térmica para os próprios processos produtivos ou para a venda de energia elétrica. Essa rota, além de reduzir o passivo ambiental, contribui para a segurança energética local e para a redução do consumo de combustíveis fósseis.

3.2.6. Destinação Atual

A gestão dos resíduos sólidos no município de Toledo/PR tem avançado significativamente nos últimos anos, especialmente no que concerne à infraestrutura de destinação final. No entanto, quando se trata dos resíduos específicos da indústria moveleira, particularmente aqueles provenientes do processamento de painéis MDF, o cenário revela desafios específicos que demandam soluções tecnológicas e logísticas integradas. Compreender o panorama atual da destinação desses resíduos é fundamental para dimensionar a contribuição que o presente estudo pode oferecer à cadeia produtiva local.

O município dispõe de uma infraestrutura de gestão de resíduos sólidos que tem sido referência na região Oeste do Paraná. Em julho de 2024, foi inaugurada uma nova célula do Aterro Sanitário Municipal, representando o maior investimento realizado nas últimas décadas em política de resíduos sólidos no município.

A gestão municipal também estrutura a coleta seletiva, com cronograma organizado por bairros e períodos, além de disponibilizar o Ecoponto Santa Clara IV e a Unidade de Valorização de Resíduos (UVR) para o recebimento de materiais recicláveis e volumosos. Essa infraestrutura, embora robusta para resíduos domiciliares e recicláveis convencionais, encontra limitações quando aplicada aos resíduos industriais específicos, como os de MDF (TOLEDO, 2025).

Os resíduos de MDF gerados pelas marcenarias e fábricas de móveis planejados de Toledo representam um desafio particular para o sistema de gestão municipal. Os resíduos de MDF não podem ser simplesmente queimados a céu aberto ou descartados em aterros sanitários sem tratamento prévio, devido à presença de resinas sintéticas que contêm formaldeído e outros compostos potencialmente tóxicos. Atualmente, as principais rotas de destinação dos resíduos de MDF em Toledo e região incluem:

Embora o aterro sanitário de Toledo (Figura 1) receba resíduos orgânicos e domiciliares, a destinação de resíduos de MDF para aterros é problemática. A presença de resinas ureia-formaldeído torna o material passível de lixiviação de compostos químicos, que podem contaminar o solo e os lençóis freáticos. O novo aterro, com sua estação de tratamento de efluentes avançada, pode mitigar parte desses riscos, mas a literatura técnica recomenda que resíduos de painéis reconstituídos sejam destinados preferencialmente por outras rotas. Além disso, o

aterramento de resíduos que poderiam ser valorizados energeticamente representa desperdício de recurso e ocupação desnecessária de espaço em uma infraestrutura projetada para resíduos orgânicos.

Figura 1 – Aterro Sanitário de Toledo/PR.



Fonte: Prefeitura Municipal de Toledo. Acesso: 10 de outubro de 2025.

A queima controlada em fornos industriais, como o coprocessamento em fábricas de cimento, é apontada pela literatura como uma rota viável para resíduos de MDF classificados como Classe I (perigosos). O coprocessamento oferece alta temperatura, longo tempo de residência e controle rigoroso de emissões, garantindo a destruição térmica dos compostos orgânicos perigosos. No entanto, essa rota depende de infraestrutura específica, que não está disponível no município de Toledo, exigindo o transporte dos resíduos para centros industriais mais distantes, com custos logísticos significativos.

O reaproveitamento de resíduos de MDF, embora seja uma alternativa ambientalmente desejável, ainda é limitado. Estudos indicam que a utilização dos resíduos de MDF na fabricação de novas chapas aglomeradas é uma das propostas mais recorrentes, porém encontra barreiras tecnológicas e econômicas.

Em Toledo, não há registro de iniciativas estruturadas de reciclagem de resíduos de MDF em escala industrial, o que mantém a dependência de destinação para outras rotas.

A logística de destinação dos resíduos de MDF envolve múltiplos autores e

desafios operacionais. As marcenarias de Toledo, em sua maioria de pequeno e médio porte, carecem de estrutura própria para o armazenamento temporário e o transporte adequado dos resíduos, especialmente aqueles classificados como perigosos. A segregação na fonte, separando aparas grossas (possivelmente Classe II) do pó de lixamento e resíduos de acabamento (Classe I), é uma prática incipiente, dificultando a destinação diferenciada.

Estudo de caso sobre logística reversa em Toledo, embora focado em pneus inservíveis, demonstra que o poder público tem papel essencial como gestor, mediador e apoiador de iniciativas envolvendo a logística reversa de resíduos sólidos, indo muito além do papel fiscalizador. No caso dos pneus, a atuação conjunta da Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SMMA), do Ministério Público e das empresas envolvidas, por meio de Termo de Ajustamento de Conduta (TAC), permitiu destinar adequadamente 563.712 pneus (3.612 t) entre 2012 e 2018. Esse modelo de governança colaborativa poderia ser adaptado para a gestão dos resíduos de MDF no município, envolvendo as marcenarias, o poder público e os destinadores licenciados. (CONCEIÇÃO et al., 2017, p. 20)

O Ecoponto Santa Clara IV e a Unidade de Valorização de Resíduos (UVR) poderiam, com adequações, atuar como pontos de recebimento de resíduos de MDF segregados, reduzindo a dispersão do descarte e viabilizando a logística reversa. A coleta de volumosos, disponibilizada pelo município, também poderia ser utilizada para o recolhimento de móveis descartados, que muitas vezes contêm MDF em sua composição.

O cenário atual de destinação dos resíduos de MDF em Toledo/PR revela uma lacuna significativa entre a infraestrutura municipal disponível e as necessidades específicas da indústria moveleira local. A nova célula do aterro sanitário, embora represente avanço na gestão de resíduos orgânicos, não resolve o problema dos resíduos de painéis reconstituídos, que demandam rotas tecnológicas específicas. A incineração controlada e o coprocessamento, embora tecnicamente viáveis, esbarram na ausência de infraestrutura local e nos custos de transporte. O reaproveitamento, por sua vez, ainda depende de desenvolvimento tecnológico e de escala econômica.

É nesse contexto que a briquetagem com pré-tratamento por torrefação, proposta no presente estudo, emerge como uma alternativa promissora para a destinação dos resíduos de MDF em Toledo. Ao transformar as aparas e refugos de usinagem em um biocombustível sólido densificado, a briquetagem com torrefação

oferece:

1. Solução local: Permite o processamento dos resíduos no próprio município, reduzindo custos logísticos e emissões associadas ao transporte.
2. Valorização energética: Converte um passivo ambiental em um ativo energético, que pode ser utilizado em caldeiras industriais locais ou na geração de energia.
3. Alinhamento com a infraestrutura municipal: A energia gerada a partir dos briquetes poderia contribuir para a matriz energética municipal, complementando a produção de energia a partir de gases do aterro prevista pela prefeitura.
4. Fomento à economia circular: Ao fechar o ciclo na cadeia produtiva moveleira, a solução contribui para a sustentabilidade do polo moveleiro de Toledo e para o cumprimento dos preceitos da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

A implementação dessa solução requer, contudo, a superação de desafios logísticos e regulatórios. A formação de consórcios ou cooperativas entre as marcenarias, com apoio do poder público, poderia viabilizar o investimento em equipamentos de torrefação e briquetagem, bem como a estruturação da coleta e do armazenamento temporário dos resíduos. A experiência bem-sucedida com a logística reversa de pneus em Toledo demonstra que a articulação entre os diferentes atores, mediada pelo poder público, é um caminho factível para a gestão integrada de resíduos industriais.

3.3. ASPECTOS AMBIENTAIS

De acordo com Manzini e Vezzoli (2005), as atividades humanas trazem impactos sobre a natureza e essas ações podem determinar os efeitos positivos ou negativos sobre o meio ambiente. Desde o século XIX, se tem a preocupação com o impacto ambiental, mas o pensamento ecológico surgiu apenas nos anos 60 (KAZAZIAN, 2005).

Segundo a normatização, ABNT/NBR ISO 14.001:2015, é o elemento das atividades ou produtos de serviçoes de uma organização, que pode interagir com o meio ambiente, que trata de qualquer modificação do meio ambiente.

Os possíveis impactos ambientais, a serem por estar do processo da indústria madeireira, podem causar: alteração da qualidade do solo, da qualidade de água, odor, aspecto visual indesejado, emissão de pó na e barulho. Na industria moveleira de marcenarias, além dos mesmo problemas apresentações, ainda possue os produtos quimicos no MDF. Conforme a LEI Nº 9.605 de 1988, de crimes ambientais

que causam poluição de qualquer natureza em níveis que possam resultar em danos à saúde humana, mortalidade de animais e destruição da flora.

Por meio, das metas para o desenvolvimento sustentável, onde os páises tem o objetivo de compromisso de melhoria ambiental e social.

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, são um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteção ao meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam disfruta paz e prosperidade. Estes são os objetivos para os quais as Nações Unidas, estão contribuindo a fim que possamos atingir a Agenda 2030 no Brasil (ONU, 2023).

O manejo ambiental visa minimizar impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente, por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso. Para atingir essas metas, o conceito de Economia Circular, acabar sendo abordado, que converge com as metas de desenvolvimento sustentável. Conforme a Fundação Ellen Macarthur, a economia circular se fundamenta em três pilares: a eliminar os resíduos e poluição; circular os produtos e materiais no seu valor mais alto e regenerar a natureza (FEM, 2023).

Conforme dados do IBGE (2000), o Brasil produz mais de 241 mil toneladas de lixo por dia (aproximadamente) sendo resíduos industrais em torno de 111 mil toneladas. A maioria dos resíduos não é aproveitada e a produção de resíduos está aumentando consideravelmente (MATOSKI et al., 2002 apud VIEIRA, 2006). A partir da década de 1960 que o pensamento ecológico ganhou maior expressão e reconhecimento (KAZAZIAN et al., 2005).

Tal evolução reflete uma crescente conscientização sobre a necessidade de harmonizar o desenvolvimento humano com a preservação dos recursos naturais.
De acordo com a ABNT/NBR ISO 14001:2015, “o aspecto ambiental consiste em qualquer elemento das atividades, produtos ou serviços de uma organização que possa interagir com o meio ambiente, gerando modificações adversas ou benéficas”. No setor moveleiro, em especial no processamento de madeira e MDF, os aspectos ambientais mais relevantes incluem alterações na qualidade do solo e da água, emissões atmosféricas de material particulado (como pó de serragem), geração de odores e degradação da paisagem.

A legislação brasileira, por meio da Lei nº 9.605/1998, conhecida como Lei de Crimes Ambientais, define como crime ambiental toda ação que cause poluição de qualquer natureza em níveis capazes de resultar em danos à saúde humana, provocar

a mortalidade de animais ou promover a destruição significativa da flora.

A crescente preferência pelo MDF em substituição à madeira maciça deve-se, em grande parte, ao seu perfil ambiental mais favorável. Enquanto a madeira maciça depende de árvores de crescimento lento e de extração limitada, o MDF é produzido a partir de fibras de florestas cultivadas de Pinus e Eucalyptus, espécies de rápido crescimento e manejadas de forma sustentável, além de aproveitar resíduos de serrarias. Com isso, reduz-se significativamente o desperdício ao longo da cadeia produtiva (SILVA, 2003; IWAKIRI, 2012). *N*o entanto, a presença de resinas sintéticas, predominantemente ureia-formaldeído (UF), nos painéis de MDF representa um desafio ambiental significativo.

O formaldeído é classificado pela Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC) como carcinogênico do Grupo 1 para humanos (IWAKIRI, 2012). Por essa razão, a indústria tem buscado alternativas com menor emissão de compostos orgânicos voláteis (VOCs), como resinas sem adição de formaldeído (NAF, *no-added formaldehyde*) e sistemas alternativos à base de isocianato, melamina-ureia-formaldeído e, mais recentemente, adesivos de base renovável derivados de lignina e taninos (IWAKIRI, 2012; COLUMBIA FOREST PRODUCTS, 2019). Paralelamente, o aproveitamento energético de resíduos de MDF via briquetagem com pré-tratamento por torrefação, como proposto no presente estudo, surge como uma estratégia complementar para mitigar os impactos do descarte linear desses painéis, transformando um passivo ambiental em recurso energético alinhado aos princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e da economia circular (BRASIL, 2010).

A destinação do MDF, prevista na Política Nacional de Resíduos Industriais, são duas opções, o encaminhamento para Centros de Resíduos Industriais e a incineração, na segunda opção, mais utilizados por pequenas empresas, de forma clandestina, o descarte em lixões, enterrados de qualquer forma. A destinação dos resíduos das pequenas e médias empresas, sem que haja o comprometimento do meio ambiente se torna um desafio.

Conceito de Ecoeficiência e Econegócios, que visam agregar valor aos produtos, são novas alternativas de destino. Pesquisadores buscam formas sustentáveis de produção e destinação dos resíduos.

Conforme, QUIRINO (2003), resíduos é tudo aquilo que resta de um processo de exploração ou produção de transformação ou utilização. Sendo também

considerado toda substâncias, material ou produtos destinados por seu proprietário ao abandono. Esses resíduos podem ser transformados em partículas, podendo ser utilizados energeticamente na produção de calor, de vapor ou de eletricidade em termoelétricas, como carvão vegetal (QUIRINO, 2004).

A maior parte destes resíduos são depositados em áreas periféricas das serrarias e quando queimados contribuem com aumento da poluição do ar provocando danos ao meio ambiente (SILVA, 2002; TEIXEIRA, 2005), constatou que os resíduos industriais de madeira são oriundos do processamento mecânico de toras.

Resíduos gerados por uma empresa tem importância tanto econômico quanto ambiental, pois se espera maior retorno econômico durante todo o processo produtivo e menor dano ambiental. Tais aspectos, podem ser amplamente resolvidos através do aproveitamento máximo dos resíduos gerados durante toda a cadeia produtiva (MENDONÇA, 2010).

Conforme, Quirino (2003), resíduos é tudo aquilo que resta de um processo de exploração ou produção de transformação. Sendo também considerado toda substância, material ou produtos destinados por sua proprietário ao abandono. Esses resíduos podem ser transformados em partículas, podendo ser utlizados energeticamente na produção de calor, de vapor de eletricidade em termoelétricas, como carvão vegetal.

O reaproveitamento dos resíduos de madeira e derivados para fins de geração de energia foi previsto na forma de briquetes, produtos resultantes da compactação dos resíduos de madeira sob alta pressão e temperaturas elevadas. Segundo Quirino (2002) apud Farage (2013), entre as vantagens do uso dos briquetes, destaca-se sua alta densidade dimensões padronizadas e baixa umidade, barateando os custos de transportes e armazenagens deste produto.

A produção de briquetes, ainda são poucos utilizados no mercado. As empresas que produzem, utilizando resíduos de MDF, vem a ser uma forma de reduzir custos, oferecendo um produto alternativo e mais barato.

Mitchell e Stevens (2009), em estudo de ACV realizado no Reino Unido, compararam diferentes destinações para resíduos de painéis de madeira, concluindo que o aterro sanitário apresentou o maior impacto ambiental, enquanto a geração local de energia a partir dos resíduos mostrou o menor impacto. Esses resultados reforçam a importância de alternativas que priorizem a recuperação energética, como a briquetagem.

No contexto local de Toledo, a ausência de uma política estruturada para reaproveitamento dos resíduos de MDF, associada aos problemas recentes no aterro sanitário municipal, como o rompimento da geomembrana e o acúmulo de chorume, evidencia a urgência na implementação de soluções circulares. A produção de briquetes, com ou sem torrefação prévia, pode contribuir para a redução da pressão sobre o aterro e para a criação de uma cadeia de valor local sustentável.

3.3.1. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), LEI Nº 12.305/2010

A lei 12.305, de 02 de agosto de 2010, veio para complementar lacunas da Lei 9.605 de 12 de fevereiro de 1998, sendo readequado a destinação final de Resíduos Sólidos. Esta Política Pública, serve para o desenvolvimento sustentável, junto com a questão ambiental, dando responsabilidade aos gestores públicos, além da logística reversa, a questão socioambiental e ecoeficiência, incluindo os conceitos de Reciclagem, Rejeito e Responsabilidade Compartilhada entre outros (DECRETO, N^{O} 7494/2010).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, representa um marco regulatório fundamental para a gestão ambiental no Brasil, estabelecendo princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. A Lei é resultado de 21 anos de discussões sobre o tema no Congresso Nacional e trouxe ao país uma série de inovações para a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

A PNRS tem como objetivos principais: promover a redução na geração de resíduos; incentivar a reutilização, a reciclagem e a compostagem; diminuir o impacto ambiental dos resíduos sólidos; e promover a inclusão social dos catadores de materiais recicláveis. Entre seus princípios fundamentais, destacam-se a visão sistêmica na gestão dos resíduos sólidos, considerando as variáveis ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública; o desenvolvimento sustentável; a cooperação entre as diferentes esferas do poder público, o setor empresarial e os demais segmentos da sociedade; e a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos (BRASIL, 2010).

Um dos pilares mais inovadores da PNRS é o conceito de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, que estabelece que todos os agentes

da cadeia produtiva e de consumo compartilham a responsabilidade pela gestão dos resíduos sólidos: fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e o poder público. Esse conceito redefine a forma como as empresas e a sociedade lidam com o descarte, promovendo práticas como a reutilização, a reciclagem e a logística reversa, minimizando a geração de resíduos e o impacto ambiental (BRASIL, 2010).

A logística reversa, mecanismo central da responsabilidade compartilhada, visa assegurar que os produtos pós-consumo retornem ao ciclo produtivo para serem reutilizados, reciclados ou dispostos de maneira ambientalmente adequada. Esse processo envolve a coleta, o transporte, a triagem, a reciclagem ou a disposição final adequada dos resíduos, com a participação de fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores, cooperativas de catadores e órgãos públicos (BRASIL, 2010).

A PNRS prevê diversos instrumentos para a implementação de seus objetivos, entre os quais se destacam:

- Planos de Resíduos Sólidos: documentos técnicos que estabelecem diretrizes para a gestão de resíduos em âmbito nacional, estadual, microrregional e municipal;
- Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS): instrumentos obrigatórios para grandes geradores de resíduos, detalhando o manejo ambientalmente correto dos resíduos;
- Sistemas de Logística Reversa: mecanismos que permitem o retorno de produtos e embalagens pós-consumo ao ciclo produtivo;
- Coleta Seletiva: separação dos resíduos na fonte geradora para possibilitar sua reciclagem ou reutilização;
- Acordos Setoriais: compromissos firmados entre o poder público e setores empresariais para implementação da logística reversa e outras obrigações da PNRS;
- Incentivos Econômicos: medidas como linhas de crédito e isenções fiscais para empresas que investem em tecnologias limpas e gestão de resíduos.

A PNRS acolheu resoluções do CONAMA para quatro cadeias específicas de logística reversa: agrotóxicos e suas embalagens; óleo lubrificante usado ou contaminado; pilhas e baterias; e pneus inservíveis. Essas cadeias pré-existentes continuaram a operar até a revisão por novos instrumentos normativos, como acordos setoriais ou termos de compromisso. Estados e municípios podem utilizar

instrumentos da PNRS para organizar cadeias de logística reversa com menor abrangência geográfica, podendo ampliar, mas não abrandar, as medidas de proteção ambiental firmadas em acordos setoriais com maior abrangência. (BRASIL, 2010)

A conformidade com a PNRS não é apenas uma obrigação legal, mas representa uma oportunidade estratégica para as empresas. A adesão aos princípios da lei pode gerar: redução de custos operacionais com menor descarte em aterros e aproveitamento de materiais; mitigação de riscos legais, evitando multas e sanções; fortalecimento da imagem e reputação corporativa; inovação e vantagem competitiva; atração de investimentos sustentáveis; e contribuição efetiva para o desenvolvimento sustentável.

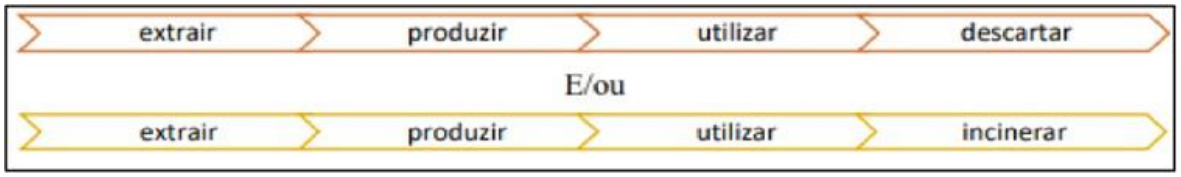
3.4. ECONOMIA DE RESÍDUOS

3.4.1. Economia Linear (EL)

A partir da Revolução Industrial o processo de produção e consumo tem seguindo um paradigma linear, onde as matérias primas são transformadas em produtos consumidos e são descartados como resíduos. Sendo esse um modelo empregado ao longo dos anos (GONZALES; BARROSO, 2019).

No caso e resíduos minerais, como: ferro, cobre e argila; os recursos energéticos, como gás natural, petróleo e energia solar e recursos biológicos, como lã, carne, mel e vegetais, são liberados na natureza. Conforme a Figura 2, demonstra a cadeira de produção EL, tendo a base da extração, produção, utilização e descarte (PIMENTAL; FONTANETTI, 2020).

Figura 2 – Caminhos convencionais de cadeias de produção.



Fonte: Pimentel e Fontanetti (2020).

Conforme Gonçales e Barros, 2019, não se leva em consideração que os aspectos naturais são esgotáveis, sem a devida preocupação com a recuperação de resíduos.

Nesse modelo se pressupõem que os recursos naturais são inesgotáveis e

prontamente disponível de resíduos ou componentes de produtos final na sua vida útil leva os recursos naturais a exaustão e acúmulo de resíduos.

No cenário brasileiro o contexto EL o país fica apenas atrás dos Estados Unidos, China e Índia, no cenário de resíduos que resulta em sérios impactos ambientais, afetando a qualidade de solo, ar e água.

3.4.2. Economia Circular (EC)

A necessidade de desenvolver ideias sustentáveis tem se tornado cada vez mais premente, e a Economia Circular (EC) surge como uma abordagem que torna a sustentabilidade mais tangível no ambiente produtivo. As atividades industriais, nesse contexto, requerem um planejamento que não apenas otimize a produção, mas também estenda a vida útil dos bens fabricados, reduzindo o desperdício e maximizando o reaproveitamento de materiais. *Para* que haja um fortalecimento da prática do EC, é necessário o fortalecimento de ações internas e externas das empresas, por meio de parcerias.

É interessante, salientar que vem ocorrendo um aumento da conscientização social e cobranças resultantes dos movimentos populares em prol de uma economia renovável e solidária (BUXTON, 2016).

As transformações na matriz energética é essencial, além de produção de bens e serviços, são essenciais para mudanças globais nos modelos de negócios (ABRAMOVAY, 2014).

A EC, representa uma oprtunidade de mudança nas empresas, pois a obriga a repensar além das suas pegadas ecológicas (LEITÃO, 2015). No qual, tem o objetivo de manter valor dos produtos no máximo tempo possível e produzido a menor quantidade possível de resíduos (EUROPEAN COMMISSION, 2015).

As micro, pequenas e médias empresas pela falta de informação e ferramentas, acabam sendo um desafio para que elas tenham gerenciamento dessas atividades (NASCIMENTO; VALDEZ – PIZARRO; MORAES, 2013).

Ações de gestão voltadas ao desenvolvimento de produtos devcem ser estimulados prioritariamente em cadeias produtivas de empresas brasileiras (ANPEI, 2004 apud KACHARA; HATAKEY, 2013).

Os Arranjos Produtivos Locais (APLs) são construídos por um processo de endogenização no território de dentro da fora, como consequência de uma lógica

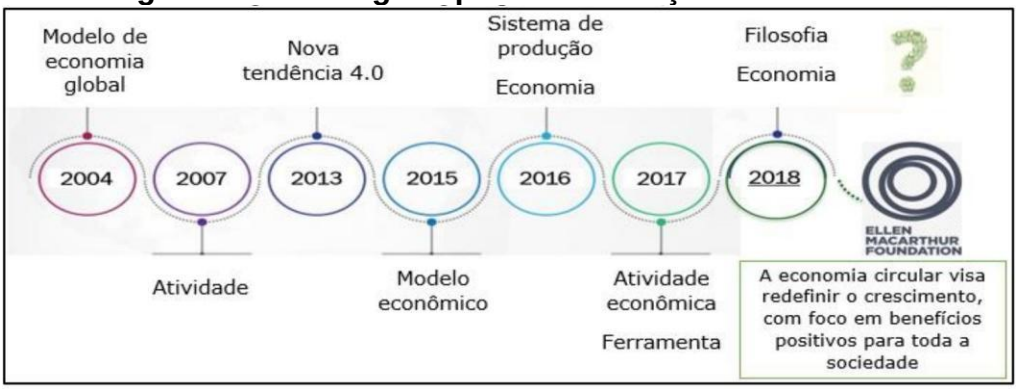
territorial que contempla especificidades locais como o passado, a cultura e as relações exercidas entre empresas (MENDONÇA, 2008). De acordo com Cassiolato, Lastres e Szapiro (2000), as principais características destes arranjos são: a dimensão territorial; a diversidade das atividades e dos atores; o conhecimento táctico; as inovações e os aprendizados interativos e a governança. Baseando nesse pressupostos, a EC, seria de grande revelância para tais empresas, pois permitiram o processo de desenvolvimento de produtos de uma forma mais colaborativa e eficiente, otimizando o fluxo de bens e serviços. O APLs, estabelecem ações conjuntas, possibilitam o fortalecimento das atividades industriais, com benefícios mútuos para as empresas nete inseridos (COSTA et al., 2018).

Apesar de várias mudanças ocorreram nesse processo, nossa economia ainda permanece dentro do modelo linear de extração, fabricação, uso e descarte.

Como pode ser vista na Figura 4 e de modo geral, ao longo dos últimos anos de sua evolução, as diversas abordagens para a concentração da EC, podem ser categorizadas da seguinte maneira: um específico modelo, prática, sistema, abordagem, processo, instrumento, sistema econômico e até mesmo uma filosofia, nomenclatura sugerida pela fundação Ellen MacArthur é a mais amplamente utilizada e aceita (GUREVA; DERIATKOVA, 2020).

A Figura 3 ilustra os principais abordagens que compõem o modelo de Economia Circular.

Figura 3 - Abordagens para as Definições de EC.



Fonte: Gureva e Deviatkova (2020).

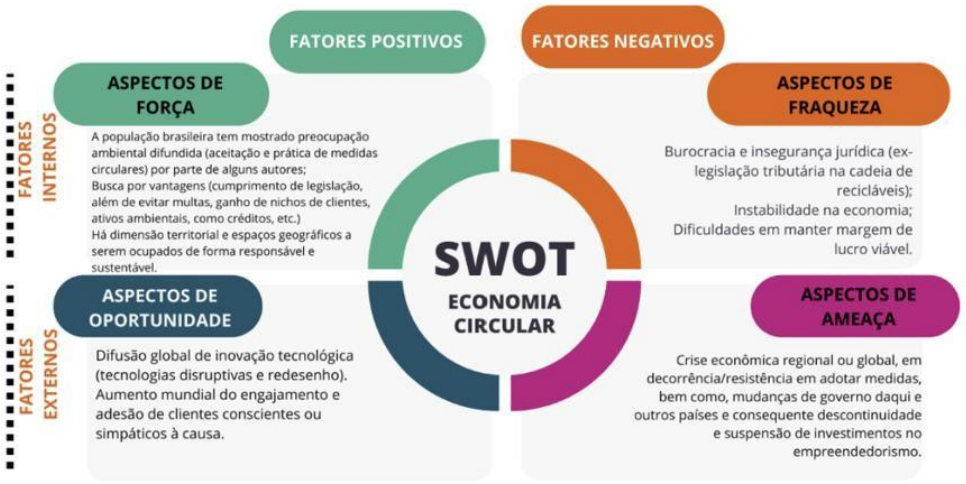
A ideia de EC, é de propor a substituição de “fatores de produção” escassos, substituindo por fatores ilimitados. Podendo criar diversas maneiras de criar valor independentemente do consumo de recursos finitos. Na EC, o consumo ocorre em ciclos biológicos eficazes, sendo recuperados e restaurados em um ciclo técnico

(GEJER; TENNENBAUM, 2017).

A Economia Circular é que uma simples abordagem de gestão de resíduos, que busca redesenhar a maneira que consumismo e descartamos. Na esfera socioeconômica a intereção estabeelecida entre cliente e empresa de modoempático com base sustentabilidade. Sendo uma abordagem à inovação, geração de empregos e otimização de recursos.

Os benefícios para o meio ambiente talvez atualmente o mais debatidos entre sobre a EC, quando a Fundação Ellen MacArthur (2016) cita a diminuição considerável na quantidade de resíduos gerados, uma vez que a abordagem circular formenta a reutilização, reciclagem e reparo de produtos. Embora a Economia Circular apresente potencial para promover o uso mais eficiente dos recursos e a valorização de resíduos, sua implementação envolve aspectos favoráveis e desafios que devem ser considerados. A Figura 4 apresenta uma análise SWOT aplicada à Economia Circular, sintetizando suas principais forças, fraquezas, oportunidades e ameaças.

Figura 4 – Swot – Economia Circular.



Fonte: Contribuciones a Las Ciencias Sociales, São José dos Pinhais, v.17, n.6, p. 01-21, 2024.

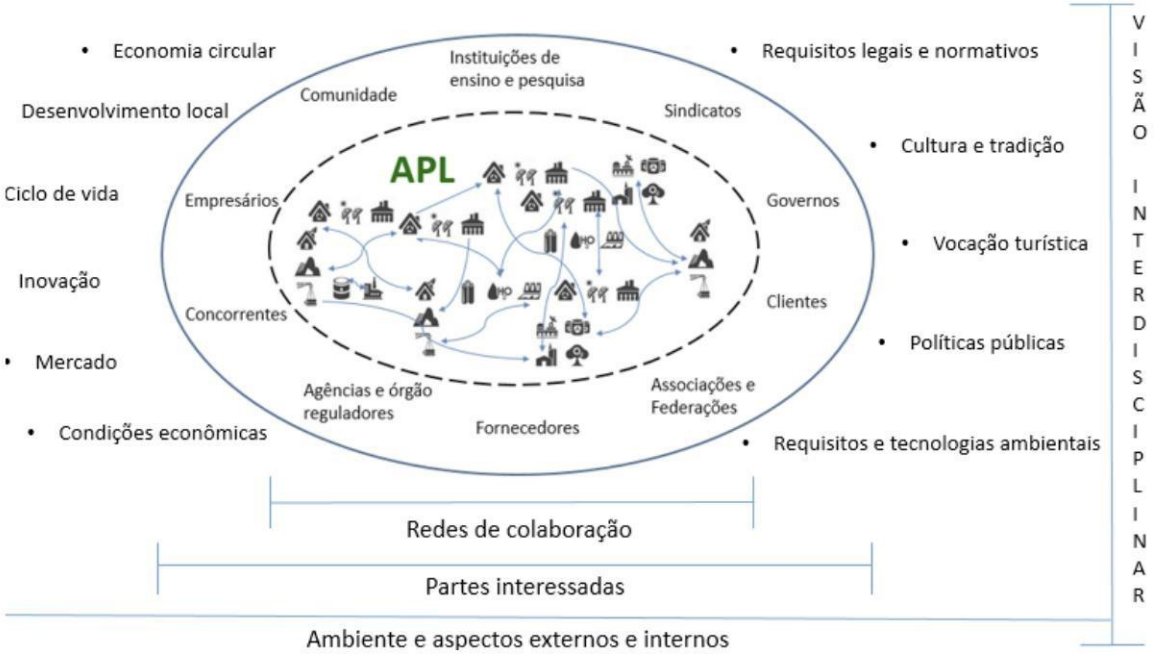
Em seus respectivos trabalhos, Azevedo e Nolasco (2009), Oliveira et al. (2016) e Oliveira, França e Rangel (2018) analisam os requisitos ambientais no ciclo de vida e no processo de desenvolvimento de produtos, desde o planejamento estratégico à descontinuidade do produto.

Ruiz-Silveira, Reys e Martínez (2010) e Das (2015) destacam a importância da valorização dos recursos locais e da formação de redes de cooperação para o

fortalecimento dos APLs. Essa articulação entre os diferentes agentes contribui para o desenvolvimento da economia local e regional (CABRERA; SCHULTZ; TALAMINI, 2017; MARINI; SILVA, 2012; ANTERO et al., 2016).

Nesse contexto, o associativismo favorece ações conjuntas e a competitividade territorial (SINGER, 2002). A Figura 5 apresenta os principais agentes envolvidos nessa dinâmica de interação e cooperação nos APLs.

Figura 5 – Agentes Envolvidos nos Produtos em APLs.



Fonte: Elaborado por Oliveira, França e Rangel (2018).

3.5. ASPECTOS QUÍMICOS E TRATAMENTO TÉRMICO DO MDF

3.5.1. Resinas Sintéticas utilizadas na Produção do MDF

Conforme Iwakiri (2005), a resina ureia-formaldeído (UF) é a mais empregada na indústria de painéis de madeira. No entanto, outras resinas também são utilizadas, como fenol-formaldeído (FF), isocianato, melamina-ureia-formaldeído (MUF) e melamina-formaldeído (MF).

A resina ureia-formaldeído (UF) é amplamente aplicada na colagem de madeira maciça, compensados laminados e painéis particulados, sendo utilizada em mais de 90% dos painéis de madeira em razão do seu baixo custo (IWAKIRI, 2005).

Sua produção ocorre pela reação entre dióxido de carbono e amônia, sob temperaturas de 135 a 200°C e pressão de 70 a 130 atm. A obtenção do formaldeído,

por sua vez, é realizada por oxidação do metano ou a partir de monóxido de carbono e hidrogênio, geralmente derivados do petróleo. A resina UF é comercializada como solução aquosa (60–70% de sólidos) ou em pó, apresentando as seguintes características:

- Coloração branca leitosa;
- Teor de sólidos entre 48 e 51%;
- pH entre 7,4 e 7,8;
- Viscosidade entre 400 e 1000 cP;
- Temperatura de cura entre 90 e 120°C.

A resina fenol-formaldeído (FF) começou a ser comercializada na década de 1930, sendo amplamente utilizada devido à sua elevada resistência à umidade. Sua aplicação é comum na produção de compensados navais, painéis de fibras de alta densidade (hardboards), painéis aglomerados estruturais do tipo *waferboard* e OSB (*Oriented Strand Board*) (IWAKIRI, 2005).

A resina melamina-formaldeído (MF) apresenta coloração branca leitosa, maior resistência à umidade em comparação à UF e tempo de cura mais rápido que a resina FF (IWAKIRI, 2005).

Trata-se de uma resina de cura a frio, geralmente utilizada com catalisador, aplicada principalmente em vigas laminadas (*Glulam*) para construção naval, aeronáutica e outras estruturas de alta resistência. Possui coloração marrom, viscosidade entre 500 e 800 cP e vida útil de armazenamento de aproximadamente um ano a 25°C. Por apresentar reatividade significativamente superior ao fenol e custo elevado, é frequentemente misturada em proporção igual com fenol, com adição de paraformaldeído pouco antes do uso (IWAKIRI, 2005).

O formaldeído é o aldeído mais abundante na natureza, de fórmula molecular simples, um gás incolor com odor irritante, sufocante e característico, sendo detectado em baixas concentrações (INDUKERN, 2008). O formol comercializado é uma mistura de 30% a 56% de formaldeído, de metanol, que conforme a proporção pode variar de 6% a 15%, algumas resinas como fenólicas, uréicas, vários poliacetatos, hexaminas e outros compostos em menores quantidades, como, por exemplo, metais pesados como o chumbo e o cádmio (VERONEZ et al., 2006).

O formaldeído puro não é comercializado devido à sua elevada tendência à polimerização; por esse motivo, adiciona-se metanol à solução com a finalidade de

inibir esse processo e viabilizar sua utilização em diferentes aplicações industriais (VERONEZ et al., 2006). Trata-se de um composto de baixo peso molecular, aproximadamente 30,03 g mol^{-1}, solúvel em água, álcool etílico, éter dietílico e ácido clorídrico (INDUKERN, 2008), além de apresentar elevada reatividade, capacidade de formar polímeros em condições ambientes de temperatura e pressão e características de inflamabilidade (COELHO, 2009). Na presença de ar, o formaldeído pode ainda ser oxidado a ácido fórmico (VERONEZ et al., 2006).

O formaldeído é explosivo quando em contato com peróxidos, óxido de azoto e ácido perfórmico e pode reagir com o cloreto de hidrogênio ou outros cloretos inorgânicos. Ele é incompatível com oxidantes, amônia, álcalis, bissulfetos, sais de cobre, sais de ferro, sais de prata, iodetos, alcanos, ácidos e fenóis (PEREIRA, 2007; COELHO, 2009).

O formaldeído é formado pela oxidação de hidrocarbonetos por ação da luz e por combustão incompleta. A formação natural deste composto pode ocorrer na troposfera também pelo fenômeno de oxidação ou por processo de combustão naturais (COELHO, 2009; LIMBERGER, 2011).

No ambiente, a emissão do formaldeído, é através de escapamente dos motores de veículos, fábricas, incineradores, fumaças de cigarro, madeira, incêndios florestais, madeira de construção, detergentes, desinfetantes, tapetes, tintas e vernizes, alimentos e respectivos processamentos (LIMBERGER, 2011).

Por ser percursos do radical hidroxila, pode acelerar a produção de oxigênio urbano e outros produtos fotoquímicos (COELHO, 2009).

Quando o formaldeído é dissolvido na água, tanto nas águas subterrâneas quanto de superfície, também ocorre degradação. Ele não se acumula no ambiente, mas na liberação em concentração relativamente altas e formação contínua, resulta em uma exposição longa, perto de fontes de liberação (COELHO, 2009). Estima-se que em águas potáveis, a concentração de formaldeído seja inferior a 0,1 mg L^{-1}, na água ele é rapidamente hidratado formando um glicol (COELHO, 2009). Em ambiente natural, a concentração de formaldeído é inferior a $8x10^{-4}$ ppm. Nos centros urbanos a concentração pode variar entre $8x10^{-4}$ a $1,6x10^{-2}$ pp (COELHO, 2009).

O formaldeído (H_2CO), também conhecido como metanol, é o aldeído mais simples e abundante na natureza, apresentando-se como um gás incolor, inflamável, de odor pungente e sufocante, detectável em concentrações relativamente baixas

(SILVA, 2024). Sua massa molar é de 30,03 g mol^{-1}, com densidade de 815 kg/m^3, ponto de ebulição de -19°C e alta solubilidade em água, álcool etílico, éter dietílico e clorídrico. Devido à sua rápida polimerização, o formaldeído puro não é comercializado; o metanol é adicionado à solução aquosa (denominada formol ou formalina) como estabilizador, em proporções que variam de 6 a 15% (SILVA, 2024).

O formaldeído é prontamente absorvido pelas vias respiratórias e pelo trato gastrointestinal, sendo rapidamente metabolizado no organismo. No entanto, a exposição ocupacional e ambiental a essa substância representa um risco significativo à saúde humana, uma vez que é classificada como carcinógeno humano confirmado (Grupo 1) pela Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC), com evidências suficientes de associação com câncer de nasofaringe, cavidade nasal, seios paranasais e leucemia.

O formaldeído é formado naturalmente pela oxidação de hidrocarbonetos por ação da luz e por combustão incompleta. Contudo, as principais fontes antrópicas de emissão para a atmosfera são os processos de combustão, incluindo escapamentos de veículos automotores (especialmente motores convertidos para gás natural e com adição de biodiesel), usinas termelétricas, incineradores, refinarias, fogões a lenha e a gás, e fumaça de cigarro (IARC, 2012).

Estudos realizados na cidade do Rio de Janeiro, por exemplo, demonstraram que o teor de formaldeído no ar do Centro da cidade aumentou significativamente entre 2000 e 2003, acompanhando o crescimento da frota de veículos convertidos para gás natural. Pesquisas com 60 veículos bicombustíveis indicaram que, quando movidos a GNV, emitiram quatro vezes mais formaldeído em comparação ao funcionamento com gasolina. O formaldeído também é emitido por fontes fixas, como indústrias químicas, de papel e celulose e de painéis de madeira, sendo considerado um poluente atmosférico primário. Além disso, na atmosfera, o formaldeído pode reagir com outros poluentes, contribuindo para a formação de ozônio troposférico, que causa danos à saúde e ao meio ambiente (NIH, 2018).

A toxicologia ocupacional e ambiental do formaldeído é amplamente estudada, uma vez que a exposição pode ocorrer tanto em ambientes de trabalho quanto na população em geral, devido à presença da substância em produtos de consumo, como móveis, pisos, cosméticos, desinfetantes, tintas e vernizes (IARC, 2012).

Os efeitos agudos da exposição ao formaldeído incluem irritação nos olhos,

no trato respiratório superior e nas mucosas, além de sintomas como tosse, espasmos e chiado. Os efeitos crônicos são mais graves e abrangem o desenvolvimento de asma, edema pulmonar e, principalmente, neoplasias, como câncer de nasofaringe, leucemia, câncer de cavidade nasal e de seios paranasais (IARC, 2012).

No Brasil, a Norma Regulamentadora (NR) 15, Anexo 11, estabelece o limite de exposição ocupacional para o formaldeído em concentração máxima de 1,6 ppm (valor teto), que não pode ser ultrapassado ao longo da jornada de trabalho. Em outros países, como Austrália, Colômbia e Singapura, os limites são ainda mais rigorosos, com concentrações médias ponderadas de 0,1 ppm e limites para curta duração de 0,3 ppm, refletindo o reconhecimento internacional da carcinogenicidade e toxicidade da substância (BRASIL, 2010).

A ingestão da solução de formaldeído causa severa irritação do trato gastrintestinal, vômitos e náuseas, acidose metabólica e hematúria e a exposição prolongada pode ocasionar depressão, malformações fetais e cegueira, podendo ainda ser observados efeitos mutagênicos por sua ação sobre grupos de aminas do ácido nucléico, possível choque e danos aos rins ou morte (HSDB, 2014).

O formol é um composto tóxico à saúde humana. Se inalado, causa severa irritação no trato respiratório, queimadura nas mucosas e dificulta a respiração. O contato direto com o composto pode ocasionar queimaduras na pele e nos olhos. Se o contato com a pele for prolongado ou frequente, causa endurecimento ou rachaduras resultando em hipersensibilidade e risco de edema alérgico (INDUKERN, 2008).

O Criteria Document publicado pelo Instituto Nacional de Saúde e Segurança Ocupacional dos EUA (NIOSH) estabelece que a exposição ao formaldeído no ar não deve ultrapassar o limite teto de 0,1 ppm em qualquer período de 15 minutos de amostragem. Em razão do seu alto potencial carcinogênico para seres humanos, a manipulação do composto exige rigorosas medidas de biossegurança, incluindo o uso obrigatório de luvas de proteção e respiradores munidos de filtros específicos para vapores orgânicos (EMERSON, 2010).

Adicionalmente, o formaldeído deve ser armazenado em recipientes hermeticamente fechados para evitar a contaminação atmosférica, sob temperatura ambiente, mantida estritamente acima de 15°C, e protegido da incidência direta de luz (EMERSON, 2010). A concentração da dissipação do formol na atmosfera é expressa em “partes por milhão” (ppm), sendo que 1 ppm corresponde a 1,248 mg m^{-3}

(VERONEZ et al., 2006). A Associação de Saúde e Segurança Ocupacional (OSHA), em 1987, estabeleceu uma normatização para a utilização do formaldeído, que consta que 16 para um período de 8 horas de exposição ao formol, o limite máximo é de 0,75 ppm e a tolerância para um período de 15 minutos foi firmado um limite de 2 ppm (VERONEZ et al., 2006).

O Tabela 2 apresenta uma síntese dos principais aspectos relacionados a riscos do formol.

Logo, em 1992, ocorreu uma alteração na normatização da OSHA, estabelecendo-se que o limite permitido devesse ser de 0,75 ppm por 8 horas de trabalho diário (VERONEZ et al., 2006). Em 2009, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária divulgou pela RDC n° 36/09, a proibição na venda do produto formol (37% de formaldeído) em todo país em drogarias, farmácias, supermercados, armazéns, empórios e lojas de conveniência. Essa proibição se deu devido à preocupação com os riscos à saúde dos profissionais responsáveis por tratamentos estéticos que usavam o formol em larga escala (BRASIL, 2009).

Tabela 2 – Riscos do Formol.

Risco	Categoria	Frase de sinalização	Classificação de risco	Símbolo
Corrosividade	1	Cuidado	Pode ser corrosivo para metais	
Flamabilidade	4	Cuidado	Líquido Combustível	---
Toxicidade	3	Perigo	Tóxico se ingerido Tóxico se em contato com a pele Tóxico se inalado	
Carcinogenicidade	1B	Perigo	Pode causar câncer pela via inalatória	

Fonte: COPENOR, 2009.

Logo, em 1992, ocorreu uma alteração na normatização da OSHA, estabelecendo-se que o limite permitido devesse ser de 0,75 ppm por 8 horas de trabalho diário (VERONEZ et al., 2006). Em 2009, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária divulgou pela RDC n° 36/09, a proibição na venda do produto formol (37% de formaldeído) em todo país em drogarias, farmácias, supermercados, armazéns, empórios e lojas de conveniência. Essa proibição se deu devido à preocupação com os riscos à saúde dos profissionais responsáveis por tratamentos estéticos que usavam o formol em larga escala (BRASIL, 2009).

Na indústria de painéis de madeira, o formaldeído é empregado na produção de resinas sintéticas, como uréia-formaldeído (UF), fenol-formaldeído (FF) e melamina-formaldeído (MF), que atuam como adesivos para a colagem de partículas e fibras. Essas resinas, especialmente a UF, são responsáveis pela emissão contínua de formaldeído livre dos painéis durante sua vida útil, processo conhecido como emissão "indoor" (em ambientes fechados) (NIH, 2018).

As emissões de formaldeído de painéis de MDF e MDP podem variar significativamente em função de fatores como a razão molar da resina (relação formaldeído:uréia), a temperatura e o tempo de prensagem, a umidade do colchão de fibras e a idade do produto. Resinas com baixa razão molar tendem a emitir menos formaldeído, embora possam comprometer as propriedades mecânicas do painel. No Brasil, a maioria das linhas de produção de chapas de madeira ainda opera com resinas de emissão equivalente à classe E2, com conteúdo de formaldeído entre 20 e 30 mg/100g, enquanto países como a Alemanha já produzem cerca de 95% de suas chapas na classe E1, com teores inferiores a 8 mg/100g.

O uso de resinas à base de isocianato (pMDI), que não emitem formaldeído, embora ainda mais caras, apresenta-se como uma alternativa tecnológica para a produção de painéis com baixa ou nenhuma emissão da substância. (NIH, 2018)

Adesivos são definidos como substâncias capazes de unir dois materiais por adesão superficial (NUNES, 2010). Os principais adesivos utilizados na produção de painéis de madeira são sintéticos, como fenol-formaldeído e melamina-formaldeído, geralmente derivados do petróleo.

A presença de resinas sintéticas nos painéis de MDF constitui uma preocupação ambiental e ocupacional. O excesso de adesivo utilizado na produção pode liberar formaldeído, substância classificada como cancerígena pela IARC (2006)

em concentrações a partir de 0,33 mg/m³ (VIGNOT, 1996; MCREIDE, 1992). Além disso, o fenol é considerado um composto tóxico e de difícil degradação, podendo contribuir para a contaminação ambiental caso os resíduos de MDF sejam descartados inadequadamente.

No caso específico do MDF, as resinas mais comumente empregadas são à base de ureia-formaldeído (UF) ou ureia-formaldeído-melamina (MUF). O painel ainda pode conter outros aditivos, tais como ignífugos, fungicidas, inseticidas, parafina (impermeabilizante), e diversos acabamentos à base de poliuretano (PU), polivinil acetato (PVA) ou etilvinil acetato (EVA) (PEREIRA *et al.*, 2006).

Essa composição química complexa representa um desafio para a reciclagem e a valorização energética dos resíduos de MDF, exigindo processos controlados para evitar a emissão de poluentes durante a transformação ou combustão.

Em escala global, marcos importantes como a Conferência de Estocolmo (1972) e a ECO-92 (Rio de Janeiro, 1992) consolidaram a agenda ambiental internacional, originando instrumentos como o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e estabelecendo acordos e protocolos voltados à proteção ambiental (GUIMARÃES et al., 2006). Posteriormente, a Organização das Nações Unidas (ONU) definiu os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), os quais constituem um apelo global para erradicar a pobreza, proteger o meio ambiente e assegurar prosperidade e paz até 2030 (ONU, 2023).

O modelo de consumo vigente, caracterizado pelo uso intensivo de recursos naturais, tem agravado a geração de resíduos sólidos, que se configura como um dos principais problemas ambientais da contemporaneidade (MOTTA, 1996). O descarte inadequado de resíduos ou produtos químicos, seja por disposição incorreta no solo ou armazenamento impróprio, representa riscos concretos à saúde pública e ao meio ambiente (RIBEIRO, 2009, p. 49).

No contexto brasileiro, dados do Anuário Estatístico da ABIMCI (2023) indicam um consumo aparente de MDF da ordem de 1,58 milhão de metros cúbicos. Estudos apontam que a geração de resíduos de painéis de madeira, como o MDF, pode alcançar até 20% do volume total consumido pela indústria (UFPR, 2023; ABIMCI, 2023). Aplicando-se essa taxa aos dados nacionais, estima-se que centenas de milhares de toneladas desse material sejam destinadas anualmente a aterros ou, com frequência, a descartes inadequados no ambiente. Esse cenário se agrava quando se

considera que o Brasil produz cerca de 241 mil toneladas de resíduos por dia, sendo 130 mil toneladas de origem domiciliar e 111 mil toneladas industriais (SENAI apud VIEIRA, 2006), volumes que continuam a crescer e cujo aproveitamento ainda é limitado (MATOSKI et al., 2002 apud VIEIRA, 2006).

A extração madeireira, por sua vez, constitui uma das principais pressões sobre os ecossistemas, e o surgimento dos painéis reconstituídos, como o MDF, está diretamente associado à necessidade de otimizar o uso da matéria-prima e reduzir o impacto da exploração florestal.

Nesse sentido, a Economia Circular emerge como um modelo estratégico para alcançar as metas do desenvolvimento sustentável. Conforme a Fundação Ellen MacArthur (2023), essa abordagem fundamenta-se em três pilares essenciais: eliminação de resíduos e poluição, manutenção de produtos e materiais em circulação no mais alto valor possível e regeneração dos sistemas naturais.

Estudos conduzidos por Ali et al. (2024) demonstram que a decomposição térmica do MDF ocorre em três estágios distintos, tanto em condições de pirólise quanto de combustão, refletindo sua complexa estrutura composicional. Essa característica é atribuída à presença simultânea dos componentes da madeira (hemicelulose, celulose e lignina) e das resinas sintéticas, que apresentam temperaturas de degradação específicas.

O primeiro estágio, que ocorre em temperaturas inferiores a 190 °C, está associado principalmente à evaporação de umidade e à liberação de compostos voláteis de baixo peso molecular. A etapa principal de decomposição, conforme documentado por Chen et al. (2016), ocorre entre 190°C e 425°C, sendo caracterizada pela degradação termoquímica dos polissacarídeos (hemicelulose e celulose) e pela despolimerização das resinas. O terceiro estágio, acima de 425°C, corresponde à degradação da lignina e à formação de carbono residual (char).

A presença da resina ureia-formaldeído (UF) confere ao MDF um comportamento térmico distinto em comparação com a madeira natural. Mayer et al. (2023) destacam que o teor de nitrogênio no MDF pode atingir até 6,3%, valor significativamente superior ao da madeira natural (cerca de 1%), sendo esta diferença atribuída à composição química da resina UF.

Durante o tratamento térmico, a degradação da resina UF resulta na emissão de compostos nitrogenados, como a N,N-dimetilacetamida, além de amônia e

formaldeído livre. Conforme observado por Medeiros et al. (2022), essa característica impõe desafios adicionais ao aproveitamento energético do MDF, uma vez que a combustão direta pode gerar emissões significativas de óxidos de nitrogênio (NOx), exigindo sistemas de pós-tratamento para a conversão catalítica dos compostos nitrogenados em hidrocarbonetos puros.

O tratamento térmico do MDF, seja durante o processo de prensagem a quente ou como pós-tratamento, promove alterações significativas em suas propriedades. Winandy e Krzysik (2007) demonstraram que a degradação térmica das fibras de madeira durante a prensagem a quente do MDF ocorre de forma mais intensa quando a temperatura do colchão de fibras ultrapassa 150°C, resultando em alterações na composição química dos carboidratos, na higroscopicidade e nas propriedades mecânicas do painel.

Estudos de pós-tratamento térmico, conduzidos por autores como Medeiros et al. (2019), revelam um trade-off entre a melhoria da estabilidade dimensional e a redução das propriedades mecânicas. Em temperaturas entre 200°C e 250°C, observa-se uma significativa redução na absorção de água e no inchamento em espessura dos painéis tratados, mas também uma diminuição expressiva nos valores de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE). Özalp, Peker e Yazıcı (2024) corroboram esses achados ao verificar que o tratamento térmico a 120°C, 150°C e 180°C, por períodos de 2 a 6 horas, resulta na redução da emissão de formaldeído e do inchamento em água dos painéis de MDF.

A compreensão dos parâmetros cinéticos que regem a decomposição térmica do MDF é essencial para o dimensionamento de reatores e otimização de processos de aproveitamento energético. Chen et al. (2016) determinaram, por meio do modelo de energia de ativação distribuída (DAEM), uma energia de ativação média de 127,40 kJ mol^{-1} para a pirólise do MDF, com fator pré-exponencial de $8{,}4\times10^{11}$. Esses valores são comparáveis aos encontrados para outros resíduos lignocelulósicos, sugerindo que o MDF apresenta viabilidade termoquímica semelhante a outras biomassas para fins energéticos.

Os estudos de Ali et al. (2024), utilizando métodos de ajuste de modelo e formalismos convencionais, complementam essas informações ao fornecer parâmetros termodinâmicos que fundamentam o projeto de instalações térmicas para o processamento de resíduos de MDF. A análise termogravimétrica (TGA) e a calorimetria exploratória diferencial (DSC) revelam picos endotérmicos

característicos, com entalpia de pirólise de aproximadamente 256 kJ/kg, indicando a favorabilidade termodinâmica do processo.

3.5.2. Potencial Energético do MDF

O potencial energético de um combustível sólido é primariamente determinado por seu poder calorífico, parâmetro que expressa a quantidade de energia liberada por unidade de massa durante a combustão completa. Estudos de caracterização energética de resíduos de MDF têm demonstrado valores expressivos, que posicionam o material como alternativa viável para a geração de calor e eletricidade.

Cunha et al. (2018), ao avaliarem o aproveitamento de resíduos de MDF na produção de pellets, determinaram um poder calorífico superior (PCS) de 4.427,8 $kcal.kg^{-1}$ para o resíduo in natura, valor comparável ao de biomassas florestais de alto valor energético. Os autores também verificaram, por meio da análise química imediata, teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas de 16,3%, 82,3% e 1,4%, respectivamente, indicando a viabilidade técnica do aproveitamento do material como fonte energética.

Estudos adicionais reforçam esses achados. Dados da literatura especializada indicam que o poder calorífico inferior (PCI) do MDF se situa na faixa de 17,4 $MJ.kg^{-1}$ (aproximadamente 4.155 $kcal.kg^{-1}$), valor que reflete a energia efetivamente disponível após descontado o calor de vaporização da água gerada na combustão. A densidade energética do material, quando compactado na forma de pellets, pode atingir valores entre 2,6 e 5,5 $Gcal.m^{-3}$, o que evidencia o ganho logístico proporcionado pela densificação.

A distinção entre poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) é fundamental para a correta avaliação do potencial energético de um combustível, especialmente em aplicações industriais que envolvem caldeiras e fornos.

O PCS corresponde à quantidade de calor liberada pela combustão completa de uma unidade de massa do combustível, considerando que a água formada na reação se encontra no estado líquido. Já o PCI considera a água no estado vapor, sendo, portanto, um valor inferior ao PCS, pois subtrai o calor latente de vaporização da água. Para a biomassa, a diferença entre PCS e PCI é significativa devido ao elevado teor de hidrogênio e à umidade presente no material. A

literatura indica que o PCI do MDF pode variar em função da composição específica do painel, especialmente do teor de resina e da umidade residual. Valores reportados para o MDF situam-se em torno de 17,4 $MJ.kg^{-1}$**,** enquanto para outros painéis reconstituídos, como o HDF (*High Density Fiberboard*), o PCI atinge 19,4 $MJ.kg^{-1}$**,** refletindo a maior densidade e o maior teor de lignina desses materiais. Andrade et al. (2024) observaram que o MDF e o *hardboard* podem apresentar valores caloríficos inferiores aos de outros resíduos madeireiros, como compensados e OSB, devido ao processo de cocção da madeira em sua fabricação, que pode resultar na perda de extrativos e materiais voláteis.

3.6. BRIQUETES

3.6.1. Briquetagem: Conceitos, Parâmetros e Aplicações

A briquetagem consiste na aglomeração de partículas finas por meio da aplicação de pressão, com ou sem adição de aglutinantes, para a obtenção de um produto compactado com forma, tamanho e propriedades mecânicas definidas, como observado na Figura 6. Trata-se de um processo de densificação de biomassa lignocelulósica que visa transformar partículas de baixa densidade em um combustível sólido de alta densidade energética, facilitando o manuseio, o transporte e o armazenamento.

Figura 6 – Briquetes.



Fonte: https://www.biomaxind.com.br/briquetes/

O princípio fundamental da briquetagem reside na compactação de resíduos sob alta pressão e, em alguns casos, temperaturas elevadas. Durante o processo, a elevação térmica (entre 100°C e 200°C) promove a plastificação da lignina, componente natural da madeira que atua como aglutinante das partículas, dispensando, em muitos casos, a adição de ligantes sintéticos. Para que ocorra uma

densificação adequada, é necessário que a umidade do resíduo esteja entre 8% e 15% (CARVALHO & BRINCK, 2004; SILVA, 2007). O teor de umidade é um parâmetro crítico, uma vez que valores inferiores a 8% podem comprometer a resistência mecânica dos briquetes, enquanto o excesso de umidade pode provocar rachaduras e fissuras internas devido à geração e expulsão de vapor de água durante a compactação.

Muitas indústrias que utilizam resíduos de madeira para fins energéticos empregam a biomassa na forma de cavacos, prática consolidada no setor de abastecimento industrial. Contudo, o briquete surge como uma alternativa mais eficiente: trata-se de um biocombustível sólido obtido pela compactação da biomassa sob alta pressão e, em alguns casos, temperaturas elevadas (RAMIREZ et al., 2014).

As fontes de energia renovável vêm ganhando crescente relevância no cenário energético atual, impulsionadas pelo aumento da demanda e pela necessidade de diversificação da matriz energética. Nesse contexto, a biomassa destaca-se como alternativa sustentável, sendo a briquetagem uma das formas de valorização energética de resíduos lignocelulósicos (DONATTO, 2016).

Durante o processo, a elevação térmica (entre 100°C e 200°C) promove a plastificação da lignina, componente natural da madeira que atua como aglomerante das partículas. Para que ocorra uma densificação adequada, é necessário que a umidade do resíduo esteja entre 8% e 15% (CARVALHO & BRINCK, 2004; FARAGE, 2009; SILVA, 2007; TAVARES, 2013). É um processo de compactação de biomassa lignocelulósia com o objetivo de transformar partículas em alta densidade (SANTOS et al., 2019; SILVA et al., 2019). Sendo uma tentativa de destinação aos resíduos com grande potencial energético (GOUVEIA et al., 2017). É uma forma eficiente de concentra a energia disponível na biomassa, mas sua qualidade pode ser afetada pela pressão e temperatura de compactação, além do tamanho e umidade do material (CHAIUWAI et al., 2020).

Geralmente no formato colíndrico, denso e compacto, os briquetes tornam-se uma fonte energética ecológica em substituição do gás natural, carvão vegetal e mineral e lenha, possui alto poder calorífico, regularidade térmica elevada e alta temperatura da chama, fácil manuseio, transporte e armazenamento.

A briquetagem proporciona uma redução significativa do volume do material, o que diminui os custos de transporte e armazenamento, além de agregar valor a resíduos que, de outra forma, seriam descartados. Entre as principais vantagens dos

briquetes estão os benefícios operacionais, logísticos, energéticos e ambientais (DIAS *et al.*, 2012).

Comparados à madeira bruta ou à serragem, os briquetes geram menor quantidade de fumaça, cinzas e fuligem (EMERRHI, 2011; PANWAR *et al.*, 2011; DANTAS *et al.*, 2012; PARASHAR & SINGH, 2014). Socioeconomicamente, contribuem para a geração de emprego e renda, especialmente em comunidades vulneráveis, e representam uma alternativa viável para a substituição de combustíveis fósseis, que além de poluentes apresentam custos elevados (DIAS *et al.*, 2012; MWAMPAMBA *et al.*, 2013). Adicionalmente, os briquetes promovem uma combustão mais uniforme e eficiente em caldeiras e fornos industriais (CAETANO *et al.*, 2017).

Seu processo consiste na trituração e moagem das biomassas, o material é compactado em altas tempertaturas, em torno de 100 a 120ºC (HARYADI et al., 2019). Se o teor da umidade estiver em torno de 12%, associado com o aumento da temperatura é importante para a plastificação de lignina que atua como aglutiante (BRAND et al.; SANTOS et al., 2019).

Embora a madeira seja considerada um recurso renovável, a ausência de manejo florestal planejado pode levar à redução desse recurso (SANTOS, 2009). A responsabilidade ambiental das empresas inclui o correto gerenciamento dos resíduos gerados, evitando práticas de descarte inadequado. Nesse sentido, Manzini e Vezzoli (2005) classificam os resíduos em duas categorias: pré-consumo, que compreende sobras e refugos gerados durante o processo produtivo e que podem ser reciclados internamente; e pós-consumo, que corresponde aos materiais descartados após o uso pelo consumidor final.

O estudo de caso “Estímulos e barreiras para o aproveitamento de resíduos de madeira na fabricação de briquetes”, de Bauer e Sellitto (2019), demonstra a viabilidade técnica e econômica da briquetagem no Rio Grande do Sul, analisando as dinâmicas de produção e destinação dos resíduos madeireiros. Dessa forma, evidencia-se que a transformação de sobras industriais em biocombustível não apenas mitiga os impactos ambientais do descarte inadequado, mas também agrega valor econômico aos resíduos pré-consumo, promovendo a sustentabilidade e a economia circular no setor.

Do ponto de vista prático, os briquetes não demandam equipamentos sofisticados para sua utilização, podendo ser queimados diretamente em fogões, fornalhas ou caldeiras (DONATTO, 2022). De acordo com a Política Nacional de

Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), rejeitos são definidos como resíduos sólidos que não possuem outra alternativa senão a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010). A briquetagem, portanto, surge como uma estratégia para evitar que resíduos como o MDF sejam classificados como rejeitos, transformando-os em produtos com valor agregado e contribuindo para uma gestão mais circular dos recursos.

As principais tecnologias empregadas na briquetagem de biomassas e resíduos industriais são as prensas de rolos e as prensas de pistão ou extrusoras.

Briquetadeiras de rolos: O material é alimentado entre dois rolos que giram em sentidos opostos, comprimindo as partículas em cavidades ou bolsões presentes na superfície dos rolos. A pressão exercida depende da taxa de alimentação e da força de suporte dos rolos, que pode variar de 20 a 300 toneladas. Este método é amplamente utilizado na indústria mineral e metalúrgica para a aglomeração de finos de minério, carvão e outros materiais.

- Prensas de pistão hidráulico (HPP): Utilizam um pistão para comprimir a biomassa em uma matriz, produzindo briquetes de forma cilíndrica. Esta tecnologia é comumente empregada para resíduos agrícolas e florestais.
- Prensas de extrusão (SP): O material é forçado através de uma matriz por meio de um parafuso sem-fim, gerando briquetes de seção transversal constante. Estudos indicam que as prensas de extrusão produzem briquetes com melhor qualidade física e características de combustão superiores em comparação com as prensas de pistão, embora apresentem custos operacionais mais elevados devido ao maior consumo de energia e à necessidade de manutenção mais rigorosa.

A qualidade e a durabilidade dos briquetes dependem diretamente da granulometria das partículas que formam a biomassa. Isso ocorre porque a presença de pedaços maiores de resíduos pode fragilizar a estrutura física do material, criando pontos de fratura que comprometem a resistência mecânica do produto final (SETTER et al., 2021).

Por essa razão, o dimensionamento adequado da matéria-prima torna-se uma etapa crucial no processamento do MDF. Embora os resíduos já triturados em menor escala, possam ser encaminhados diretamente para a compactação, os fragmentos maiores exigem etapas prévias de redução granulométrica, peneiramento e classificação para padronizar o material (MARTINEZ et al., 2017).

Esse refinamento prévio reflete diretamente no desempenho do processo

produtivo. Ao reduzir a dimensão das partículas, amplia-se a área de superfície de contato entre os resíduos, o que favorece uma maior coesão interparticular durante o prensado e resulta em um briquete mais denso, homogêneo e resistente (BRANDI et al., 2017; HARYADI et al., 2019).

A eficiência de um biocombustível sólido depende diretamente da interação entre as características geométricas da matéria-prima e o comportamento mecânico da biomassa sob pressão. No caso específico dos resíduos de MDF (*Medium Density Fiberboard*), a qualidade final do briquete é governada por dois fatores interdependentes: a granulometria das partículas e a densidade aparente alcançada após a compactação.

A durabilidade mecânica e a integridade estrutural do briquete estão intimamente ligadas ao tamanho das partículas que o compõem. A presença de fragmentos grandes ou desuniformes de madeira cria pontos de concentração de tensão na estrutura compactada; essas descontinuidades funcionam como planos de clivagem, gerando pontos de fratura que facilitam o esfarelamento e o rompimento do produto durante o manuseio e o transporte (SETTER et al., 2021).

Por essa razão, o preparo da biomassa exige um controle rigoroso de dimensões. Embora o pó e as maravalhas finas resultantes do usinamento do MDF possam ser alimentados diretamente na prensa, os resíduos brutos e fragmentos maiores demandam processos prévios de trituração, peneiramento e classificação granulométrica (MARTINEZ et al., 2017). Essa padronização é indispensável para otimizar o rearranjo das fibras durante a briquetagem. Quando a dimensão das partículas é reduzida, a área de superfície específica da biomassa aumenta significativamente, o que amplia os pontos de contato entre as fibras e favorece as ligações interparticulas, sejam elas por entrelaçamento mecânico ou pela ação dos ligantes naturais da madeira (BRANDI et al., 2017; HARYADI et al., 2019).

Como consequência direta do correto dimensionamento das partículas e do rearranjo estrutural das fibras durante a prensagem, obtém-se um incremento substancial na densidade do material. A densidade aparente e a densidade energética figuram como os parâmetros mais críticos para avaliar a viabilidade de biocombustíveis compactados, pois determinam a quantidade de energia contida por unidade de volume (HARYADI et al., 2019; CABAN et al., 2021).

Sob o ponto de vista logístico e econômico, o processo de densificação soluciona o principal gargalo do uso in natura dos resíduos madeireiros: o alto

volume específico. Ao reduzir drasticamente o espaço ocupado pelo resíduo, a briquetagem consolida uma estrutura maciça que dificulta a absorção rápida de umidade e eleva a resistência ao impacto e ao desgaste por abrasão (QUIRINO et al., 2012; MARTINEZ et al., 2021). Em termos práticos, um briquete de alta densidade não apenas otimiza o frete e a capacidade de armazenamento em galpões, como também garante uma queima mais estável, uniforme e prolongada em caldeiras e fornos industriais.

No processo da briquetagem, a plastização da liginina funciona como um aglutinante presente na biomassa, pode dispensar o uso de aglutinantes naturais e sintéticos. Os compostos do *pinus* e do *eucalipto*, possuem diferença estrutural e em quantidade; no pinus a lignina é de cerca de 28-32%, enquanto no eucalipto é de 20-25%, essa diferença influencia nas características finais dos briquetes (GOUVEIA, et al., 2017). Quanto maior for a compctação, maior será a densidade aparente do produto final (MARTINEZ et al., 2021).

A transformação de resíduos de MDF em briquetes constitui uma alternativa para o aproveitamento energético desses materiais, promovendo sua valorização e contribuindo para a redução do volume de resíduos destinados à disposição final. O processo de densificação proporciona aumento da densidade aparente e energética do material, favorecendo as etapas de armazenamento, transporte e manuseio. Além disso, a utilização dos briquetes como combustível pode contribuir para a diversificação das fontes de energia e para a redução do consumo de combustíveis fósseis e de biomassa florestal convencional.

Entre as principais vantagens associadas à briquetagem destacam-se:

- Redução do volume original, facilitando o armazenamento e o transporte;
- Agregação de valor a um material que seria destinado ao aterro sanitário;
- Substituição de combustíveis fósseis e de madeira nativa, contribuindo para a diversificação da matriz energética com fonte renovável;
- Menor geração de resíduos pós-combustão, em comparação com a madeira em estado natural.

A Figura 7 apresenta uma comparação das dimensões de armazenamento entre diferentes formas de combustíveis, evidenciando o efeito da densificação sobre o volume necessário para armazenamento.

Figura 7 - Relação de Dimensão de Armazenamento de Combustíveis.



Fonte: LIPPEL, 2019.

Dados do setor (BIOMAX, [s.d.]) corroboram essa vantagem, indicando que briquetes de resíduos madeireiros possuem poder calorífico médio entre 4.600 e 4.900 kcal/kg e umidade em torno de 12%, significativamente superiores aos valores da lenha comum. Entretanto, tais valores devem ser interpretados considerando-se a composição e as características específicas da matéria-prima empregada, uma vez que resíduos de MDF apresentam particularidades decorrentes da presença de resinas, aditivos e outros componentes utilizados em sua fabricação.

A Tabela 3 sintetiza as principais vantagens e limitações relacionadas à produção e à utilização de briquetes.

Tabela 3 - Vantagens do Uso de Briquetes.

VANTAGENS AMBIENTAIS	VANTAGENS ECONÔMICAS
É totalmente liberado pelo IBAMA;	Alto valor agregado;
Dispensa guia e reposição florestal junto ao órgão fiscalizador;	Pronto para a queima;
Carbono neutro (Carbon free);	Alto poder Calorífico;
Energia limpa, possui menor índice de poluição comparado aos outros combustíveis;	Fácil manuseio, armazenamento e transporte;
Fonte renovável de energia.	Melhor custo/benefício.

Fonte: BRAND, 2010

Vantagens

1. Redução de volume: A densificação reduz o volume do material em até 75%, otimizando o transporte e o armazenamento. Estima-se que 1 m³ de briquetes contém pelo menos quatro vezes mais energia que 1 m³ de resíduos em

sua forma original.

2. Padronização: Os briquetes possuem dimensões padronizadas, o que facilita o manuseio, a automação da alimentação em caldeiras e a uniformidade da combustão.

3. Maior poder calorífico e eficiência: A baixa umidade (9 a 12%) e a alta densidade energética resultam em maior eficiência de combustão e menor geração de fumaça, cinzas e fuligem em comparação com a lenha tradicional.

4. Valorização de resíduos: Transforma passivos ambientais em produtos com valor agregado, contribuindo para a economia circular e a redução da pressão sobre aterros sanitários.

5. Sustentabilidade: A combustão de briquetes de biomassa é considerada neutra em carbono, uma vez que o CO_2 liberado é reabsorvido no ciclo de crescimento das plantas. Contribui para a substituição de combustíveis fósseis e para a preservação de florestas nativas.

Limitações

1. **Custo de produção**: O processo exige investimento em equipamentos e consumo de energia para moagem, secagem e compactação, o que aumenta o custo de produção em comparação com o uso direto de resíduos in natura.

2. **Sensibilidade à umidade**: Os briquetes são intolerantes à umidade, podendo desintegrar-se quando expostos à água ou a ambientes com alta umidade, exigindo armazenamento em locais cobertos e ventilados (Silva, 2007).

3. **Barreiras de mercado**: A falta de maquinaria para produção, a falta de acesso ao mercado e a falta de demanda associada à falta de conhecimento sobre o produto são apontadas como desvantagens para a consolidação da cadeia de briquetagem (Júnior & Pimenta, 2015).

4. **Variabilidade da matéria-prima**: A qualidade dos briquetes depende de características da biomassa, como granulometria, umidade e composição química, exigindo controle rigoroso do processo.

Embora a briquetagem apresente vantagens relacionadas à densificação, à logística e ao aproveitamento energético dos resíduos, sua viabilidade não deve ser avaliada exclusivamente com base no poder calorífico do produto. No caso específico dos resíduos de MDF, devem ser consideradas também a composição da matéria-prima, as condições de processamento, o consumo energético associado à

produção dos briquetes e, principalmente, as características das emissões decorrentes de sua combustão. Esses aspectos são fundamentais para determinar a viabilidade técnica, econômica e ambiental dessa alternativa de aproveitamento.

3.7.TORREFAÇÃO

A torrefação pode ser definida como uma pirólise parcial, onde a biomassa é submetida a temperaturas que varia de 200 a 300°C, com restrição de oxigênio (VAN DER STELT et al., 2011; NUCCHEN et al., 2014; WANG et al 2020). Por meio

desse resultado, esse material pode ser utilizado diretamente na queima para produção de energias térmicas ou como insumo para gaseificação, bem como para a produção de pallets e briquetes (CARASCHI et al., 2019). Após a evaporação da água e redução dos teores voláteis, devido a degradação das hemiceluloses da biomassa reduzindo o teor de oxigênio do produto sólido final, concentrado os constituintes mais energéticos da biomassa a lignina (BACH et al., 2019; BARSKOV et al., 2019; HUANG et al., 2020).

O processo de torrefação pode ser compreendido como uma pré-carbonização, na qual a biomassa é submetida a baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas, permitindo reter no produto sólido os voláteis de maior poder calorífico. Durante a torrefação, ocorre predominantemente a degradação da hemicelulose, componente estrutural menos estável termicamente, enquanto a celulose e a lignina são preservadas em maior extensão.

O processo resulta em quatro transformações fundamentais:

1. **Eliminação de umidade**: a água livre e a água de constituição são removidas, reduzindo drasticamente o teor de umidade do material;
2. **Degradação de hemiceluloses**: ocorre a despolimerização e volatilização parcial das hemiceluloses, liberando ácido acético, fenóis e outros compostos de baixo peso molecular;
3. **Concentração de lignina**: a lignina, componente de maior valor energético da biomassa, é concentrada no produto sólido, aumentando sua densidade energética;
4. **Redução de oxigênio**: a eliminação de grupos oxigenados (carboxilas, hidroxilas e carbonilas) reduz o teor de oxigênio do material, elevando a relação carbono/oxigênio e, consequentemente, o poder calorífico.

A extensão dessas transformações é controlada pela combinação de temperatura e tempo de residência. O aumento da temperatura e do tempo de residência intensifica a degradação, elevando o poder calorífico e o teor de carbono fixo, mas reduz o rendimento mássico do processo. Estudos indicam que a temperatura exerce maior influência sobre as propriedades do produto final do que o tempo de residência.

3.7.1.Hidrofobicidade e Moabilidade

Duas propriedades físicas fundamentais são alteradas pela torrefação, impactando diretamente a logística e o processamento do material:

a. **Hidrofobicidade:** A torrefação reduz significativamente a higroscopicidade da biomassa, tornando-a hidrofóbica, ou seja, com baixa capacidade de absorver umidade do ambiente. Estudos demonstram que briquetes torrados permanecem inalterados quando imersos em água por uma hora, enquanto briquetes não tratados se desintegram em apenas 10 minutos. A umidade de equilíbrio da biomassa torrada situa-se na faixa de 2% a 6%. Essa característica é particularmente vantajosa para o armazenamento prolongado e para o transporte em condições climáticas adversas, além de contribuir para a maior eficiência da combustão, uma vez que não há gasto energético para evaporação de água.

b. **Moabilidade (Friabilidade**): A degradação parcial da estrutura fibrosa da madeira durante a torrefação reduz sua tenacidade, tornando o material mais friável e, portanto, mais fácil de moer. Essa propriedade, denominada *moabilidade*, reduz significativamente o consumo de energia no processo de moagem, etapa essencial para a briquetagem. A maior friabilidade também favorece a homogeneização granulométrica do material, o que resulta em briquetes com maior coesão e resistência mecânica. A redução da resistência mecânica da madeira torrada aumenta a superfície específica do combustível, proporcionando melhores condições para a transferência de calor durante a combustão.

3.7.2.Vantagens da Torrefação para o Aproveitamento Energético

A integração da torrefação como pré-tratamento na cadeia de briquetagem de resíduos de MDF confere as seguintes vantagens:

1. **Redução volumétrica:** A biomassa torrada sofre uma redução de

volume de aproximadamente 30%, mantendo cerca de 90% de sua energia original. Essa característica otimiza o transporte e o armazenamento.

2. **Padronização do combustível:** A torrefação confere ao material características mais homogêneas e padronizadas, independentemente da variabilidade da matéria-prima original, facilitando a automação dos sistemas de alimentação de caldeiras e a previsibilidade da combustão.

3. **Maior densidade energética:** A compactação do material torrado em briquetes resulta em uma densidade energética significativamente superior à do material in natura. Estudos com briquetes de MDF torrados a 300°C por 40 minutos reportaram densidade energética de 4,36 $Gcal.m^{-3}$.

4. **Baixa umidade de equilíbrio:** A umidade dos briquetes torrados, inferior a 7%, elimina a necessidade de secagem complementar e aumenta a eficiência da combustão, pois o calor gerado não é desperdiçado na evaporação de água.

5. **Maior vida útil:** A redução da atividade biológica, decorrente da eliminação de compostos orgânicos nutrientes durante a torrefação, aumenta a durabilidade do produto e reduz o risco de deterioração durante o armazenamento prolongado.

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 a biomassa *in natura* são:

- Maior valor energético: a torrefação degrada os constituintes menos energéticos da biomassa, reduzindo a quantidade de oxigênio e concentrando os constituintes com maiores teores de carbono, como a lignina, que possuem em média 4800 $kcal.kg^{-1}$ (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, melhor compactação das partículas, aumento da densidade do material (DAI et al., 2019; CAHYANTI et al., 2019).

- Menor teor de umidade: diminui a umidade presente na biomassa, aumenta a concentração de lignina, reduzindo a relação de hidrofílicos/ constituintes hidrofóbicos, com isso a biomassa de absorver umidade do ambiente (DAI et al., 2019; CAHYANTI et al., 2019).

- Maior durabilidade: diminui a atividade biológica e aumenta a vida útil do produto armazenado (CASTRO et al., 2019).

O processo de pirólise do MDF pode ser dividido em quatro estágios, correspondentes a degradação da resina, hemicelulose, celulose e lignina, como podemos observar na Tabela 4. Em um estudo sobre a cinética da pirólise de painéis de MDF, Pan et al. (2018), observou as temperaturas iniciais de degradação térmica de cada componente do MDF, 225°C para as resinas, 280°C para as hemiceluloses, 360 °C para celulose e 400° para a lignina. Através do estudo de tratamentos e a cinética de decomposição é conveniente para obter uma combustão incompleta desses materiais é uma importante fonte de algumas emissões tóxicas, como compostos orgânicos voláteis (VCOs) e aromáticos policíclicos hidrocarbonetos (PAHs) (GIRODS et al., 2008; MORENO et al., 2017).

Os gases gerados pela torrefação dos resíduos de MDF revestidos e não revestidos devem ser queimados em ambiente controlado, em um sistema fechado, sem emissão ao ambiente, devido aos compostos químicos gerados durante a queima (GIRODS et al., 2008; DEBAL et al., 2014). A Tabela 4 sintetiza os estágios da pirólise, com a temperatura inicial da degradação de cada constituinte, conforme Pan et al., 2018.

Tabela 4 - Estágios da Pirólise

Constituinte	Temperatura Inicial de Degradação (°C)
Resinas sintéticas (UF, MF, FF)	225
Hemiceluloses	280
Celulose	360
Lignina	400

Fonte: Adaptado de Pan et al. (2018).

Na produção do MDF, são utilizados adesivos, resinas, tintas, vernizes e óleos, que podem alterar 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 á presença de resinas, como ureia

formaldeído (UF), melamina formaldeído (MF) e fenol formaldeído (FF) (MORENO et al., 2017). Pelo aumento da temperatura e do tempo de torrefação e a redução da umidade da matéria prima tem efeitos significativos na estrutura e composição da biomassa. Por meio dessas mudanças de estruturas permite que a qualidade para o uso como combustível sólido de biomassa torrificadas sejam maiores que a matéria *in natura*.

Conforme estudo realizado por Andrade (2017), a torrefação melhora as características para uso energético dos resíduos de MDF, provenientes das indústrias moveleira e marcenarias. Ainda em Andrade (2017), autores encontraram valores de poder calorífico até 20% mais alto em partículas de MDF torrificadas às temperaturas de 280°C por 60 minutos. A torrefação aumenta 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).

Para o setor industrial que requer energia térmica em seus processos, a adoção da torrefação de resíduos de MDF pode representar uma alterativa para ganhos em seus processos, pois teria como matéria-prima um produto mais homogêneo em estrutura, menos higroscópico, mais energético (GRASSMANN et al., 2016).

A presença de resinas sintéticas, especialmente ureia-formaldeído e fenóis, nos resíduos de MDF representa um desafio para sua valorização energética direta, devido aos riscos de emissão de poluentes durante a combustão. Nesse sentido, a torrefação surge como um pré-tratamento térmico promissor, realizado em atmosfera inerte ou com baixo teor de oxigênio, a temperaturas entre 200°C e 300°C. Estudos indicam que este processo pode:

- Reduzir significativamente a emissão de formaldeído e outros compostos orgânicos voláteis durante a combustão subsequente;
- Aumentar o poder calorífico do material, em virtude da redução do teor de umidade e da decomposição parcial de componentes voláteis;
- Melhorar as propriedades de moabilidade e hidrofobicidade, facilitando o processo de briquetagem e armazenamento;
- Reduzir a massa do material, otimizando o transporte e o armazenamento.

A inclusão da torrefação no fluxo de processamento do MDF para produção de briquetes pode, portanto, aumentar a viabilidade técnica e ambiental da proposta,

mitigando preocupações relacionadas à presença de resinas e aditivos químicos.

3.7.3. Melhorias Energéticas e Redução de Poluentes

A aplicação da torrefação a resíduos de MDF apresenta benefícios significativos para o aproveitamento energético, especialmente no que concerne à redução de emissões de formaldeído.

Incremento do Poder Calorífico: A torrefação promove a concentração dos constituintes mais energéticos da biomassa. O poder calorífico da madeira torrada, por exemplo, atinge valores entre 23 e 24 MJ/kg. Estudos específicos com MDF demonstram que a torrefação a 280°C por 60 minutos pode elevar o poder calorífico em até 20% em comparação com o material in natura. Esse incremento decorre da redução do teor de oxigênio e da concentração de lignina, cujo poder calorífico médio situa-se em torno de 4.800 $kcal^{-1}$.

Redução de Formaldeído: A degradação térmica da resina ureia-formaldeído, inicia-se a partir de 225°C. Portanto, durante a torrefação conduzida entre 260°C e 280°C, ocorre a volatilização de formaldeído residual, amônia (NH_3) e ácido cianídrico (HCN), promovendo uma descontaminação térmica da matriz sólida. Esse processo é essencial para viabilizar a queima dos resíduos de MDF com emissões controladas, uma vez que a combustão direta do material bruto liberaria esses compostos tóxicos para a atmosfera.

Na avaliação do aproveitamento energético de resíduos provenientes do setor moveleiro, cumpre destacar que os painéis de fibra de média densidade (MDF) frequentemente apresentam recobrimentos superficiais, tais como lâminas melamínicas de baixa pressão (BP), acabamentos em poliuretano, tintas e vernizes sintéticos. A presença desses polímeros termofixos e adesivos à base de uréia-formaldeído altera a dinâmica da degradação térmica do material, introduzindo complexidade ao processo de conversão termoquímica.

Apesar dessa heterogeneidade estrutural, constata-se que a torrefação conduzida sob condições brandas e atmosférica controladas, especificamente na faixa de 300 °C com tempo de residência de até 40 minutos, atua como um pré-tratamento altamente eficaz para a volatilização e degradação desses compostos exógenos. Estudos apontam que os densificados (briquetes) confeccionados a partir de resíduos de MDF revestido e submetidos a essas condições térmicas atingem

densidade energética e perfil de combustibilidade equivalentes, e em determinados casos, superiores, aos observados em matrizes de MDF cru.

Ademais, análises físico-químicas e de espectrometria indicam que o processo de densificação do material torrificado não retém concentrações significativas de metais pesados no produto sólido final, validando a viabilidade técnica do biocombustível.

Entretanto, do ponto de vista da engenharia do processo e do impacto ambiental, a volatilização térmica dos revestimentos e resinas durante a torrefação e a subsequente queima gera uma corrente gasosa rica em compostos nitrogenados e orgânicos. Destacam-se o formaldeído livre, compostos orgânicos voláteis (COVs), a exemplo de tolueno e limoneno, cianeto de hidrogênio (HCN) e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), os quais possuem potencial carcinogênico e toxicidade respiratória severa.

Por conseguinte, para assegurar a conformidade ambiental e a viabilidade operacional do sistema de torrefação, os efluentes gasosos gerados devem ser canalizados para uma câmara de pós-combustão (combustão secundária) operando em temperaturas de, no mínimo, 850 °C e com tempo de residência adequado. Esse tratamento térmico secundário assegura a quebra termoquímica completa dos anéis aromáticos e das cadeias voláteis tóxicas, transformando os efluentes perigosos em CO_2 e H_2O e mitigando integralmente os riscos de poluição atmosférica.

3.7.4. Redução de Formaldeído e Controle de Emissões

A degradação térmica da resina ureia-formaldeído presente em painéis de MDF inicia-se a partir de 225 °C (PAN et al., 2018). Durante a torrefação conduzida na faixa de 260 °C a 280 °C, ocorre a volatilização do formaldeído residual, da amônia (NH_3) e do ácido cianídrico (HCN), promovendo a descontaminação térmica da matriz sólida (GIRODS et al., 2008; ANDRADE, 2017). Essa etapa de pré-tratamento revela-se indispensável para viabilizar o uso do biocombustível com emissões controladas, uma vez que a combustão direta do MDF *in natura* acarretaria a liberação direta desses compostos na atmosfera.

Simultaneamente à purificação do sólido, a fração gasosa gerada durante a torrefação, que abrange tanto resíduos revestidos quanto não revestidos, carrega compostos orgânicos voláteis (COVs), formaldeído e hidrocarbonetos aromáticos

policíclicos (HAPs) (GIRODS et al., 2008; MORENO et al., 2017). Para assegurar o cumprimento dos padrões de emissão e a eliminação desses efluentes gasosos, a corrente volátil deve ser encaminhada a uma câmara de combustão secundária operando a temperaturas em torno de 850 °C, com tempo de residência mínimo de 2 segundos. Tal condição favorece a destruição térmica dos contaminantes, convertendo-os em substâncias estáveis como CO_2, H_2O e N_2 (GIRODS et al., 2008; DEBAL et al., 2014).

A literatura especializada estabelece os fundamentos conceituais e regulatórios para o aproveitamento energético dos resíduos de MDF gerados no polo moveleiro de Toledo (PR). Embora o MDF apresente elevada trabalhabilidade e estabilidade dimensional, sua composição híbrida, constituída por fibras lignocelulósicas aglutinadas por resinas sintéticas, impõe gargalos ao descarte final. Estudos de caracterização termoquímica indicam que a biomassa possui potencial energético significativo, com poder calorífico superior entre 4.400 e 4.500 kcal\kg^{-1}. Nesse cenário, o processo de torrefação atua como pré-tratamento estratégico, pois reduz os teores de formaldeído e voláteis na matriz sólida ao mesmo tempo em que incrementa a hidrofobicidade, a trituração e a densidade energética do material, otimizando a qualidade dos briquetes para a combustão industrial.

Sob a ótica ambiental, a disposição inadequada de resíduos de MDF apresenta riscos de lixiviação de formaldeído e compostos fenólicos para o solo e lençóis freáticos, além de sobrecarregar a infraestrutura do aterro sanitário do município de Toledo (PR). No plano normativo, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e a legislação municipal pertinente (Lei nº 2.105/2012) determinam a responsabilidade compartilhada e a priorização da reciclagem e recuperação energética sobre a disposição final.

Assim, a briquetagem combinada à torrefação alinha-se às exigências de licenciamento e controle ambiental aplicáveis ao setor. Governança e Arranjos Logísticos Regionalizados. Para superar o entrave da escala produtiva individual das pequenas e médias empresas do polo moveleiro toledano, aponta-se a estruturação de consórcios setoriais ou cooperativas como modelo de governança viável. Essa estratégia inspira-se no arranjo institucional consolidado para a logística reversa de pneus no município, viabilizado pela articulação entre o setor privado, o poder público e o Ministério Público via Termo de Ajustamento de Conduta (TAC). Dessa forma, a convergência entre a qualidade da biomassa, as diretrizes ambientais e as

oportunidades de cooperação local consolidam o binômio torrefação-briquetagem como uma alternativa sustentável e tecnicamente viável para a região Oeste do Paraná.

4.METODOLOGIA

Esta pesquisa tem natureza qualitativa e exploratória, com objetivos descritivos e analíticos. Quanto aos procedimentos técnicos, enquadra-se como um estudo bibliográfico e documental. O propósito central é diagnosticar a realidade do polo moveleiro de Toledo (PR) e, em seguida, confrontar os dados obtidos com o referencial técnico-científico disponível acerca da valorização energética de resíduos de MDF provenientes da indústria moveleira de Toledo/PR para a produção de briquetes de biomassa.

A fundamentação teórica foi construída por meio de pesquisa em bases de dados acadêmicas, com destaque para Google Acadêmico, Periódicos CAPES e artigos institucionais de universidades. Foram utilizados os seguintes descritores, em português e inglês:

- *“resíduos de MDF”* e *“MDF waste”*;
- *“briquetagem de biomassa”* e *“briquette production”*;
- *“torrefação de MDF”* e *“torrefaction of wood panels”*;
- *“reaproveitamento energético de resíduos moveleiros”*;
- *“economia circular na indústria moveleira”*;
- *“painéis de madeira e gestão de resíduos”*;
- *“descontaminação térmica de resíduos de madeira reconstituída”*.

A seleção dos trabalhos priorizou publicações dos últimos 20 anos, incluindo artigos científicos, dissertações, teses, relatórios técnicos e normas regulatórias, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e a NBR ISO 14001.

Também foi analisada a estrutura pública de gestão de resíduos, em especial a Central de Recebimento de Resíduos Volumosos (inaugurada em 2018), que recebe semanalmente entre 20 e 25 toneladas de materiais volumosos, incluindo madeira e MDF oriundos de pequenos geradores. No entanto, conforme a Lei Municipal nº 2.105/2012, o serviço público não atende empresas de médio e grande porte, que precisam contratar serviços particulares.

Com base na literatura técnica, avaliou-se a torrefação como método de pré-tratamento térmico para a redução do teor de resinas sintéticas e outros contaminantes presentes no MDF. A torrefação consiste em um processo de termodegradação conduzido em atmosfera inerte (ou com baixo teor de oxigênio),

a temperaturas entre 200°C e 300°C, que promove a decomposição térmica de compostos voláteis e a degradação parcial de resinas como ureia- formaldeído e fenol-formaldeído (CHEN et al., 2018; MEDEIROS et al., 2020).

Estudos indicam que este processo pode:

- Reduzir a emissão de formaldeído durante a combustão posterior;
- Aumentar o poder calorífico do material torrefado;
- Melhorar a moabilidade e a hidrofobicidade do MDF tratado, facilitando a briquetagem;
- Diminuir a presença de compostos orgânicos voláteis (COVs) nocivos. A inclusão dessa etapa no fluxo de processamento do MDF para briquetes é considerada uma estratégia de descontaminação prévia, que pode aumentar a aceitabilidade ambiental e técnica do produto final.

Com base na literatura técnica, avaliou-se o processo de briquetagem aplicado ao MDF triturado, podendo este ser utilizado *in natura* ou após torrefação. A briquetagem consiste na compactação de partículas de biomassa sob alta pressão e temperatura (entre 100°C e 200°C), utilizando a lignina como aglutinante natural. A umidade ideal para o processo situa-se entre 8% e 15% (CARVALHO & BRINCK, 2004; SILVA, 2007).

Embora o Brasil ainda não possua normas específicas para briquetes de MDF, estudos como o de CUNHA *et al.* (2018) indicam que esse material apresenta densidade energética média comparável a outras biomassas, sendo necessário, contudo, realizar ensaios laboratoriais para determinação precisa do poder calorífico e das emissões resultantes da combustão, especialmente devido à presença de resinas sintéticas.

Esta pesquisa não incluiu ensaios experimentais ou análises laboratoriais dos briquetes produzidos a partir de MDF, torrefado ou não. O foco foi a revisão teórica e a contextualização da realidade local, identificando lacunas e oportunidades para futuras pesquisas aplicadas.

A metodologia adotada permitiu a integração entre o referencial técnico-científico e a análise situacional do município de Toledo, reforçando a relevância da proposta de reaproveitamento de resíduos de MDF, com possível pré- tratamento por torrefação, como estratégia de economia circular e gestão ambiental.

A ausência de políticas locais de logística reversa ou de incentivo à

valorização energética desses resíduos representa uma oportunidade perdida no contexto da economia circular e da gestão ambiental integrada. A implantação de uma cadeia de briquetagem a partir do MDF descartado poderia, portanto, não apenas reduzir a pressão sobre o aterro, mas também transformar um passivo ambiental em recurso energético, contribuindo para a segurança operacional do sistema de destinação final e para a sustentabilidade do polo moveleiro local.

Durante a elaboração desta dissertação foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial generativa (ChatGPT/OpenAI/ Gemini IA) exclusivamente como apoio à revisão gramatical, melhoria da clareza textual e sugestões de organização do texto. Todas as análises, interpretações dos resultados, decisões metodológicas, elaboração das hipóteses e conclusões foram realizadas pelo autor, que assume integral responsabilidade pelo conteúdo apresentado.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização da geração de resíduos de MDF no polo moveleiro de Toledo revela uma relação direta entre o porte das empresas, a capacidade de processamento e o volume de passivos gerados. Com base no perfil produtivo do polo regional e em dados consolidados sobre o rendimento do corte de painéis reconstituídos, estima-se que a perda percentual na transformação do MDF varie entre 12% e 20% da massa bruta processada (SILVA et al., 2020; PDU, 2022).

O mapeamento das rotas de descarte evidenciou três cenários principais, cada qual com implicações ambientais e logísticas distintas.

O primeiro cenário envolve a coleta pública comum e a saturação urbana. Empresas de menor porte, muitas vezes à margem da fiscalização, utilizam o sistema de coleta pública convencional ou direcionam os resíduos para a Central de Recebimento de Resíduos Volumosos municipal, inaugurada em 2018. Conforme relatórios do Instituto Água e Terra (IAT) (RODRIGUES, 2026) que a destinação dos resíduos de MDF gerados pelas atividades de marcenaria deve ser providenciada pelos próprios geradores, observando-se a legislação ambiental vigente e o encaminhamento do material para local ou empreendimento devidamente licenciado e autorizado para o recebimento e a destinação ambientalmente adequada desse tipo de resíduo.

O segundo cenário identificado é a doação informal de retalhos brutos para comunidades locais, marcenarias informais ou indivíduos que utilizam o material como lenha residencial ou em fornos de panificação. Embora essa prática possa parecer uma forma de reaproveitamento, ela representa um severo risco à saúde pública. Isso ocorre porque a queima descontrolada do MDF em ambientes abertos ou em fornos domésticos libera substâncias tóxicas provenientes da decomposição térmica das resinas sintéticas, como será discutido adiante.

O terceiro cenário, igualmente preocupante, é o acúmulo logístico ineficiente**.** Três das empresas investigadas relataram armazenar os resíduos em pátios ou galpões descobertos por longos períodos, devido à falta de empresas licenciadas que realizem o recolhimento sistemático a custos viáveis. Esse quadro gera riscos iminentes de incêndio, proliferação de vetores e contaminação do solo e das águas pluviais, agravando o passivo ambiental da região.

Do ponto de vista técnico, o principal entrave ao aproveitamento energético

direto dos resíduos do polo reside na composição química do aglutinante do MDF. A manufatura desses painéis emprega resinas à base de ureia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (FF), que conferem estabilidade mecânica às fibras de madeira, mas alteram drasticamente o perfil de emissões gasosas durante a combustão térmica convencional.

Ao contrário da biomassa florestal virgem, a queima direta do MDF bruto em caldeiras industriais ou fornos comerciais, como os observados nas destinações informais em Toledo, resulta na volatilização de compostos altamente tóxicos.

Estudos moleculares indicam que a decomposição térmica da resina UF em temperaturas inferiores a 400°C libera elevadas concentrações de formaldeído livre, ácido cianídrico, óxidos de nitrogênio e amônia. O descarte inadequado do MDF configura-se, portanto, como um passivo de contaminação atmosférica e ocupacional.

A caracterização teórica reforça que o teor de nitrogênio na biomassa de MDF bruto pode ser até vinte vezes superior ao da madeira de pinus e eucalipto puros, o que evidencia a urgência de um pré-tratamento eficaz antes de qualquer aproveitamento energético.

Logo, o reaproveitamento é viável, mas não como uma solução única e direta. A viabilidade existe em múltiplos sentidos (técnico, ambiental, econômico e regulatório), desde que respeitadas condições específicas, principalmente a obrigatoriedade da torrefação e a adoção de um modelo de gestão compartilhada. Dessa forma, é possível verificar diferentes formas de viabilidade desse reaproveitamento, sendo a viabilidade Técnica, Ambiental, Econômica e Logística e Regulatória e Legal.

O diagnóstico evidencia que a destinação atual dos resíduos de MDF em Toledo é marcada pela ausência de uma política estruturada de logística reversa para o setor moveleiro, pela fragmentação das iniciativas de gestão e pela desinformação dos pequenos geradores quanto aos riscos associados à queima e ao descarte inadequado. Esses achados corroboram os estudos de Farage et al. (2013) e Couto e Franco (2020), que identificaram cenários semelhantes em outros polos moveleiros brasileiros, nos quais a gestão de resíduos de painéis reconstituídos ainda é tratada de forma incipiente.

5.1. POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DE MDF

A caracterização energética dos resíduos de MDF, com base na literatura especializada, revela um potencial significativo para o aproveitamento em processos de combustão e gaseificação. Os parâmetros termoquímicos determinados por diferentes autores são sintetizados na Tabela 6.

Os dados demonstram que o MDF residual apresenta poder calorífico comparável ao de biomassas florestais de alto valor energético, como a madeira de eucalipto e pinus, posicionando-o como uma matéria-prima viável para a geração de energia térmica. O baixo teor de cinzas (1,4%) é um fator favorável, pois reduz os problemas associados ao entupimento de equipamentos e à formação de escórias em caldeiras.

Essa característica implica a necessidade de sistemas de controle de emissões para a captura e tratamento de compostos nitrogenados e formaldeído livre durante a combustão, sob pena de inviabilizar ambientalmente o aproveitamento energético direto do material bruto.

A torrefação emerge como uma solução tecnicamente promissora para superar as limitações do MDF bruto. Os dados compilados na revisão sistemática da literatura indicam que o processo atua de forma seletiva sobre os componentes da biomassa e sobre as cadeias poliméricas das resinas, resultando em melhorias significativas nas propriedades energéticas do material.

Conforme, Pan et al. (2018), a degradação térmica da resina ureia-formaldeído inicia-se a 225°C, promovendo a volatilização de formaldeído residual, amônia (NH_3) e ácido cianídrico (HCN). Esse processo reduz em até 65% o teor de formaldeído na matriz sólida (Andrade, 2017), ao mesmo tempo em que degrada parcialmente a hemicelulose, concentrando os constituintes de maior valor energético, celulose e, sobretudo, lignina. Como resultado, o poder calorífico do material eleva-se em até 20%, atingindo valores próximos a 4.800 $kcal.kg^{-1}$ (PORTILHO, 2021).

A torrefação também confere ao material hidrofobicidade, ou seja, baixa capacidade de absorver umidade do ambiente. Briquetes torrados permanecem inalterados quando imersos em água por uma hora, enquanto briquetes não tratados se desintegram em apenas 10 minutos (PORTILHO, 2021). Além disso, a degradação parcial da estrutura fibrosa reduz a tenacidade do material, tornando-o mais friável e, portanto, mais fácil de moer (DAI et al., 2019; CAHYANTI et al.,

2019). Essa propriedade, denominada moabilidade, reduz significativamente o consumo de energia no processo de moagem, etapa essencial para a briquetagem.

Contudo, a solução técnica não se esgota na valorização do sólido. Os gases gerados durante a torrefação, que contêm formaldeído, VOCs, PAHs, NH_3 e HCN, devem ser conduzidos a uma câmara de combustão secundária operando a temperaturas ≥ 850°C, com tempo de residência mínimo de 2 segundos, conforme preconizado por Girods et al. (2008). Essa etapa favorece a destruição térmica dos poluentes, convertendo-os em CO_2, H_2O e N_2, e evita a transferência do passivo ambiental do solo para a atmosfera.

A briquetagem é uma tecnologia consolidada de densificação de biomassas, que transforma partículas de baixa densidade em um combustível sólido de alta densidade energética. A aplicação da briquetagem aos resíduos de MDF, especialmente após a torrefação, revela-se uma estratégia eficaz para superar as limitações logísticas do material pulverizado.

O processo de compactação, conduzido sob pressões hidráulicas de 1.500 a 2.000 $kgf.cm^{-2}$ e temperatura controlada entre 100°C e 120°C, promove a plastificação da lignina remanescente, que atua como aglutinante natural, dispensando a adição de ligantes sintéticos (BRAND et a., 2010). O resultado é a consolidação de um biocombustível sólido de formato cilíndrico estável, com umidade final inferior a 10% e densidade energética significativamente superior à da biomassa original.

A briquetagem proporciona uma redução de volume de até 75% em relação ao material in natura, otimizando o transporte e o armazenamento. Estima-se que 1 m^3 de briquetes contém pelo menos quatro vezes mais energia que 1 m^3 de resíduos em sua forma original (DIAS et al., 2012). Além disso, os briquetes geram menor quantidade de fumaça, cinzas e fuligem em comparação à lenha tradicional (Dantas et al., 2012), e apresentam um teor de umidade (8–10%) significativamente menor que o da lenha tradicional (25–50%), resultando em maior eficiência energética e menor emissão de poluentes (DONATTO, 2016).

5.2. FLUXOGRAMA DE PROCESSAMENTO EM ESCALA PILOTO PROPOSTO

Atendendo ao terceiro objetivo específico deste estudo, propõe-se um fluxograma de processamento em escala piloto para a produção de briquetes a partir dos resíduos de MDF gerados no polo moveleiro de Toledo (PR). O fluxo foi concebido para operar com capacidade inicial de processamento de 10 a 20 toneladas por mês, com potencial de expansão para até 35 toneladas mensais (volume estimado total do polo), integrando as etapas de segregação, moagem, torrefação, queima dos gases e briquetagem.

Para viabilizar o aproveitamento energético de resíduos lignocelulósicos complexos, a estruturação de uma rota tecnológica sequencial e padronizada é indispensável para garantir a segurança ambiental e a eficiência do produto final (SETTER et al., 2021). A conversão de sobras de MDF oriundas do polo moveleiro em um biocombustível de alto rendimento fundamenta-se em um fluxo integrado que abrange desde a triagem da matéria-prima até a densificação final. Esse arranjo prevê etapas sequenciais de preparação, purificação térmica, destruição de efluentes gasosos voláteis e compactação mecânica, assegurando a obtenção de briquetes homogêneos e ecologicamente conformes.

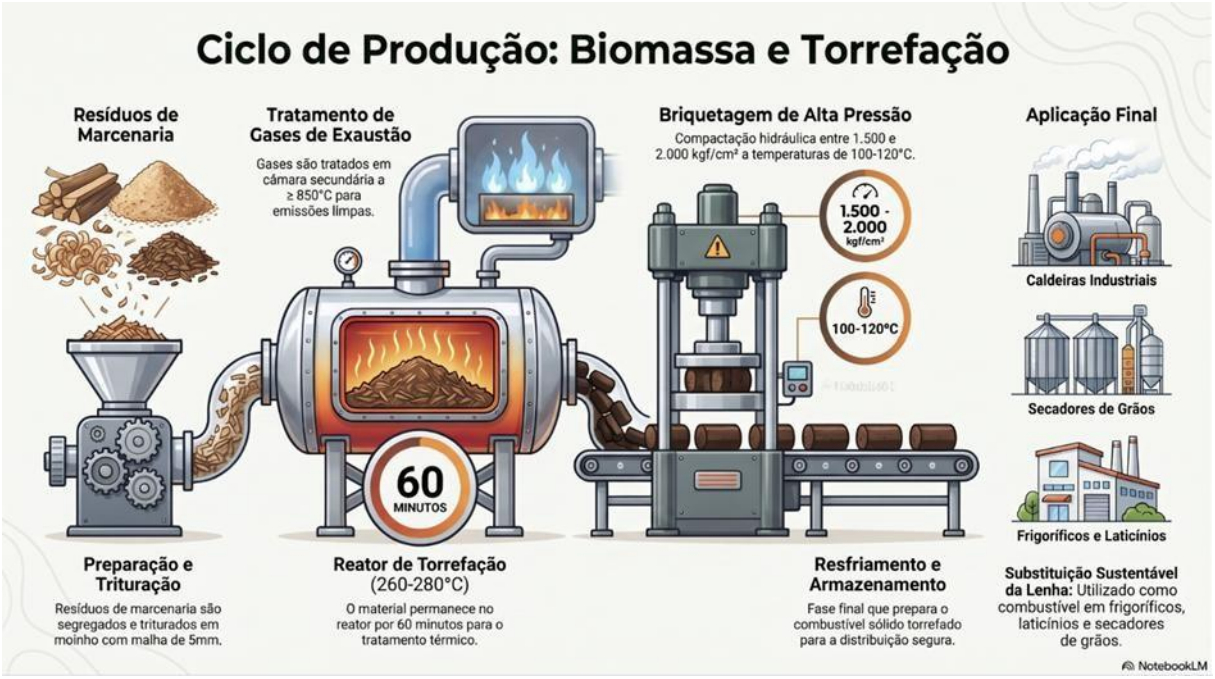
1. **Segregação na fonte:** Realizada pelas próprias marcenarias associadas ao consórcio. Os resíduos são separados em três categorias: MDF cru (sem revestimento), MDF melamínico (com revestimento de baixa pressão) e MDF pintado/lacado. Essa classificação é fundamental para reduzir a variabilidade química do material a ser processado (Moreno et al., 2017).
2. **Moagem e classificação granulométrica:** O material é triturado em moinho de martelos equipado com peneira de 5 mm, visando partículas com dimensões inferiores a esse diâmetro. A uniformidade granulométrica é essencial para garantir a homogeneidade da transferência de calor durante a torrefação e a coesão durante a briquetagem (Setter et al., 2021; Haryadi et al., 2019).
3. **Torrefação:** Conduzida em reator rotativo com aquecimento indireto, em atmosfera com baixo teor de oxigênio (< 3%), a temperaturas entre 260°C e 280°C, com tempo de residência de 60 minutos. Essas condições operacionais são baseadas nos estudos de (ANDRADE, 2017; PAN et al., 2018)
4. **Queima dos gases em câmara secundária:** Os gases gerados durante a torrefação são conduzidos a uma câmara de combustão secundária (*afterburner*)

operando a temperaturas ≥ 850°C, com tempo de residência mínimo de 2 segundos, garantindo a destruição térmica completa dos poluentes (GIRODS et al., 2008; DEBAL et al., 2014).

5. **Briquetagem:** O sólido torrefado é resfriado e encaminhado a uma briquetadeira hidráulica, sob pressão de 1.500 a 2.000 kgf.com^{-2} e temperatura controlada entre 100°C e 120°C, sem adição de aglutinantes sintéticos (BRAND et al., 2019; MARTINEZ et al., 2021).

6. **Resfriamento, ensacamento e armazenamento:** Os briquetes cilíndricos (50–80 mm de diâmetro) são resfriados, ensacados e armazenados em local coberto e ventilado.

Figura 8 – Fluxograma de Processamento em Escala Piloto.



Fonte: figura do fluxograma conforme elaborado pela autora com auxílio de Gemini IA.

A análise integrada dos dados primários e da literatura especializada confirma que o reaproveitamento energético de resíduos de MDF por meio da torrefação e briquetagem é tecnicamente viável, desde que observadas as seguintes condições:

1. **Torrefação obrigatória:** A presença de resinas ureia-formaldeído exige o pré-tratamento térmico para a descontaminação da matriz sólida e a redução de emissões de formaldeído durante a combustão. A torrefação conduzida entre 260°C e 280°C por 60 minutos é a condição operacional que maximiza o incremento do poder calorífico

(até 20%) e a redução de poluentes (até 65% de formaldeído residual).

2. **Tratamento dos gases:** Os gases gerados durante a torrefação devem ser submetidos à combustão em câmara secundária a ≥ 850°C, com tempo de residência mínimo de 2 segundos, para garantir a destruição térmica dos compostos tóxicos. Esta etapa é condição *sine qua non* para a viabilidade ambiental do processo.

3. **Controle granulométrico:** A uniformidade das partículas (moagem com peneira de 5 mm) é essencial para a homogeneidade da torrefação e para a coesão dos briquetes. A moabilidade melhorada do material torrefado reduz o consumo energético da moagem.

4. **Umidade controlada:** A faixa de umidade ideal para a briquetagem (8–15%) é atendida pela torrefação, que reduz a umidade de equilíbrio para 2–6%, eliminando a necessidade de secagem complementar.

Estudos de caso documentados na literatura corroboram a viabilidade técnica da briquetagem de resíduos moveleiros. Bauer e Sellitto (2019), ao analisarem empresas que produzem briquetes a partir de resíduos de madeira no Rio Grande do Sul, concluíram que a atividade se configura como viável, com melhor rentabilidade e vantagens operacionais expressivas, especialmente em relação ao armazenamento e à logística.

5.3. ASPECTO AMBIENTAL COM A TORREFAÇÃO

Do ponto de vista ambiental, a solução proposta atua em três frentes complementares:

Primeiro: redução da pressão sobre o aterro sanitário. Ao desviar as 35 toneladas mensais de resíduos de MDF do Aterro Sanitário Municipal, o modelo reduz a pressão sobre uma infraestrutura já comprometida (conforme relatado pelo IAT em 2024) e evita a lixiviação de formaldeído, fenóis e outros contaminantes para o solo e os corpos hídricos, bem como a emissão difusa de metano proveniente da degradação anaeróbia do material orgânico no aterro.

Segundo: substituição de recursos naturais. A queima controlada dos briquetes em caldeiras industriais substitui a lenha de eucalipto, atualmente extraída de florestas plantadas, mas que ainda demanda áreas de cultivo, consumo de água e insumos agrícolas. O potencial energético dos resíduos equivale a aproximadamente 87,5 metros estéreos de lenha por mês, o que representa uma redução significativa

da demanda por biomassa florestal primária.

Terceiro: combustão mais limpa. A torrefação, ao volatilizar compostos nitrogenados e reduzir a higroscopicidade do material, torna a combustão mais limpa, com menor emissão de material particulado, NOx e COVs em comparação à queima direta do MDF bruto ou da lenha úmida. Embora a emissão de NOx ainda seja uma preocupação, a tecnologia existente permite seu controle por meio de sistemas de desnitrificação ou pela própria calibração do processo.

A avaliação do ciclo de vida (ACV) de Mitchell e Stevens (2009) reforça a importância de alternativas que priorizem a recuperação energética. Os autores compararam diferentes destinações para resíduos de painéis de madeira no Reino Unido, concluindo que o aterro sanitário apresentou o maior impacto ambiental, enquanto a geração local de energia a partir dos resíduos mostrou o menor impacto.

A solução proposta está em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), que estabelece a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada. A rota torrefação mais a briquetagem enquadra-se no conceito de reciclagem energética (inciso VI do art. 9º, da lei nº 12.305/2010), uma modalidade de tratamento que transforma o resíduo em energia antes da disposição final.

Além disso, a proposta atende às determinações da Lei Estadual nº 20.607/2021 (Paraná), que responsabiliza integralmente os grandes geradores pelo gerenciamento de seus resíduos, e da Lei Municipal nº 2.105/2012, que restringe o serviço público de coleta a pequenos geradores. Ao internalizar a gestão dos resíduos por meio do consórcio, as marcenarias de Toledo cumprem sua obrigação legal, evitando multas e passivos judiciais.

A exigência da câmara de combustão secundária para os gases da torrefação atende aos padrões da Resolução CONAMA nº 316/2002, que disciplina o licenciamento ambiental de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Assim, a solução não apenas soluciona o passivo ambiental, mas também constrói um modelo de negócio juridicamente seguro e tecnicamente robusto.

No entanto, para que a PNRS seja implementada em sua plenitude, é fundamental que estados e municípios estabeleçam regulamentações complementares, especialmente no que diz respeito à coleta seletiva e à logística reversa. No caso específico de Toledo, a criação de um consórcio intermunicipal ou

de uma cooperativa setorial poderia viabilizar economicamente a cadeia de briquetagem.

5.4. LACUNAS E PERSPECTIVAS

Apesar dos resultados promissores, o estudo revela lacunas que devem ser abordadas em pesquisas futuras e em ações de política pública: Ausência de dados experimentais locais: A presente pesquisa baseou-se em dados da literatura internacional e nacional para a caracterização termoquímica do MDF. Recomenda-se a realização de ensaios laboratoriais com amostras específicas do polo moveleiro de Toledo, incluindo análises termogravimétricas (TGA), calorimetria de bomba para determinação precisa do poder calorífico, cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) para identificação de poluentes gasosos, e ensaios de lixiviação em cinzas para verificação de metais pesados.

1. Heterogeneidade dos resíduos: Os resíduos gerados localmente incluem MDF cru, MDF melamínico e MDF pintado/lacado, com variações significativas na composição química. Estudos futuros devem investigar o comportamento térmico de cada tipologia e a necessidade de segregação na fonte como etapa mandatória.
2. Viabilidade econômica detalhada: Embora o modelo de consórcio tenha sido proposto como solução para a barreira de escala, estudos de viabilidade econômica detalhados são necessários para determinar o custo-benefício do investimento, incluindo análises de payback, taxa interna de retorno (TIR) e valor presente líquido (VPL).
3. Logística reversa estruturada: A implementação do modelo requer a estruturação de um sistema de logística reversa coletiva, com pontos de coleta centralizados e transporte programado, inspirado na experiência bem-sucedida da logística reversa de pneus em Toledo (CONCEIÇÃO et al., 2017).
4. Políticas públicas indutoras: A viabilização da cadeia de briquetagem depende de políticas públicas indutoras, incluindo incentivos fiscais, linhas de crédito específicas, cessão de terreno para a usina piloto e facilitação do licenciamento ambiental.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação teve como objetivo central desenvolver uma proposta técnico-conceitual para o aproveitamento energético dos resíduos de MDF gerados no polo moveleiro de Toledo (PR), abrangendo a caracterização quanti-qualitativa do fluxo residual, a análise termoquímica comparativa entre o material *in natura* e o torrefado, a proposição de um fluxograma de processamento em escala piloto e a discussão dos entraves regulatórios, logísticos e econômicos à implementação local.

Com base nos resultados obtidos e nas análises realizadas ao longo do estudo, é possível afirmar que todos os objetivos propostos foram alcançados.

Em síntese, esta dissertação oferece uma contribuição relevante para a gestão sustentável dos resíduos de MDF no polo moveleiro de Toledo, demonstrando que a briquetagem com pré-tratamento por torrefação constitui uma alternativa técnica, ambiental, econômica e regulatoriamente viável para a valorização energética desses resíduos.

A proposta não apenas soluciona um passivo ambiental crônico, mas também transforma um problema em oportunidade, gerando benefícios socioambientais significativos e posicionando a região como referência em economia circular no setor moveleiro brasileiro. Ao oferecer subsídios concretos para políticas públicas locais e regionais, bem como para iniciativas privadas voltadas à circularidade, este trabalho contribui para a transição do setor de madeira e móveis em direção a modelos produtivos mais sustentáveis, conciliando desenvolvimento econômico, preservação ambiental e bem-estar social.

A sustentabilidade, como demonstrado ao longo desta pesquisa, não é um custo a ser suportado, mais uma oportunidade de inovação, desenvolvimento e construção de um futuro de baixo carbono para a região Oeste do Paraná.

Caracterizar quantitativa e qualitativamente o fluxo de resíduos de MDF gerado no polo moveleiro de Toledo, a pesquisa demonstrou que o município produz aproximadamente 7 mil kg a cada 40 dias, de resíduos de MDF, compostos por retalhos de usinagem, aparas de corte e pó de lixamento. Conforme informações levantadas sobre resíduos, são feitas doação informal para queima residencial e acúmulo logístico ineficiente em pátios descobertos. Esses achados evidenciam que a destinação atual dos resíduos é marcada pela ausência de uma política estruturada de logística reversa para o setor moveleiro, pela fragmentação das iniciativas de

gestão e pela desinformação dos pequenos geradores quanto aos riscos associados à queima e ao descarte inadequado. O diagnóstico realizado permitiu dimensionar a magnitude do problema e fornecer subsídios concretos para a proposição de soluções.

Por meio da revisão da literatura especializada, revelou que o MDF bruto apresenta poder calorífico superior de 4.427,8 kcal.kg^{-1}, com a torrefação conduzida entre 260°C e 280°C por 60 minutos promove a redução de até 65% do teor de formaldeído residual, o incremento do poder calorífico em até 20% (atingindo valores próximos a 4.800 kca.kg^{-1}), a redução da umidade de equilíbrio para 2-6%, o aumento da hidrofobicidade e a melhoria da moabilidade.

A análise demonstra que a solução proposta está em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), que estabelece a ordem de prioridade na gestão de resíduos e contempla a reciclagem energética como modalidade de tratamento. A proposta também atende às determinações da Lei Estadual nº 20.607/2021 (Paraná) e da Lei Municipal nº 2.105/2012, que restringe o serviço público de coleta a pequenos geradores.

No entanto, foram identificados entraves significativos: a ausência de uma logística reversa estruturada para o setor moveleiro, a falta de parcerias entre poder público, empresas e instituições de pesquisa, a restrição do serviço público de coleta a pequenos geradores e a ausência de incentivos fiscais e linhas de crédito específicas para a implantação da tecnologia. Para superar essas barreiras, propõe-se a formação de um consórcio setorial ou cooperativa que centralize a gestão dos resíduos e o processamento térmico, inspirado na experiência bem-sucedida da logística reversa de pneus em Toledo, que articulou poder público, Ministério Público e empresas por meio de Termo de Ajustamento de Conduta (TAC).

No que concerne à viabilidade técnica, a pesquisa aponta que a torrefação combinada com a briquetagem constitui uma rota tecnológica factível para a valorização energética dos resíduos de MDF, desde que observadas as condições operacionais específicas. A proposta técnico-conceitual desenvolvida integra aspectos energéticos, ambientais, logísticos e regulatórios, fornecendo subsídios para a implantação de estudos em escala piloto.

Entretanto, sua efetiva viabilidade depende de validação experimental, da caracterização dos diferentes tipos de resíduos gerados localmente e de análises econômicas específicas para as condições de implantação.

Destaca-se como contribuição original deste trabalho a ênfase dada à necessidade de tratamento dos gases gerados durante a torrefação, aspecto frequentemente negligenciado na literatura sobre valorização energética de resíduos de painéis reconstituídos. A proposição da câmara de combustão secundária como etapa compulsória do processo, e não como opcional, constitui um diferencial que amplia o escopo da discussão para além da valorização energética, incorporando as exigências de engenharia ambiental e licenciamento, e evitando a transferência do passivo ambiental do solo para a atmosfera.

Os resultados obtidos constituem inferências teóricas baseadas em revisão de literatura e em dados indiretos, sendo necessários estudos experimentais futuros para a comprovação prática da eficiência da torrefação aplicada aos resíduos específicos do polo moveleiro de Toledo.

7. TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se:

- A realização de ensaios experimentais com amostras específicas do polo moveleiro de Toledo, incluindo análises termogravimétricas (TGA), calorimetria de bomba, cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) e ensaios de lixiviação em cinzas;
- A condução de estudos de viabilidade econômica detalhados, com análises de *playbacks*, taxa interna de retorno (TIR) e valor presente líquido (VPL);
- A realização de testes de combustão em escala piloto para verificação da eficiência energética e do perfil de emissões dos briquetes de MDF torrefado;
- A estruturação de um projeto piloto com a participação de empresas do polo moveleiro, poder público e instituições de pesquisa, nos moldes do consórcio setorial proposto;
- A investigação do comportamento térmico de cada tipologia de resíduo (cru, melamínico, pintado) para determinação da necessidade de segregação na fonte.

8.REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABIMCI - **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE**. Estudo Setorial. Curitiba: ABIMCI, 2023.

ABIMÓVEL. **Relatório de junho/2021**. São Paulo: ABIMÓVEL, 2021. Disponível em: http://abimovel.com/capa/acervo-digital/. Acesso em: 20 jun. 2025.

ABRAMOVAY, R. **Inovações para que se democratize o acesso à energia, sem ampliar as emissões.** Ambiente & Sociedade, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 1-18, jul./set. 2014.

ALI, L. et al. **Exploring the potential of chemical recycling of waste medium-density fiberboards (MDF) under oxidative and pyrolytic conditions**. Sustainable Chemistry and Pharmacy, v. 41, 101683, 2024.

ALVES, C. O.; VIEIRA, D. B.; RODRIGUES, C. L. S. **Avaliação do potencial de aproveitamento energético dos resíduos de madeira e derivados gerados em fábricas do polo moveleiro de Ubá – MG**. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 23, n. 1, p. 203-212, 2013.

ANDRADE, A. M. **Processos de densificação e conversão termoquímica de resíduos lignocelulósicos**. Seropédica: EDUR, 2017.

ANDRADE, L. C. R. **Torrefação de resíduos de MDF para fins energéticos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

ARAUCO. **Melamina**. 2026. Disponível em: https://arauco.com.br/categoria/arauco-melamina/. Acesso em: 2 jun. 2026.

ARAUJO, G. M. G. **Desafios para aplicação da metodologia do Berço ao Berço ao ciclo de vida de móveis de MDF e MDP**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de

Janeiro, 2012.

ARAÚJO, R. S. et al**. Fontes de energias renováveis: pesquisas, tendências e perspectivas sobre as práticas sustentáveis**. Research, Society and Development, v. 11, n. 11, e468111133893, 2022.

ARTAXO, P**. Mudanças climáticas: caminhos para o Brasil.** Ciência e Cultura, São Paulo, v. 74, n. 4, p. 1-13, dez. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016**. São Paulo: ABRELPE, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT ISO/TR 14062**: **gestão ambiental: integração de aspectos ambientais no projeto e desenvolvimento do produto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: **resíduos sólidos: classificação. 2**. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E ENGENHARIA DAS EMPRESAS INOVADORAS (ANPEI). **Como alavancar a inovação tecnológica nas empresas**. São Paulo: ANPEI, 2004.

ASSUNÇÃO, G. M. **A gestão ambiental rumo à EC: como o Brasil se apresenta nessa discussão.** Revista Eletrônica Sistemas & Gestão, v. 14, n. 2, p. 222-234, 2019.

ATES, S. et al. **Effects of heat treatment on some properties of MDF (medium-density fiberboard).** Wood Material Science & Engineering, v. 12, n. 3, p. 158-164, 2017.

AYRES, R. U. **Industrial metabolism**. *In*: AUSUBEL, J. (ed.). Technology and environment. Washington: National Academy Press, 1989. p. 23-49.

BACH, Q. V. et al. **Torrefaction of biomass: a review of production methods for biocoal from lignocellulosic biomass.** Bioresource Technology, v. 290, 121743, 2019.

BAUER, L.; SELLITTO, M. A**. Estímulos e barreiras para o aproveitamento de resíduos de madeira na fabricação de briquetes.** Matéria, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, e-12411, 2019.

BAUMAN, Z. **Confiança e medo na cidade**. Tradução de Eliana Aguiar. Rio de Janeiro: Zahar, 2005.

BIAZUS, A.; HORA, A. B.; LEITE, B. G. P. **Panorama de mercado: painéis de madeira**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 32, p. 49-90, set. 2010.

BONCIU, F. **The European Economy: from a linear to a circular economy**. Romanian Journal of European Affairs, v. 14, n. 4, p. 78-91, 2014.

BONFIM, V. B. **O potencial da energia renovável para a transição energética global**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, ano 8, ed. 8, v. 3, p. 102-117, ago. 2023.

BRANCO, R. **Manutenção industrial**. 2025. Disponível em: http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/2927-manutencao-industrial/. Acesso em: 5 jun. 2025.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Curitiba: UFPR, 2010.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução RDC nº 36, de 1º de junho de 2009**. **Dispõe sobre a exposição, a venda e a entrega ao consumo de formol ou de formaldeído (solução a 37%) em drogaria, farmácia, supermercado, armazém e empório, loja de conveniência e drugstore**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 47, 18 jun. 2009.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 2 ago. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora n. 15 (NR-15)**: **atividades e operações insalubres**. Brasília, DF: MTE,2026. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria- de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-15-anexo-11.pdf. Acesso em: 2 ago. 2026.

BRAUNGART, M.; MCDONOUGH, W.; BOLLINGER, A. **Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions: a strategy for eco-effective product and system design**. Journal of Cleaner Production, v. 15, n. 13-14, p. 1337-1348, 2007.

BRITO, A. C. et al. **Estudo sobre as fontes renováveis mais viáveis para produção de energia no Brasil**. Belo Horizonte: UNA, 2022.

BUXTON, N. **COP 21 charades: spin, lies and real hope in Paris. Globalizations**, v. 13, n. 1, p. 934-937, 2016.

BUZIN, P. J. W. K. **Desenvolvimento de briquetes autorredutores a partir de carepas de processamento siderúrgico para utilização em forno elétrico a arco**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

CAHYANTI, M. N. et al**. Densification of torrefied biomass: a review on mechanical properties, water resistance, and energy consumption**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 112, p. 320-335, 2019.

CAHYANTI, M. N. et al. **Torrefaction of biomass for energy applications: a review**. Energy Conversion and Management, v. 198, 111919, 2019.

CALDERONI, S. **Os bilhões perdidos no lixo**. 4. ed. São Paulo: Humanitas, 2008.

CAMPELO, I. P. F. et al. **Fontes alternativas de bioenergia: uma revisão sobre o uso da serragem e maravalha de madeira**. Revista Caribeña de Ciencias Sociales, Miami, v. 14, n. 8, p. 1-12, 2025.

CARDONA, S. et al. **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, p. 17-26, 2019.

CARVALHO, A. M. M. L.; BRINCK, G. A. **Briquetagem de resíduos vegetais**. Viçosa: UFV, 2004.

CASAGRANDE, E. F. et al. **Indústria moveleira e resíduos sólidos: considerações para o equilíbrio ambiental**. Revista Educação & Tecnologia, Curitiba, v. 8, p. 209-228, 2004.

CASSIOLATO, J.; LASTRES, H.; SZAPIRO, M. **Arranjos e sistemas produtivos locais e proposições de políticas de desenvolvimento industrial e tecnológico**. NT 27 - Projeto de Pesquisa Arranjos e Sistemas Produtivos Locais e as Novas Políticas. Rio de Janeiro: Redesist/UFRJ, 2000. Disponível em: http://www.ie.ufrj.br/redesist/P2/textos/. Acesso em: 2 ago. 2026.

CECHIN, A. D.; VEIGA, J. E. **A economia ecológica e evolucionária de Georgescu-Roegen**. Revista de Economia Política, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 438-454, jul./set. 2010.

CECHIN, A.; VEIGA, J. E. **O fundamento central da Economia Ecológica**. *In*: MAY, P. (org.). Economia do meio ambiente: teoria e prática. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier/Campus, 2010. p. 33-48.

CHAVES, L. I. **Panorama do Design para Sustentabilidade**. *In*: SIMPÓSIO PARANAENSE DE DESIGN SUSTENTÁVEL, 1., 2009, Curitiba. Anais [...]. Curitiba:

UTFPR, 2009. p. 1-10.

CHEN, W. H. et al. **An evaluation on improvement of pulverized biomass property for solid fuel through torrefaction**. Applied Energy, v. 100, p. 408-418, 2018.

CHEN, Z. et al. **Thermokinetic analysis and product characterization of Medium Density Fiberboard pyrolysis.** Bioresource Technology, v. 250, p. 420-427, 2018.

COELHO, M. C. S. D. M. **O formaldeído em ambiente laboral: determinação do ácido fórmico em urina de trabalhadores de uma fábrica produtora de formaldeído**. 2009. Dissertação (Mestrado em Toxicologia Analítica, Clínica e Forense) – Faculdade de Farmácia, Universidade do Porto, Porto, 2009.

COLUMBIA FOREST PRODUCTS. **The history of MDF: where it came from and how it's made.** Columbia Forest Products Blog, 8 jul. 2019. Disponível em: https://www.columbiaforestproducts.com/blog/history-mdf-came-mad. Acesso em: 15 maio 2026.

CONCEIÇÃO, R. A. et al. **Logística reversa de pneus**. Orientador: Pedro Aloisio Webler. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Administração) – Centro Universitário Assis Gurgacz (FAG), Toledo, 2017. Acesso em: 2 ago. 2026.

COPENOR. **Ficha de informações de segurança de produtos químicos: Formol.** Camaçari: COPENOR, 2009. Disponível em: www.copenor.com.br. Acesso em: maio 2014.

CORREA, S. M. **Impacto das emissões veiculares na qualidade do ar da cidade do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: FAPERJ, 2005.

CORRÊA, R.; RIBEIRO, H. C. M. **Economia Circular sob a ótica de relatórios de sustentabilidade.** Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental, v. 11, n. 3, p. 175-193, set. 2022.

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

Campinas: Ed. da Unicamp, 2008.

COSTA, E. S. et al. **Análise das relações e ações conjuntas entre as empresas do APL têxtil da região metropolitana de São Paulo: contribuições para o seu crescimento**. Interações, Campo Grande, v. 19, n. 2, p. 401-415, abr./jun. 2018.

COSTA, N. R. **Economia Circular como proposta para o processo industrial siderúrgico nacional**. 2017. Monografia (Especialização em Economia do Meio Ambiente) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

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, p. 12518-12536, 2020.

CUNHA, T. Q. G. et al. **Characterization of MDF residue and its use in pellet production.** Nativa, Sinop, v. 6, n. 3, p. 300-304, 2018.

DAI, J. et al. **Torrefaction of biomass: a review of production methods for biocoal from lignocellulosic biomass.** Bioresource Technology, v. 287, 121416, 2019.

DANTAS, A. P.; SANTOS, R. R.; SOUZA, S. C. **O briquete como combustível alternativo para a produção de energia**. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 3., 2012, Goiânia. Anais [...]. Goiânia: IBEAS, 2012. v. 1, p. 1-5.

DEBAL, M. et al. **Torrefaction of wood waste and its use as a fuel.** Waste Management, v. 34, n. 12, p. 2573-2581, 2014.

DEITOS, T. et al**. Sustentabilidade e inovação em energias verdes: biomassa como alternativa energética renovável**. Revista de Gestão Social e Ambiental, Miami, v. 18, n. 10, e09196, 2024.

DIAS, J. D. S. et al. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012.

DIEZ, T.; POSADA, A. **The fab and the smart city: the use of machines and technology for the city production by its citizens**. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TANGIBLE, EMBEDDED AND EMBODIED INTERACTION, 7., 2013, Barcelona. **Proceedings [...]**. Barcelona: ACM, 2013. p. 447-454.

DONATTO, R. **Aproveitamento energético de resíduos de madeira**. São Paulo: Unesp, 2016.

ELDORADO BRASIL. **Quem somos**. Três Lagoas: Eldorado Brasil, 2024. Disponível em: https://www.eldoradobrasil.com.br/pb/a-eldorado-brasil/quem-somos/. Acesso em: 10 maio 2024.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **A solução da Economia Circular para a poluição por plásticos**. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Ativos inteligentes**: **a liberação do potencial da Economia Circular**. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2016.

EMERSON, D. W. V. **Métodos de análise de formaldeído e otimização da Reação de Hantzschen**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

EMÓBILE. **Indicadores do setor moveleiro**. 2020. Disponível em: https://emobile.com.br/site/setor-moveleiro/2020. Acesso em: 20 jul. 2026.

ESA, M. R.; HALOG, A.; RIGAMONTI, L. **Strategies for minimizing construction and demolition wastes in Malaysia**. Resources, Conservation and Recycling, v. 120, p. 219-229, 2017.

EUROPEAN COMMISSION. **Closing the loop – an EU action plan for the Circular Economy**. Brussels: European Commission, 2015.

FAGUNDES, H. A. V. **Produção de madeira serrada e geração de resíduos do**

processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande do Sul. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

FARAGE, R. M. P. **Aproveitamento dos resíduos lignocelulósicos gerados no polo moveleiro de Ubá para fins energéticos**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

FARAGE, R. M. P. et al. **Avaliação do potencial de aproveitamento energético dos resíduos de madeira e derivados gerados em fábricas do polo moveleiro de Ubá-MG.** Ciência Florestal, Santa Maria, v. 23, n. 1, p. 203-212, 2013.

FELFILI, F. E. F.; LUENGO, C. A.; SOLER, P. B. **Torrefação de biomassa: características, aplicações e perspectivas.** *In*: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2003, Campinas. Anais [...]. Campinas: Unicamp, 2003.

FERREIRA, W.; FURTADO, A. C. **Dos combustíveis fósseis às fontes renováveis de energia: uma breve revisão.** Contribuciones a Las Ciencias Sociales, São José dos Pinhais, v. 17, n. 12, p. 1-21, 2024.

FORTUNA, A. L. L. **Impactos ambientais dos plásticos: biopolímeros como alternativa para a redução do acúmulo de embalagens flexíveis de Polipropileno no meio ambiente**. 2020. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

FREIRE, E. et al. **Resinas de baixo impacto ambiental para painéis de madeira**. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 25, n. 2, p. 495-504, 2015.

GEJER, L.; TENNENBAUM, C. **Os três princípios do design circular Cradle to Cradle**. São Paulo: Ideia Circular, 2017.

GENTIL, L. V. B. **Tecnologia e economia do briquete de madeira**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.

GIDDENS, A. **As consequências da modernidade**. Tradução de Raul Fiker. São Paulo: Editora UNESP, 1991.

GIRODS, P. et al. **Emissions of volatile organic compounds from torrefaction of wood residues**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 83, n. 2, p. 168-177, 2008.

GONÇALVES, T. M.; BARROSO, A. F. F. **A Economia Circular como alternativa à Economia Linear**. *In*: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE, 11., 2019, São Cristóvão. Anais [...]. São Cristóvão: UFS, 2019.

GRAUER, A. et al. **Qualidade do ar: gestão e monitoramento**. *In*: SIMPÓSIO BRASIL ALEMANHA EM MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL, 3., 2018, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba, 2018.

GUIMARÃES, L. B. M. **Design/Desenvolvimento de produto: conceitos, definições e modelos.** Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2009.

GUREVA, M. A.; DEVIATKOVA, Y. S. **Formação do conceito de uma Economia Circular**. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**, v. 15, n. 2, p. 156-169, 2020.

HAZARDOUS SUBSTANCES DATA BANK (HSDB). **Formaldehyde**. Bethesda: National Library of Medicine, 2014. Disponível em: toxnet.nlm.nih.gov. Acesso em: ago. 2014.

HOFFMANN, W. H.; SCHLOSSER, R. **Success factors of strategic alliances in small and medium-sized enterprises: an empirical survey**. Long Range Planning, v. 34, n. 3, p. 357-381, 2001.

INDEXBOX. **Brazil – MDF – Market analysis, forecast, size, trends and insights**. IndexBox Platform, 1 mar. 2026.

INDUKERN. **Ficha de informações de produtos químicos: Formol**. São Paulo: Indukern, 2008. Disponível em: www.indukern.com.br. Acesso em: maio 2014.

INSTITUTO ÁGUA E TERRA (IAT). **Relatório de gestão de aterros sanitários e resíduos industriais do Estado do Paraná**. Curitiba: IAT, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades**: **Toledo.** Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/. Acesso em: out. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC). **Chemical agents and related occupations: a review of human carcinogens**. Lyon: IARC, 2012.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC). **Formaldehyde, 2-butoxyethanol and 1-tert-butoxypropan-2-ol**. Lyon: IARC, 2004. (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, v. 88).

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC). **Formaldehyde, 2-butoxyethanol and 1-tert-butoxypropan-2-ol**. Lyon: IARC, 2006. (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, v. 88). Disponível em: http://monographs.iarc.fr/ENG/recentpub/vol88.php. Acesso em: 2 ago. 2026.

IWAKIRI, S. **História, evolução, tecnologia e perspectivas**. Revista Opiniões, Curitiba, p. 12-18, set./nov. 2012. Disponível em: http://www.revistaopinioes.com.br/cp/materia.php?id=859. Acesso em: 19 nov. 2025.

IWAKIRI, S. et al**. Avaliação das propriedades de painéis aglomerados produzidos com resíduos de serrarias de nove espécies de madeiras tropicais da Amazônia**. Acta Amazonica, Manaus, v. 42, n. 1, p. 59-64, 2012.

IWAKIRI, S. et al. **Produção de painéis aglomerados de alta densificação com uso de resina melamina-ureia-formaldeído.** Cerne, Lavras, v. 11, n. 4, p. 323-328, out./dez. 2005.

IWAKIRI, S. et al. **Resíduos de serrarias na produção de painéis de madeira aglomerada de eucalipto.** Scientia Agraria, Curitiba, v. 1, n. 1-2, p. 23-28, 2000.

JOHANSSON, F. **Alternativas de destinação de resíduos de MDF**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

KACHBA, Y. R.; HATAKEYAMA, K. **Estratégias de inovação em APLs: viés para o desenvolvimento de produtos de moda.** Produção, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 751-761, out./dez. 2013.

KAZAZIAN, T. (org.). **Haverá a idade das coisas leves: design e desenvolvimento sustentável.** São Paulo: Senac, 2005.

KORHONEN, J.; HONKASALO, A.; SEPPÄLÄ, J. **Circular Economy: the concept and its limitations.** Ecological Economics, v. 143, p. 37-46, 2017.

KUMARI, G.; RAWAT, S. **Briquetting: a technique for the densification of biomass for agriculture waste**. *In*: Biomass-based clean technologies for sustainable development. London: Taylor & Francis, 2021.

KUMARI, P. et al. **Quality parameters and densification process of biomass briquettes: a review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 140, 110731, 2021.

LADEIRA, C. A. F. **Biomarcadores genotóxicos e polimorfismos genéticos em trabalhadores expostos a formaldeído**. 2009. Dissertação (Mestrado em Biologia Molecular Humana) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2009.

LEITÃO, A. **Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o século XXI**. Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting, Aveiro, v. 1, n. 2, p. 149-171, 2015.

LEMOS, H. M. **As normas ISO 14000**. Rio de Janeiro: Instituto Brasil PNUMA, 2012. Disponível em: http://www.brasilpnuma.org.br/saibamais/iso14000.html. Acesso em: out. 2025.

LENIC, J. MDF – **Yesterday, today and tomorrow**. Les, v. 48, n. 5, p. 129-133, 1996.

LIMA, L. J. B.; HAMZAGIC, M. **Gases de efeito estufa e poluição do ar: semelhanças e diferenciais**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, ano 7, ed. 9, v. 6, p. 102-144, set. 2022.

LIMBERGER, D. C. H. **Processos de recuperação, reuso e destinação do formol em laboratório de anatomia**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

LIPPEL. **Briquetagem e peletização**: **transformando resíduos de biomassa em briquetes e pellets.** Agrolândia: Lippel, 2025. Disponível em: http://www.lippel.com.br/br/sustentabilidade/briquetagem-e-peletizacao.html. Acesso em: 26 mar. 2025.

LUZ, B. **Economia circular Holanda-Brasil: da teoria à prática**. Rio de Janeiro: Exchange 4 Change Brasil, 2017.

MALAGUTI, C. **Requisitos ambientais para o desenvolvimento de produtos**: **manual técnico.** São Paulo: CSPD - Centro São Paulo Design, 2005.

MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis: requisitos ambientais dos produtos industriais.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005.

MARTINS, J. **Notas sobre a escolha do método de aglomeração de matérias-primas por briquetagem e pelotização.** *In*: SIMPÓSIO SOBRE REDUÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 1987, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre, 1987.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS, F. B. **Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 27, p. 121-156, mar. 2008.

MAYER, F. M. et al. **Characterization of analytical fast pyrolysis vapors of medium-density fiberboard (MDF) using metal modified HZSM-5**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 130, p. 1-9, 2018.

MAYER, Z. A. et al. **Propriedades térmicas de painéis de MDF com diferentes teores de resina.** Matéria, Rio de Janeiro, v. 28, n. 2, e20230045, 2023.

MEDEIROS, D. L. et al. **Torrefação de resíduos de painéis de madeira para produção de biocombustíveis sólidos**. Energia e Ambiente, v. 12, n. 2, p. 45-58, 2020.

MEDEIROS, D. T. et al. **The effect of post-heat treatment in MDF panels**. Materials Research, v. 22, n. 1, e20180421, 2019.

MENDES, R. F. et al. **Efeito da associação de bagaço de cana, do tipo e do teor de adesivo na produção de painéis aglomerados**. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 161-170, 2012.

MENDONÇA, F. A. L. **Adoção de EC e práticas sustentáveis: estudo de caso em um abatedouro de aves**. 2022. Monografia (Bacharelado em Administração) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2022.

MENDONÇA, F. M. **Formação, desenvolvimento e estruturação de arranjos produtivos locais da indústria tradicional do Estado de Minas Gerais**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio de Janeiro,

Rio de Janeiro, 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Matriz energética**. Brasília, DF: MMA, 2010. Disponível em: http://www.brasil.gov.br/meioambiente/2010/11/matriz-energetica. Acesso em: 2 ago. 2026.

MITCHELL, A.; STEVENS, G. **Life cycle assessment of closed loop MDF recycling: Microrelease trial**. Oxon: WRAP, 2009.

MORDOR INTELLIGENCE. **Medium Density Fiberboard (MDF) Market**: **size, share & trends analysis**. Mordor Intelligence, 2024.

MORENO, A. I.; FONT, R.; CONESA, J. A. **Physical and chemical evaluation of furniture waste briquettes.** Waste Management, v. 49, p. 245-252, 2017.

MOSTAGHEL, R.; OGHAZI, P. **Circular business model challenges and lessons learned – an industrial perspective.** Sustainability, v. 10, n. 3, 739, 2018.

MOTA, V. O.; FILHO, A. G. **Economia Circular: um reaproveitamento sistemático para o desenvolvimento de um novo modelo industrial**. Revista Científica Eletrônica Estácio, Ribeirão Preto, v. 10, n. 10, p. 188-203, dez. 2017.

MOTTA, C. Z.; MOTTA, M. G. **Estudo de caso para o reaproveitamento do pó de MDF na fabricação de briquete**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Gestão Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2015.

MOTTA, R. S. et al. **Mudança do clima no Brasil: aspectos econômicos, sociais e regulatórios**. Brasília, DF: IPEA, 2011.

NASCIMENTO, A. C. D.; VALDEZ-PIZARRO, J.; MORAES, R. R. **Estratégias para o fortalecimento ambiental das micro e pequenas empresas moveleiras de Marabá**. Amazônia em Foco, v. 1, p. 23-39, 2013.

NASCIMENTO, C. R. et al. **Qualidade de briquetes produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos para geração de energia térmica**. Revista Árvore, Viçosa, v. 40, n. 4, p. 755-763, 2016.

NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH (NIH). **Formaldehyde surveillance program**. Bethesda: NIH, 2018.

NHUCHEN, D. R.; BASU, P.; ACHARYA, B. **A comprehensive review on biomass torrefaction.** International Journal of Renewable Energy & Biofuels, v. 2014, p. 1-26, 2014.

NUNES, R. S. B.; SERRA, J. C. V. **Quantificação de resíduos de madeira provenientes de empresas moveleiras de pequeno porte e alternativas de aproveitamento**. Revista Ciência da Madeira, v. 10, n. 3, p. 175-185, 2019.

OBI, O. F.; PECENKA, R.; CLIFFORD, M. J. **A review of biomass briquette binders and quality parameters**. Energies, v. 15, n. 7, p. 2426, 2022.

OLIVEIRA, C. **Moderna torrefação de biomassa para fins de energia**. LinkedIn Pulse, 2024.

OMONIYI, T. E.; ONILUDE, M. A. **Technoeconomic review of briquette production in a screw press and hydraulic piston press.** *In*: ZEPKA, L. Q.; DIAS, R. R.; JACOB-LOPES, E. (ed.). Biomass based products. London: IntechOpen, 2024.

ÖZALP, M. et al. **Investigation of the effects of heat treatment on medium density fiberboard (MDF).** Turkish Journal of Forestry, v. 25, n. 4, p. 530-533, 2024.

PAN, X. et al. **Pyrolysis kinetics of medium density fiberboard.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 134, p. 1-9, 2018.

PAULA, J. C. M. **Aproveitamento de resíduos de madeira para confecção de briquetes**. 2006. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2006.

PEGORIN, M. C.; CALDEIRA-PIRES, A. A.; OLIVEIRA, E. **Caminhos e interações da Economia Circular: estudo baseado em revisão integrativa de literatura e análise bibliométrica.** *In*: ENCONTRO DA ANPAD, 46., 2022. Anais [...]. Maringá: ANPAD, 2022.

PEREIRA, L. C. F. **O design para a Economia Circular: repensando a forma como fazemos as coisas.** 2020. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2020.

PEREIRA, N. S. **Degradação anaeróbica de formaldeído em reator operado em bateladas sequenciais contendo biomassa imobilizada**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

PIEKARSKI, C. M. **Proposta de melhoria do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2013.

PIMENTEL, A. B.; FONTANETTI, A. **Economia Circular**. São Carlos: UFSCar/CPOI, 2020.

PLANO DE DESENVOLVIMENTO URBANO (PDU). **Diagnóstico da cadeia produtiva moveleira do município de Toledo**. Toledo: Secretaria Municipal de Desenvolvimento Econômico, 2022.

PORTILHO, G. R. **Recuperação energética de resíduos de painéis MDF (medium density fiberboard) por meio da torrefação e briquetagem**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2021.

PREFEITURA MUNICIPAL DE TOLEDO. **Central de Recebimento de Resíduos Volumosos**. Toledo: Prefeitura Municipal, 2025. Disponível em: https://www.toledo.pr.gov.br/old/noticia/central-de-recebimento-da-a-destinacao-

correta- para-materiais-volumosos-em-toledo. Acesso em: 16 out. 2025.

PREFEITURA MUNICIPAL DE TOLEDO. **Locais diferentes para descarte de cada tipo de lixo**. Toledo: Prefeitura Municipal, 2025. Disponível em: https://www.toledo.pr.gov.br/noticias/meio-ambiente/municipio-de-toledo-tem-locais-diferentes-para-descarte-de-cada-tipo-de-lixo. Acesso em: 16 out.2025.

PREFEITURA MUNICIPAL DE TOLEDO. **Prefeitura de Toledo busca resolver graves problemas no aterro sanitário**. Toledo: Prefeitura Municipal, 2025. Disponível em: https://www.toledo.pr.gov.br/noticias/meio-ambiente/prefeitura-de-toledo-busca-resolver-graves-problemas-no-aterro-sanitario. Acesso em: 16 out. 2025.

PROTÁSIO, T. P. et al**. Compactação de biomassa vegetal não madeireira para produção de biocombustíveis sólidos**. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 31, n. 67, p. 209-222, 2011.

QUEIROGA, A. T. D. **Economia Circular e consumo sustentável: explorando relações entre os modelos de negócios e o comportamento do consumidor**. 2023. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

QUIRINO, W. F. **Briquetagem de resíduos ligno-celulósicos**. **Circular Técnica do LPF**, Brasília, DF, v. 1, n. 2, p. 69-80, 1991.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília, DF: LPF, 2014. Disponível em: https://www.exemplo.com/link-do-artigo. Acesso em: 9 jun. 2025.

RADDIN, H. **The economics of the system producing dry process medium density fiberboard**. Forest Products Journal, v. 20, n. 3, p. 39-44, 1970.

RAMDAS, V. et al. **Bio-coal briquetting as a potential sustainable valorization strategy for fine coal. Energies,** v. 18, n. 14, 2025.

REPORTLINKER. **Global Medium Density Fibreboard and High Density Fibreboard Production by Country,** 2023. ReportLinker Database, 2023.

RODRIGO, T. **A evolução dos painéis de madeira no mobiliário.** eMóbile, 3 jan. 2022. Disponível em: https://emobile.com.br/site/industria/a-evolucao-dos-paineis-de-madeira-no-mobiliario/. Acesso em: 15 maio 2026.

RODRIGUES, E. F. **Informações sobre a destinação de resíduos de MDF em Toledo/PR**. [Correspondência]. Mensagem recebida por Elisley A. Rodrigues em: 22 jul. 2026.

RODRIGO, T. **A evolução dos painéis de madeira no mobiliário**. eMóbile, 3 jan. 2022. Disponível em: https://emobile.com.br/site/industria/a-evolucao-dos-paineis-de-madeira-no-mobiliario/. Acesso em: 15 maio 2026.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F. A.; AMARAL, D. C.; TOLEDO, J. C.; SILVA, S. L.; ALLIPRANDINI, D. H.; SCALICE, R. K. **Gestão de desenvolvimento de produto**: **uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006.

SALGADO, E. G.; SALOMON, V. A. P.; MELLO, C. H. P.; FASS, F. D. M.; XAVIER, A. F. **Modelos de referência para desenvolvimento de produtos: classificação, análise e sugestões para pesquisas futuras**. Revista Produção Online, Florianópolis, v. 10, n. 4, p. 886-911, dez. 2010.

SANQUETTA, C. R. et al. **Produção, importação, exportação e consumo aparente de painéis de madeira no Brasil entre 1961 e 2016**. BIOFIX Scientific Journal, v. 5, n. 1, p. 44-49, 2020.

SANTOS, A. J. dos. **Manejo florestal e sustentabilidade da madeira**. Curitiba: Editora UFPR, 2009.

SARTORI, L. et al. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de briquetes produzidos com resíduos agrícolas e florestais**. Ciência Florestal, v. 31, n. 2, p. 890-910, 2021.

SEBRAE/PR. **Diagnóstico do setor moveleiro no Oeste do Paraná**. Curitiba: SEBRAE/PR, 2022.

SILVA, D. A. **Briquetagem de resíduos agroindustriais**. Campinas: Unicamp, 2007.

SILVA, D. A. et al**. Balanço de massa e rendimento do desdobro de painéis de madeira na indústria de móveis**. Revista Árvore, v. 44, p. e4412, 2020.

SILVA, H. M. F.; ARAÚJO, F. J. C. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: uma revisão bibliográfica**. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, v. 8, n. 3, 2022.

SILVA, J. C. **Sinal verde para móveis de eucalipto**. Revista da Madeira, Curitiba, ed. especial eucalipto, p. 136-138, 2003.

SINDMÓVEIS TOLEDO. **Panorama do setor moveleiro local**. Toledo: SINDMÓVEIS, 2023.

VERONEZ, D. A. L. et al. **Potencial de risco para a saúde de docentes, pesquisadores e técnicos de anatomia expostos ao formaldeído**. Interfacehs: Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade, v. 5, n. 2, p. 1-14, 2006.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. **Panorama de mercado: painéis de madeira**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 40, p. 323-384, 2014.

WEBER, C.; IWAKIRI, S. **Utilização de resíduos de compensados, MDF e MDP para produção de painéis aglomerados**. Ciência Florestal, v. 25, n. 2, p. 406-413, 2015.

WINANDY, J. E.; KRZYSIK, A. M. **Thermal degradation of wood fibers during hot-pressing of MDF composites. Part I: Relative effects and benefits of thermal exposure**. Wood and Fiber Science, v. 39, n. 3, p. 450-461, 2007.

WRAP. **Composting Wood or Cardboard Waste with Green Garden or Household**

Kitchen Waste. Banbury: WRAP, 2007.

Sites Consultados

1. ARCHDAILY. **Painéis de madeira**: as diferenças entre MDF, MDP, compensado e OSB. Disponível em: https://www.archdaily.com.br/br/926416/paineis-de-madeira-as-diferencas-entre-mdf-mdp-compensado-e-osb. Acesso em: 15 maio 2026.

2. KRONOSPAN. **Painel de fibra de madeira de alta densidade 706**. Disponível em: https://kronospan.com/pt_PT/products/view/kronobuild/paineis-de-fibra-de-madeira/painel-de-fibra-de-madeira-de-alta-densidade-706/. Acesso em: 15 maio 2026.

3. LEROY MERLIN. **Chapas e painéis**. Disponível em: https://www.leroymerlin.com.br/chapas-e-paineis. Acesso em: 15 maio 2026.

4. MADEIRAS GASÔMETRO. **Chapa de MDP**. Disponível em: https://www.madeirasgasometro.com.br/chapas-e-paineis/chapa-de-mdp. Acesso em: 15 maio 2026.

5. TORRES MÓVEIS. **MDP, MDF ou OSB**: entenda as diferenças. Disponível em: https://www.torresmoveis.com/mdp-mdf-ou-osb-entenda-as-diferencas/. Acesso em: 15 maio 2026.