



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

Leticia Simões Ribeiro

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO SIDERÚRGICO EM
POLIPROPILENO PARA PRODUÇÃO DE MADEIRA PLÁSTICA

Rio de Janeiro
2024

Leticia Simões Ribeiro

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO SIDERÚRGICO EM
POLIPROPILENO PARA PRODUÇÃO DE MADEIRA PLÁSTICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadoras:

Profa. Dra. Ana Lúcia Nazareth da Silva

Profa. Dra. Mayara Amario

Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro

2024

Ribeiro, Leticia Simões.

Título: ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO
SIDERÚRGICO EM POLIPROPILENO PARA PRODUÇÃO
DE MADEIRA PLÁSTICA / Leticia Simões Ribeiro. – 2024.

f. : il. 30 cm

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2024.

Orientador: Ana Lúcia Nazareth da Silva e Mayara Amario.

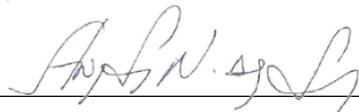
1. Resíduos. 2. Reciclagem. 3. Compósitos. 4. Descarbonização. I. Silva, Ana Lúcia Nazareth II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III.

Letícia Simões Ribeiro

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO SIDERÚRGICO EM
POLIPROPILENO PARA PRODUÇÃO DE MADEIRA PLÁSTICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela banca:



Ana Lúcia Nazareth da Silva. Doutora. UFRJ.



Carina Mariane Stolz. Doutora. UFRGS.

Documento assinado digitalmente



ESTEVAO FREIRE

Data: 29/07/2024 18:12:27-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Estevão Freire. Doutor. UFRGS.



Cristiane Xavier da Silva. Doutora. UFRJ.

Rio de Janeiro

2024

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, de coração, aos meus pais, Ana e Marcos, por me mostrarem o valor dos estudos e fazerem de tudo pela minha educação, abrindo mão de conforto e bens materiais para criar e formar eu e meu irmão. Às minhas orientadoras, Ana Lúcia e Mayara (duas! Que sorte a minha), pela paciência, aprendizado e parceria. À Juliana e Rafael, por me permitirem conciliar estudos e trabalho, incentivando cada passo meu e tornando esse sonho possível. Ao meu companheiro Eduardo, por ser meu espelho e braço direito. Aos professores Carina Stolz e Assed Haddad pelas contribuições e oportunidades que me foram dadas. Aos colegas do IMA, especialmente ao Renan, por compartilhar conhecimento e me ajudar tanto. À minha família, por me proporcionar um crescimento cercado de pessoas do bem e uma base sólida. Aos colegas do PEA aos amigos de vida, por tornarem essa caminhada mais leve.

RESUMO

RIBEIRO, Letícia Simões. **ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO SIDERÚRGICO EM POLIPROPILENO PARA A PRODUÇÃO DE MADEIRA PLÁSTICA**. Rio de Janeiro, 2024. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

As atividades siderúrgicas geram grande quantidade de resíduos, incluindo o Fluff, que é produzido durante o beneficiamento da sucata ferrosa. O Fluff, de baixa densidade e difícil triagem, apresenta aproveitamento complicado devido à sua heterogeneidade. Este trabalho avalia a produção de compósitos de polipropileno comercial e Fluff para produção da madeira plástica, amplamente utilizada na construção civil em áreas externas, substituindo a madeira convencional. Inicialmente, caracterizou-se o resíduo quanto à composição e estabilidade térmica. Em seguida, Fluff e polipropileno foram processados em extrusora dupla rosca e os compósitos (com 5% e 10%, m/m) prensados para análise de resistência à tração. As placas resultantes apresentaram coloração similar à madeira plástica convencional. A análise de TGA indicou boa estabilidade térmica dos compósitos, enquanto a reológica mostrou maior viscosidade (menor MFI) do material. O ensaio de resistência à tração revelou que a incorporação do Fluff não alterou a resistência à tração do material, sugerindo uma vantagem na substituição parcial de um polímero comercial por um resíduo pós-industrial. A avaliação dos dados de redução de CO₂ equivalente com o reaproveitamento do Fluff indicou sua importância para a descarbonização nas indústrias siderúrgicas. A análise SWOT confirmou que o reaproveitamento do Fluff em matrizes poliméricas para madeira plástica é viável e contribui significativamente para a descarbonização das atividades industriais siderúrgicas.

Palavras-chave: Fluff; Madeira plástica; Reciclagem; Siderurgia; Descarbonização

ABSTRACT

RIBEIRO, Letícia Simões. **REUSE OF STEEL RESIDUE IN POLYPROPYLENE MATRICES FOR THE PRODUCTION OF PLASTIC WOOD**. Rio de Janeiro, 2024. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Steelmaking activities generate a large amount of waste, including Fluff, which is produced during the processing of ferrous scrap. Fluff, characterized by low density and difficult sorting, presents challenges for utilization due to its heterogeneity. This study evaluates the production of composites from commercial polypropylene and Fluff for the production of plastic wood, widely used in outdoor construction, replacing conventional wood. Initially, the waste was characterized in terms of composition and thermal stability. Subsequently, Fluff and polypropylene were processed in a twin-screw extruder, and the composites (with 5% and 10% by mass) were pressed for tensile strength analysis. The resulting plates exhibited a color similar to conventional plastic wood. TGA analysis indicated good thermal stability of the composites, while rheological analysis showed higher viscosity (lower MFI) of the material. The tensile strength test revealed that the incorporation of Fluff did not alter the material's strength, suggesting an advantage in partially replacing a commercial polymer with post-industrial waste. The evaluation of CO₂ equivalent reduction data with the reuse of Fluff indicated its importance for decarbonization in the steel industry. The SWOT analysis confirmed that the reuse of Fluff in polymer matrices for plastic wood is feasible and significantly contributes to the decarbonization of industrial steelmaking activities.

Keyword: Fluff; Wood-plastic; Recycling; Steelmaking; Decarbonization.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
1.2	Justificativa	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Compósitos poliméricos, processamento e propriedades.....	15
2.2	Sustentabilidade de compósitos poliméricos à base de resíduos pós-consumo	19
2.3	Madeira plástica para aplicação no setor da construção civil	20
2.4	A Indústria Siderúrgica	22
2.4.1	Reciclagem da sucata	25
2.4.2	Processamento de sucata no equipamento Shredder	26
2.4.3	Geração de resíduos siderúrgicos	28
2.5	Resíduos sólidos.....	31
2.5.1	Reciclagem.....	33
2.6	Mudanças climáticas e os gases de efeito estufa	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1	Materiais	39
3.2	Metodologia.....	39
3.2.1	Amostragem (1ª etapa).....	40
3.2.2	Caracterização do resíduo (2ª etapa)	42
3.2.3	Preparação e extrusão do compósito (3ª etapa)	42
3.2.5	Cálculo da emissão de gases de efeito estufa (5ª Etapa)	46
3.2.6	Avaliação do produto, através da análise SWOT (6ª Etapa)	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	Caracterização do resíduo Fluff.....	50
4.1.1	Gravimetria.....	50
4.1.2	Análise Termogravimétrica (TGA)	52
4.1.3	Análise por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	53
4.2	Preparação dos compósitos PP/Fluff	56
4.2.1	Processamento por Extrusão.....	56
4.2.2	Processo de granulação dos extrusados – <i>pelletização</i>	57
4.2.3	Processamento por moldagem por compressão	58
4.2	Caracterização dos compósitos produzidos	59
4.3.1	Índice de Fluidez – MFI do PP e compósitos PP/Fluff.....	59
4.3.2	Análise termogravimétrica (TGA) do PP e compósitos PP/Fluff	60
4.3.3	Análise por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) do PP e compósitos PP/Fluff	61
4.3.4	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).....	61

4.3.5 Comportamento mecânico.....	62
4.4 Cálculo de gases de efeito estufa (GEE) evitados com a aplicação.....	64
4.5 Análise SWOT.....	66
4.5.1 Forças	67
4.5.2 Fraquezas	70
4.5.3 Oportunidades.....	71
4.5.4 Ameaças	74
5 CONCLUSÕES	75
6 TRABALHOS FUTUROS	76
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

Lista de Figuras

Figura 1 – Resultados mínimos e máximos encontrados em literatura, para tração e flexão, de compósitos contendo resíduos (PP-PCR, WPC e sacolas plásticas).	17
Figura 2 – Temperaturas iniciais e finais de degradação térmica, na fase de degradação correspondente à matriz polimérica, para compósitos plásticos com adição de resíduos. ...	18
Figura 3 – Madeira plástica em pisos para áreas externas. Fabricante Ecopex.	21
Figura 4 – Fotos: (a) Banco de madeira plástica. (b) Pergolado de madeira plástica. (c) Mesa de madeira plástica. (d) Suporte de plásticas de madeira plástica. (e) Lixeiras de madeira plástica.	22
Figura 5 – Localização das Indústrias Siderúrgicas no Brasil.....	23
Figura 6 – Esquema de produção de aço. (a) Processo de redução, conhecido como Alto Forno. (b) Processo de Aciaria. (c) Processo de Laminação. (d) Processo de Trefilação.	24
Figura 7 – Esquema de geração dos resíduos no equipamento Shredder.	27
Figura 8 – Destinação de resíduos Classe II, para aterros sanitários em 2022, pelos Grupos Gerdau, ArcelorMittal e CSN.....	30
Figura 9 – Ordem de priorização no gerenciamento de resíduos.	32
Figura 10 – Consumo de plástico no Brasil, por setores em 2020.....	34
Figura 11 – Esquema da rota usual na reciclagem do plástico.	35
Figura 12 – Categorias que contribuem para emissões de gases de efeito estufa no Brasil.	37
Figura 13 – Representação esquemática da metodologia utilizada no estudo.	40
Figura 14 – Coleta diária em três pontos da pilha, formando uma única amostra.	41
Figura 15 – Homogeneização e quarteamento das 7 amostras diárias, formando uma única amostra.....	41
Figura 16 – Esquema de extrusão: (a) preparação dos materiais, (b) homogeneização. (c) extrusão e (d) filetes obtidos.	44
Figura 17 – Resultados da gravimetria do resíduo, em percentual.....	51
Figura 18 – Materiais por grupos e sua constituição, separados durante a gravimetria.	52
Figura 19 – Curva TGA/DTG do resíduo Fluff.	53
Figura 20 – Espectro de FTIR do resíduo Fluff.	54
Figura 21 – Resíduo antes da moagem e após moagem.....	56
Figura 22 – Monofilamentos obtidos por extrusão dos materiais R00 (polipropileno puro), R05 (PP + 5% Fluff) e R10 (PP + 10% Fluff) (% , massa).....	57
Figura 23 – Grânulos obtidos após extrusão e granulação dos materiais R00 (PP), R05 (PP+5% Fluff) e R10 (PP+10% Fluff) (% , massa).	58
Figura 24 – Materiais R00 (PP), R05 (PP+5% Fluff) e R10 (PP+10% Fluff) (% , massa).	58

Figura 25 – Análise termogravimétrica (TGA) para os materiais R00 (PP), R05 (PP+5% Fluff) e R10 (PP+10% Fluff) (% , massa).....	60
Figura 26 – Espectros FTIR dos materiais Resíduo Fluff, R00 (PP), R05 (PP+5% Fluff) e R10 (PP+10% Fluff) (% , massa).....	62
Figura 27 – Corpos de prova dos compósitos moldados e prensados em formato gravata borboleta.....	63
Figura 28 – área equivalente, em número de campos de futebol, para plantio de árvores para absorção da quantidade de CO ₂ emitido pelo resíduo disposto em aterro no período de um ano (Cenário 1).....	65
Figura 29 – Área equivalente, em número de campos de futebol, para plantio de árvores para absorção da quantidade de CO ₂ emitido pelo resíduo disposto em aterro no período de um ano (Cenário 2).....	66
Figura 30 – Matriz SWOT com forças, oportunidades, fraquezas e ameaças para o produto.	67
Figura 31 – Os ODS que se alinham com o aproveitamento do resíduo na produção da madeira plástica.....	68
Figura 32 – Fabricantes e comerciantes de madeira plástica no Brasil, por região, obtidos através do buscador Google Maps.	73

Lista de Tabelas

Tabela 1: Composições utilizadas PP/Fluff.....	43
Tabela 2 – Resultados do TGA para o resíduo Fluff.	53
Tabela 3 – Resultados da FTIR para o resíduo Fluff.....	55
Tabela 4 – Resultados do Índice de Fluidez (MFI) para o PP puro e para os compósitos.	59
Tabela 5 – Resultados do TGA para o PP e compósitos PP/Fluff.	60
Tabela 6 – Resultados da Análise por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) para os compósitos	61
Tabela 7 – Resultados do ensaio de tração para os compósitos.	63
Tabela 8 – Cálculo de toneladas de CO ₂ equivalente emitidas pela disposição dos resíduos Fluff em aterros, no período de 1 ano, para dois cenários propostos.	64
Tabela 9 – Materiais de madeira plástica comercializados e seus valores.....	69

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas estão se tornando cada vez mais evidentes em eventos globais, e as discussões em torno desse tema estão se intensificando. O recente relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) enfatiza claramente que ainda é viável manter o aumento da temperatura global em 1,5°C, mas somente se as ações forem imediatas. Para frear esse aumento, é necessário que o mundo atinja o pico das emissões de gases de efeito estufa até 2025, reduza essas emissões quase pela metade até 2030 e alcance a neutralidade de carbono até meados do século. Assim, a descarbonização se tornou uma palavra-chave em diversos setores, especialmente na indústria, considerada uma das principais fontes de emissões (IPCC, 2023). A busca por alternativas para reduzir ou eliminar as emissões de gases de efeito estufa na cadeia de produção engloba estratégias como reduzir a demanda de materiais por meio de soluções de economia circular, implementar tecnologias de captura e armazenamento de carbono em setores desafiadores e fazer a transição para processos industriais de baixa emissão.

No Brasil, o segmento de “Gestão de Resíduos” é apontado como um dos principais emissores de gases do efeito estufa no Brasil, ocupando o quarto lugar nesse ranking, até mesmo ultrapassando os “Processos Industriais”. Entre as fontes de emissão mais relevantes desse setor, destaca-se a disposição final dos resíduos em aterros sanitários e outras formas de descarte, contribuindo com 34% das emissões totais do segmento de resíduos (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2022).

Os resíduos são gerados nas mais variadas atividades humanas, sendo o setor industrial um dos principais responsáveis pela geração no Brasil (GOMES, 2021). Dados obtidos pelo Ibama, mostram que em 2021 as atividades industriais de diversos segmentos somaram aproximadamente 781 milhões de toneladas de resíduos. Os resíduos industriais que não possuem aplicação para outros processos, são destinados para aterro sanitário. Em muitos casos, existem estudos que viabilizam o aproveitamento dos resíduos como matéria-prima básica ou combustível, em outros processos industriais (IBAMA, 2022).

A siderurgia, segmento dedicado à fabricação de aço, é considerada uma grande geradora de resíduos sólidos, globalmente (SYARIAH; ILMU, 2023). A geração de resíduos oriundos diretamente do processo produtivo, chega a 622 kg de resíduos

gerados por tonelada de aço bruta produzidas, representando considerável geração, uma vez que a produção de aço no Brasil foi de 31.415 milhões de toneladas, somente no ano de 2020, considerando dados disponibilizados pelo Instituto Aço Brasil (2023). Um dos resíduos siderúrgicos comumente destinado para aterros sanitários, conhecido como “Fluff” é gerado na etapa de processamento da sucata ferrosa, utilizada como matéria prima (SIQUEIRA, 2020). O Fluff é composto por grande variedade de polímeros, como plásticos, tecidos, borrachas, espumas e pequena quantidade de metais não ferrosos

Tendo em vista a necessidade de buscar alternativas viáveis para o reaproveitamento do resíduo siderúrgico, que minimizem os impactos ambientais, custos do descarte e a redução de emissão de gases de efeito estufa com sua disposição em aterros, para a descarbonização das indústrias e motivado por sua composição de grande quantidade de materiais poliméricos, este trabalho visa avaliar a produção de compósitos de madeira plástica utilizando o Fluff.

Os compósitos de madeira plástica são produzidos a partir da combinação de uma matriz polimérica associadas a partículas de madeiras. A matriz polimérica pode ser composta por polímeros virgens ou pós-consumo (CHINDAPRASIRT et al., 2015). Esses compósitos são amplamente utilizados em diferentes áreas, tais como a construção civil, indústria moveleira, setor de transportes, tecnologias e outras aplicações (MÜZEL, 2017).

A utilização de plásticos pós-consumo para produção de novos materiais, processo conhecido como reciclagem, é uma medida comum para reduzir o impacto ambiental dos resíduos poliméricos. A criação de novos materiais a partir desses resíduos pode substituir os convencionais, como a madeira e o aço. A reciclagem dos resíduos plásticos pode ser mecânica, química ou energética, sendo que a mecânica, além de reduzir os impactos com a destinação final inadequada e a disposição final em aterros, também promove a redução do consumo de matérias-primas de origem fóssil ou natural, que seriam utilizadas para produção do polímero virgem (GOMES, 2021; MORSELLI et al., 2010; MÜZEL, 2017).

Espera-se por meio deste trabalho, contribuir para a redução do volume de resíduos Fluff direcionados a aterros sanitários, ao promover sua reutilização em compósitos destinados à fabricação de madeira plástica. Essa iniciativa está alinhada com as metas globais de descarbonização, demonstrando compromisso com a sustentabilidade e a gestão responsável de resíduos e recursos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste estudo consiste em incorporar o resíduo siderúrgico Fluff em uma matriz polimérica visando a produção de madeira plástica.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste estudo são apresentados a seguir:

- a) Definição da composição do resíduo Fluff;
- b) Desenvolvimento de metodologia de beneficiamento do resíduo Fluff para o seu processamento em extrusora;
- c) Definição dos parâmetros de processo para a produção dos compósitos à base de PP/Fluff;
- d) Estabelecer metodologia de avaliação da redução da emissão de gases de efeito estufa através do desenvolvimento do compósito PP/Resíduo Fluff;
- e) Avaliar o potencial de uso do resíduo na produção de madeira plástica, levantando em consideração as forças, oportunidades, fraquezas e ameaças (aplicação da matriz SWOT).

1.2 Justificativa

A indústria siderúrgica, sendo uma grande geradora de resíduos, tem avançado significativamente no gerenciamento desses resíduos, transformando-os em coprodutos e buscando a descarbonização. De acordo com o Instituto Aço Brasil (2023), cerca de 97% dos resíduos gerados por essa indústria são aproveitados como matérias-primas e fontes de energia. No entanto, é importante destacar que mesmo com esse alto aproveitamento, aproximadamente 3% dos resíduos gerados não encontram aplicação, sendo destinados a aterros sanitários. Ao considerar o volume de produção de aço em 2021, que atingiu 1,95 bilhão de toneladas, a geração de resíduos não aproveitados e destinados a aterros chegaria a 657 mil toneladas ao ano. Este número expressivo indica que esforços adicionais são necessários para aumentar o percentual de reaproveitamento e reciclagem.

Entre os resíduos Siderúrgicos destinados para aterros, o Fluff, gerado na etapa de processamento da sucata ferrosa, é um resíduo composto por grande

quantidade de polímeros e materiais voláteis, extremamente heterogêneo, o que dificulta sua triagem e reciclagem. Seu aproveitamento como combustível muitas vezes é inviabilizado pela presença de cloro, que quando queimado, pode resultar na emissão de dioxinas e furanos, substâncias prejudiciais à saúde e ao meio ambiente. Diante dessas questões, têm-se buscado constantemente novas alternativas para o aproveitamento e destinação sustentável desses resíduos (CAETANO, 2017; BATISTA, 2014; LIMA, 2019; FIGUEIREDO, 2016; RIBEIRO; FAYER, 2021; RECKZIEGEL, 2012).

Uma abordagem promissora para aproveitar o Fluff sem a necessidade de triagem e separação dos materiais é considerar sua incorporação em matrizes poliméricas para a produção de madeira plástica. Essa estratégia é especialmente relevante porque a indústria da construção, grande consumidora de plásticos, pode desempenhar um papel crucial na adoção de materiais mais sustentáveis.

Essa aplicação é inovadora, uma vez que não foram encontrados outros estudos ou notícias sobre empresas que tenham explorado a incorporação do Fluff em compósitos plásticos. Além disso, essa iniciativa pode estar alinhada com os esforços das indústrias em direção à descarbonização, contribuindo para evitar a emissão de gases de efeito estufa associados à disposição final do resíduo em aterros.

Ao explorar essa alternativa, busca-se agregar valor ao Fluff e promover a economia circular ao reintegrar esses resíduos na cadeia produtiva, reduzindo a dependência de recursos virgens e minimizando os impactos ambientais. Esse tipo de abordagem inovadora e sustentável é essencial para enfrentar os desafios atuais relacionados à gestão de resíduos e à mitigação das mudanças climáticas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compósitos poliméricos, processamento e propriedades

Os compósitos podem ser produzidos a partir de diferentes matrizes plásticas, cada plástico apresenta características distintas que contribuem para sua aplicação específica. Além das diferentes características das matrizes utilizadas, a diversidade das cargas utilizadas e os métodos específicos de processamento adotados durante a fabricação também influenciam no produto final. As cargas (naturais ou sintéticas), com suas propriedades físicas, químicas e mecânicas variáveis, desempenham um

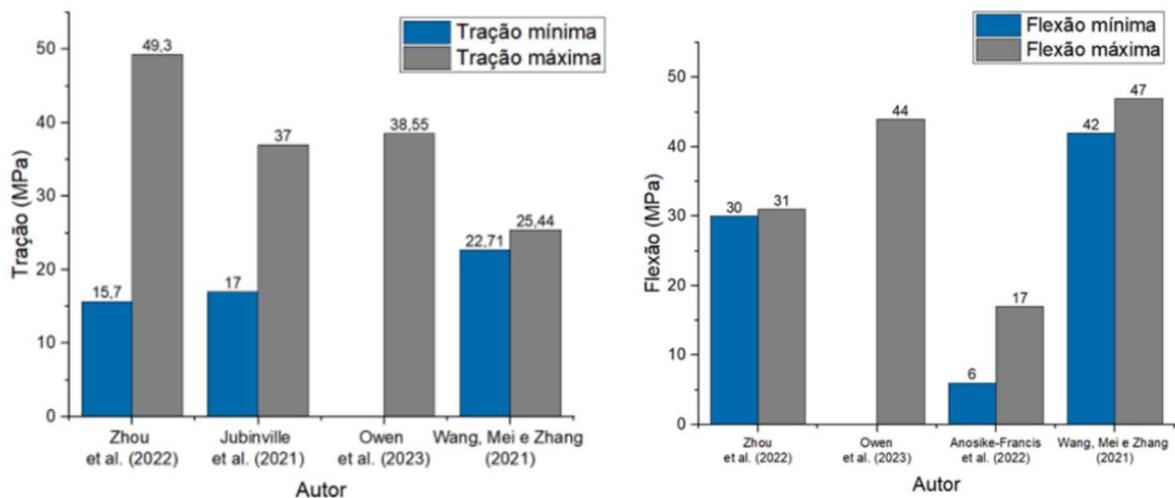
papel significativo na determinação das propriedades finais do compósito. A compatibilidade entre essas cargas e as matrizes poliméricas é crucial para garantir a integridade estrutural e o desempenho do material resultante. Além disso, os métodos de conformação, como moldagem por compressão, injeção ou extrusão, podem influenciar a dispersão/distribuição das cargas de resíduos na matriz e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas do compósito. (ELSHEIKH et al., 2022; GARDNER; HAN; WANG, 2015).

Os métodos de processamento desempenham um papel crucial na produção de materiais poliméricos, permitindo moldar e dar forma aos produtos. Na literatura, entre os métodos de processamento citados para a produção de compósitos, observam-se a extrusão, injeção, moldagem a quente e compressão. Matinez Lopes et al. (2020); Singh et al. (2022); Tang et al. (2022) Zhou et al. (2022) empregaram o método de extrusão, que envolve a fusão dos componentes em uma extrusora e a passagem do material por uma matriz para obter a forma desejada. Jubinville et al. (2021); Wang; Mei; Zhang (2021) utilizaram os métodos de injeção, que envolvem a injeção do material fundido em um molde e a posterior cura para conferir as propriedades desejadas. Xiao et al. (2023) optaram pela moldagem a compressão, que envolve o aquecimento do material compósito e sua conformação em um molde. Anosike-Francis et al. (2022); Owen et al. (2023) utilizaram o método de compressão, que envolve a aplicação de pressão para compactar o material compósito em um molde. Os métodos de processamento oferecem diferentes abordagens para a produção de compósitos poliméricos, permitindo controlar a forma, as propriedades e o desempenho dos materiais resultantes. A variedade desses métodos também destaca a versatilidade de aplicação dos materiais em diferentes setores industriais.

De acordo com a literatura, é possível observar uma variação no comportamento mecânico de compósitos plásticos que utilizam resíduos como cargas. Isso ocorre devido às diferentes matrizes e métodos de processamento utilizados. Para os testes de tração, os valores mínimos encontrados na literatura, por autores que analisaram diversos tipos de compósitos contendo resíduo, para compósitos confeccionados a partir de WPC em fim de vida, os valores encontrados variam de 15,70 a 32,00 MPa (ZHOU et al., 2022). Para compósitos obtidos a partir de embalagens de plástico pós-consumo a resistência variou de 38,55 a 44,39 MPa (OWEN et al., 2023). Já nos testes de flexão, os valores encontrados variam de 6,17 a 47,84 MPa, para um compósito de PP reciclado (Anosike-Francis et al., 2022) e 34,83 a 47,84 MPa para compósitos de

PP pós-consumo (WANG; MEI; ZHANG, 2021). Essas variações indicam que a matriz utilizada e a carga e a interação entre elas, interferem diretamente na resistência mecânica de compósitos plásticos. Os valores estão representados na Figura 1.

Figura 1 – Resultados mínimos e máximos encontrados em literatura, para tração e flexão, de compósitos contendo resíduos (PP-PCR, WPC e sacolas plásticas).



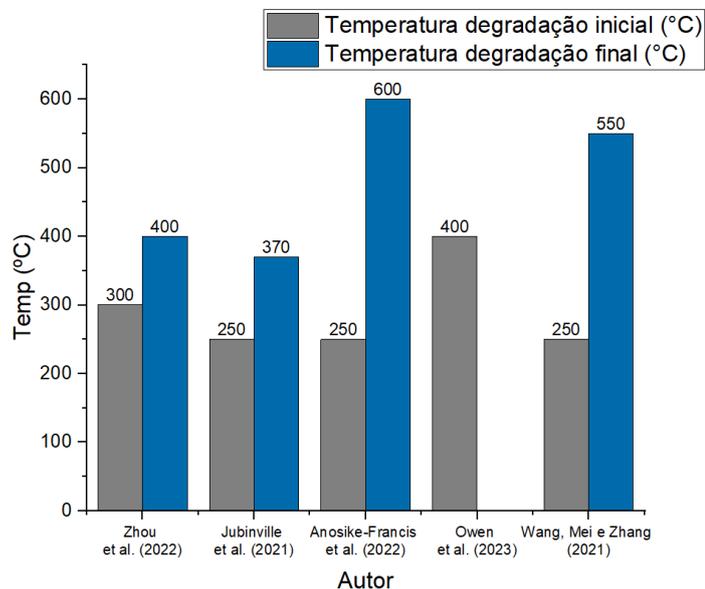
Adaptado. (JUBINVILLE et al., 2021; ANOSIKE-FRANCIS et al., 2022; OWEN et al., 2023; WANG; MEI; ZHANG, 2021; ZHOU et al., 2022)

Wang; Mei; Zhang (2021) e Zhou et al. (2022), que produziram compósitos plásticos utilizando PP-PCR e WPC em fim de vida, destacam a importância da adição de um agente compatibilizante interfacial para melhorar as propriedades mecânicas, em particular a resistência à tração e à flexão de materiais compósitos à base de madeira e plástico (WPCs). De acordo com Zhou et al. (2022), sem o uso de compatibilizantes, a resistência à tração dos compósitos produzidos a partir varia de 15,7 MPa a 27,0 MPa. No entanto, ao adicionar 5%, em massa, de um agente compatibilizante interfacial, a resistência à tração aumentou para uma faixa de 19,0 a 32,0 MPa. Além disso, o uso do compatibilizante anidrido maleico (PE-g-AM – MAPE) resultou em um aumento na resistência à flexão de faixa de 17,0 MPa a 27,0 MPa (compósitos não compatibilizados) para 27,0 MPa a 32,0 MPa, com adição de compatibilizantes Wang; Mei; Zhang (2021). No estudo de Singh et al. (2022), compósitos de HDPE reciclado

e com adição de plásticos misturados pós-consumo, com carga tratada quimicamente apresentaram uma resistência à tração significativamente maior em comparação aos compósitos com carga não tratada. Partículas de tamanho fino também resultaram em uma resistência à tração superior às partículas de maior tamanho. No entanto, as partículas de maior diâmetro afetaram negativamente a resistência à flexão dos compósitos, provavelmente devido a tendência dessas partículas se aglomerarem.

Estudos de incorporação de resíduos em compósitos, conduzidos pelos autores (Wang; Mei; Zhang (2021);Owen et al. (2023); Xiao et al. (2023); Zhou et al., 2023) e Elmushyakhi (2021), sendo eles PP-PCR, embalagens plásticas pós-consumo, resíduos plásticos misturados, WPC pós-consumo e resíduos de madeira, respectivamente, demonstram que os compósitos obtidos apresentaram degradação acima de 250 °C, na faixa de degradação correspondente à matriz polimérica, finalizando em 600 °C, indicando boa resistência ao calor. As temperaturas indicadas pelos autores mencionados, estão representadas na Figura 2.

Figura 2 – Temperaturas iniciais e finais de degradação térmica, na fase de degradação correspondente à matriz polimérica, para compósitos plásticos com adição de resíduos.



Adaptado. (JUBINVILLE et al., 2021; ANOSIKE-FRANCIS et al., 2022; OWEN et al., 2023; WANG; MEI; ZHANG, 2021; ZHOU et al., 2022).

2.2 Sustentabilidade de compósitos poliméricos à base de resíduos pós-consumo

A literatura destaca diversos impactos ambientais positivos associados à utilização de resíduos plásticos na produção de madeira plástica. Em um estudo recente, Zhou et al. (2022) ressaltam que a incorporação de resíduos em formulações de madeira plástica oferece uma abordagem fácil e economicamente viável para reciclar produtos no final de sua vida útil, principalmente plásticos e fibras. Esse método resulta na produção de compósitos de alto desempenho, impulsiona a eficiência da produção, minimiza o desperdício e está alinhado com os princípios da economia circular.

Outros estudos, como o de Tang et al. (2022) enfatizam que a utilização de resíduos de fibra de madeira reciclada e polipropileno reciclado como matérias-primas reduz substancialmente o consumo de materiais fósseis no processo de fabricação da madeira plástica, contribuindo, assim, para a redução do impacto ambiental. Jubinville et al. (2021) e Singh et al. (2022) consideram a madeira plástica um material sustentável, destacando sua capacidade de diminuir a dependência de recursos naturais e promover práticas de produção conscientes.

Em relação às práticas específicas, Xiao et al. (2023) ressaltam que a produção de compósitos recupera resíduos plásticos, mas também substitui efetivamente painéis à base de madeira, reduzindo assim o consumo de energia não renovável. Owen et al. (2023) destacam a importância desse processo na redução do descarte de resíduos. Além disso, Martinez Lopez et al. (2020) salientam que o uso de resíduos industriais na fabricação de compósitos resulta em um processo produtivo mais sustentável, reduzindo emissões e os custos associados à produção. Por fim, Anosike-Francis et al. (2022) apontam que a incorporação de resíduos na fabricação de painéis não apenas contribui para solucionar a escassez de matéria-prima, mas também alivia a pressão sobre os recursos florestais, além de criar oportunidades de emprego.

Os compósitos de madeira plástica, amplamente utilizados no ramo da construção civil, representam uma inovação tecnológica que integra uma matriz polimérica, fase moldável, com adição, geralmente, de resíduos de madeira, como a serragem. A matriz polimérica pode ser composta por polímeros virgens ou reciclados (CHINDAPRASIRT et al., 2015). Esses compósitos encontram aplicações

diversificadas, abrangendo setores como construção civil, indústria moveleira, transporte, tecnologia, entre outros (MÜZEL, 2017).

O método de fabricação dos compósitos de madeira plástica envolve a combinação de matrizes poliméricas, como polipropileno (PP), polietileno (PE) e policloreto de vinila (PVC), com carga lignocelulósica, composta por lascas ou partículas de madeira, em proporções variáveis de 30% a 70% (CARNIETTO, 2020). A moldagem por extrusão dessa mistura resulta em um material esteticamente semelhante aos originais, porém com propriedades aprimoradas, incluindo maior rigidez, flexibilidade e resistência às intempéries. Essas características conduzem a uma redução na necessidade de manutenção e aumentam a durabilidade, graças às propriedades dos plásticos empregados (CATTO et al., 2016). Adicionalmente, a incorporação de resíduos pós-consumo de madeira e plástico torna o processo de fabricação ainda mais sustentável (GARDNER; HAN; WANG, 2015).

2.3 Madeira plástica para aplicação no setor da construção civil

Um dos usos para a madeira plástica é na produção de um material substituto à madeira convencional, para uso na construção civil. A madeira desempenha uma variedade de funções na construção civil, desde elementos temporários como escoramentos, formas e andaimes, até estruturas permanentes como vigas, caibros, pilares e mobiliário para áreas internas e externas. Ela também é empregada em forros e pisos, além de diversos métodos construtivos. No entanto, há desafios a serem considerados no seu uso na construção, como a não padronização das peças adquiridas, fendas, abaulamento, arqueamento e empenamento podem comprometer sua qualidade e resistência. O apodrecimento e a contaminação por microrganismos são preocupações adicionais que devem ser gerenciadas ao longo do tempo (CORDEIRO; SILVA; SOARES, 2017).

A madeira plástica surge para compensar o desmatamento e a fragilidades no uso da madeira natural. As madeiras plásticas podem ser definidas como “produtos manufaturados com teor de plástico superior a 50%, em massa, e que possuem genericamente seção transversal retangular e apresentam dimensões típicas dos produtos de madeira industrializada (MARTINS et al., 2022). Há registros de que surgiram na Europa na década de 70 e hoje são amplamente adotadas nos Estados Unidos, sendo um dos principais materiais sintéticos utilizados em projetos

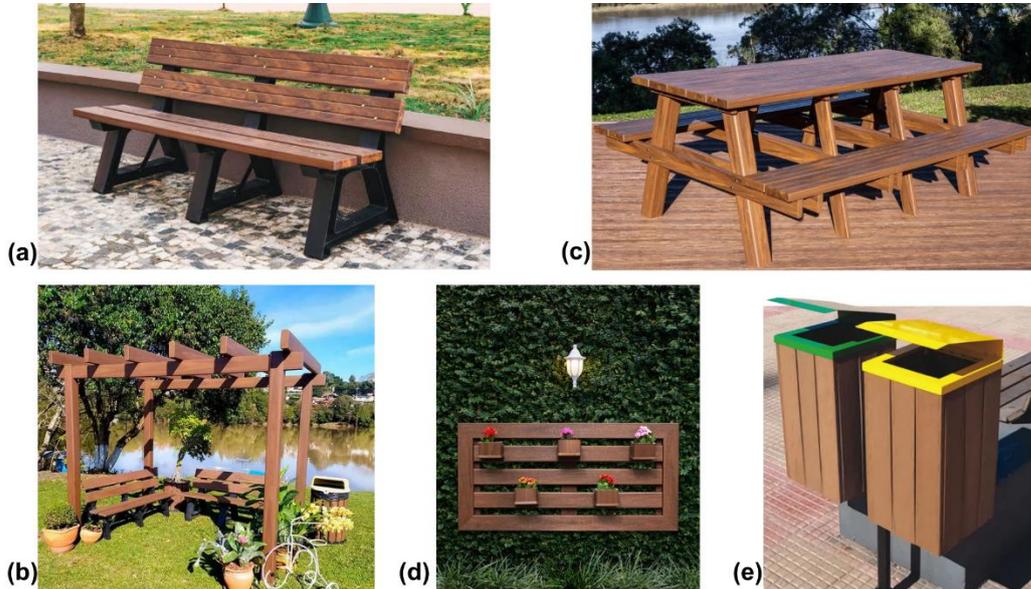
governamentais e em ambientes residenciais. Com cerca de duas décadas de presença no mercado americano, a madeira plástica ganhou destaque devido à sua resistência ao mofo, deterioração e intempéries. Nos Estados Unidos, segundo relatos jornalísticos, grande parte das varandas e pátios são construídos com esse material que, apesar de ter um custo maior que a madeira natural, compensa pela economia em manutenção, uma vez que dispensa cuidados específicos (TRIGUEIRO; BOCARDI, 2012). Já no Brasil, esses materiais são adotados como substitutos da madeira serrada e, para substituir peças de ferro fundido em diversas aplicações urbanas e sanitárias. Nesse sentido, na composição da madeira plástica, inclui-se reforço de fibras de vidro, convertendo-a em um compósito polimérico. No setor da construção civil, esses materiais encontram aplicação na confecção de decks, pallets, batentes, portões, cercas, dormentes, cruzetas, mourões, fachadas, bancos, lixeiras, pergolados, placas, playgrounds (Figuras 3 e 4), e em muitos outros contextos construtivos (TRIGUEIRO; BOCARDI, 2012; MÜZEL, 2017).

Figura 3 – Fotos: (a) e (b) Piso de madeira plástica. (c) Bancos de madeira plástica. (d) Bancos de madeira plástica.



Fabricante Ecopex.

Figura 4 – Fotos: (a) Banco de madeira plástica. (b) Pergolado de madeira plástica. (c) Mesa de madeira plástica. (d) Suporte de plásticas de madeira plástica. (e) Lixeiras de madeira plástica.

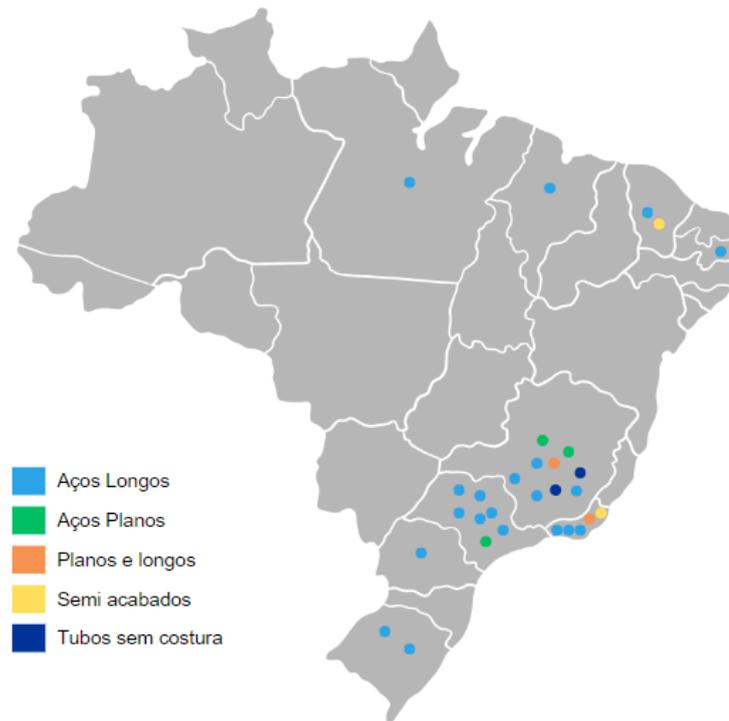


Fabricante Ecopex.

2.4 A Indústria Siderúrgica

A indústria siderúrgica desempenha um papel significativo na sustentação do mercado de trabalho e no impulso do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil. Além disso, destaca-se como uma importante fornecedora de insumos para diversos setores da indústria de transformação e para a construção civil (Carvalho et al., 2015). O parque industrial siderúrgico do país é composto por 31 usinas, sendo 15 integradas e 16 semi-integradas, com uma capacidade total instalada de 51 milhões de toneladas por ano de aço bruto. Essas instalações estão distribuídas em 10 estados brasileiros, com uma concentração predominante na região Sudeste, conforme ilustrado na Figura 5 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

Figura 5 – Localização das Indústrias Siderúrgicas no Brasil.



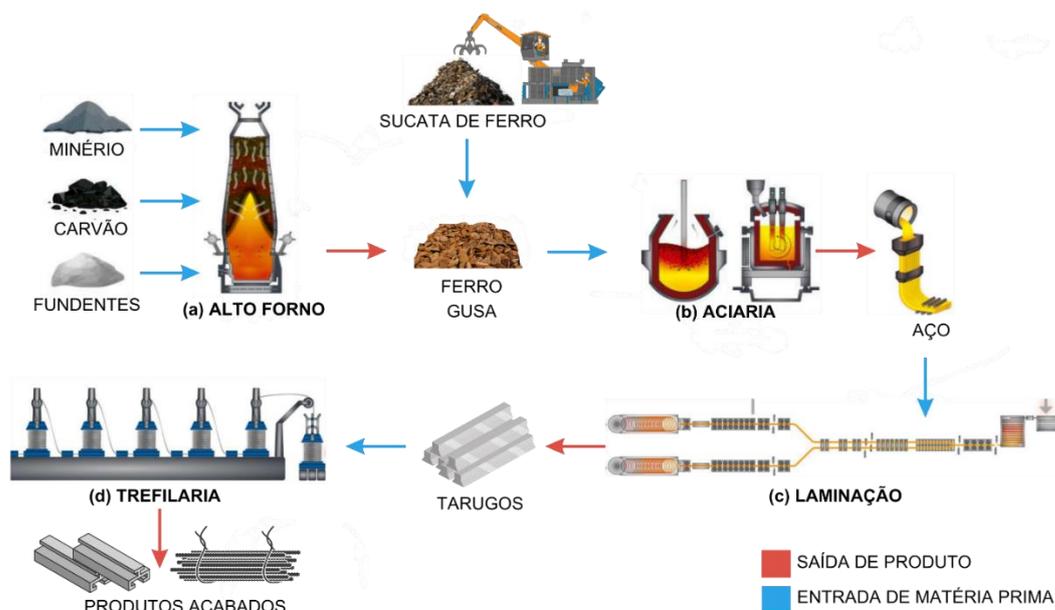
Adaptado. (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021)

No contexto brasileiro, a produção de aço segue duas rotas tecnológicas distintas: a rota integrada e a semi-integrada. A rota integrada engloba três fases essenciais de produção: redução, refino e laminação. Em contrapartida, a rota semi-integrada exclui a etapa de redução. As usinas integradas produzem aço a partir do minério de ferro, convertendo-o em ferro-gusa por meio de um agente redutor, utilizando coque (derivado de carvão mineral) ou carvão vegetal nos altos-fornos. No cenário brasileiro, a rota integrada representa mais de 80% da produção total de aço. Por outro lado, as usinas semi-integradas dispensam a etapa de redução, produzindo aço por meio da fusão de carga metálica composta por sucata, gusa e/ou ferro-esponja nas aciarias elétricas. Uma vez produzido, o ciclo de vida do aço é infinito, mantendo sua qualidade sem perdas. A utilização de sucata não apenas reduz o consumo de recursos naturais não renováveis, mas também diminui as emissões de gases de efeito estufa, associadas à etapa de redução (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

A produção de aço passa por diferentes processos, como o Alto Forno, Aciaria, Laminação e em algumas usinas, Trefilaria, conforme Figura 6 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021):

- (a) Alto Forno: Durante esta fase, ocorre a redução do óxido de ferro (minério) para ferro metálico, dentro do alto-forno, empregando um revestimento especial (refratários) que suporta as temperaturas extremas (superiores a 1.200° C) do processo de aquecimento. Os materiais introduzidos no alto-forno se convertem em ferro-gusa, escória e gás resultante do processo de alta temperatura.
- (b) Aciaria: O ferro-gusa passa por ajustes de teor de carbono e remoção de impurezas antes de ser direcionado aos fornos a oxigênio nas aciarias, onde é transformado em aço. Em usinas semi-integradas, a carga metálica (incluindo sucata, ferro-gusa e/ou ferro esponja) é alimentada diretamente nos fornos elétricos a arco para fusão.
- (c) Laminação: Nesta etapa, o aço proveniente das aciarias é despejado para ser lingotado em máquinas de lingotamento contínuo, formando produtos semiacabados, como placas, blocos ou tarugos.
- (d) Trefilaria: Aqui, os semiacabados são submetidos a processos mecânicos para serem transformados em uma variedade de produtos siderúrgicos, incluindo chapas, barras, bobinas, vergalhões, fios-máquina e tubos sem costura, entre outros.

Figura 6 – Esquema de produção de aço. (a) Processo de redução, conhecido como Alto Forno. (b) Processo de Aciaria. (c) Processo de Laminação. (d) Processo de Trefilação.



Adaptado de (ARCELORMITTAL, 2022)

A rota semi-integrada, segue uma rota de produção sustentável que valoriza a utilização da sucata como componente essencial da matéria-prima, proporcionando uma série de vantagens tanto para o meio ambiente quanto para a economia. A incorporação de sucata ferrosa na produção de aço reduz substancialmente a demanda por minério de ferro virgem, resultando em economia de recursos naturais valiosos e na mitigação das emissões de gases de efeito estufa associadas à extração e ao processamento do minério. Além disso, a reciclagem de sucata de aço contribui significativamente para a redução da quantidade de resíduos encaminhados para aterros sanitários, desempenhando um papel crucial na preservação do meio ambiente. É por essas razões que o aço é amplamente reconhecido como o material mais reciclado do planeta. No ano de 2021, aproximadamente 680 milhões de toneladas de aço foram recicladas, o que evitou a emissão de mais de um bilhão de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) que teriam sido liberadas caso o aço virgem fosse utilizado em sua fabricação. Esse esforço de reciclagem abrange tanto a sucata pré-consumo, oriunda dos processos de fabricação, quanto a sucata pós-consumo, proveniente de produtos siderúrgicos que chegaram ao fim de sua vida útil. (Worldsteel Association, 2023).

É relevante destacar que, apesar de todos os esforços direcionados à reciclagem, a demanda por novos produtos siderúrgicos ainda supera a disponibilidade de sucata. Produtos siderúrgicos com vida útil curta a média, como embalagens, materiais industriais e veículos, frequentemente passam por processos de reciclagem. No entanto, é importante reconhecer que a sucata ferrosa de produtos obsoletos, muitas vezes, está misturada com outros materiais, exigindo um processo de separação antes de poder ser reintegrada nos fornos de produção de aço. Embora esse processo de separação possa gerar resíduos, a reciclagem de sucata de aço ainda se mantém como uma opção ambientalmente vantajosa e essencial para a sustentabilidade da indústria siderúrgica (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2023).

2.4.1 Reciclagem da sucata

Nas siderúrgicas semi-integradas, as sucatas desempenham um papel crucial como matéria-prima para a produção de aço. Dentre os tipos de sucata utilizados, destaca-se a sucata de retorno interno, originada dentro da própria usina, abrangendo perdas nos processos siderúrgicos, recuperação de escória, sobras da laminação,

entre outros. Esse tipo de sucata tem experimentado uma redução devido à otimização dos processos, resultando em menor perda metálica. Além disso, a sucata industrial, proveniente da transformação do aço em produtos acabados, e a sucata de obsolescência, proveniente de materiais considerados obsoletos, são também essenciais na composição do insumo siderúrgico (JOHN, 2009; PEDRO CUNHA ALVES, 2016).

Para preparar essas sucatas para uso, é necessária uma etapa de processamento que adequa as dimensões, densidade e reduz a quantidade de impurezas. Diversos métodos são empregados para tal finalidade, destacando:

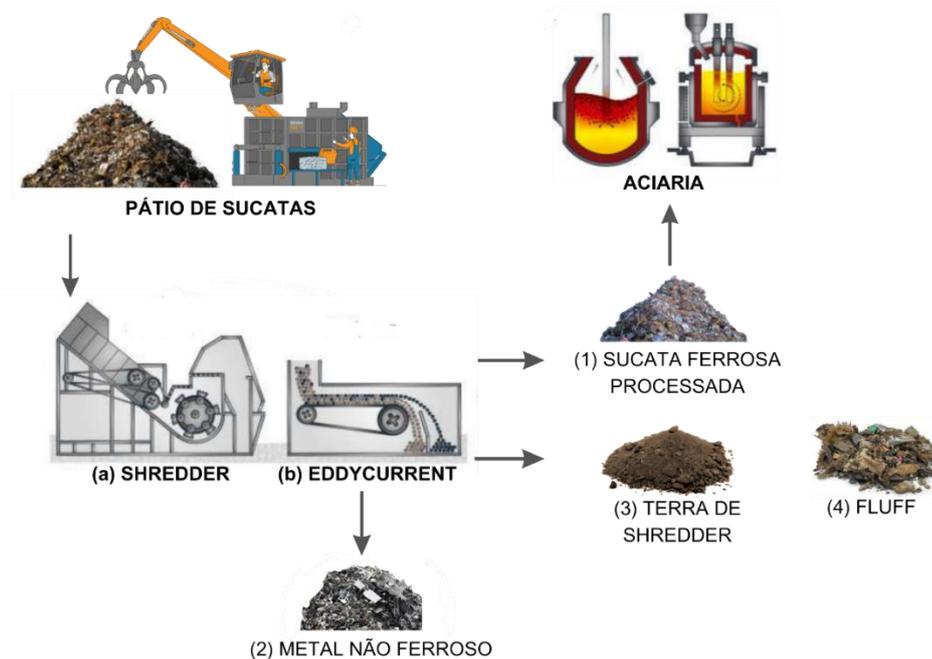
- Prensa, utilizada para formar pacotes de sucata, a prensa tesoura, que prensa a sucata e, em seguida, utiliza uma tesoura guilhotina para cortá-la, podendo empregar uma calha vibratória para a remoção de impurezas.
- Oxicorte é empregado para cortar sucatas de grandes dimensões, enquanto a tesoura móvel, acoplada ao braço de escavadeiras industriais, conta com duas mandíbulas e lâminas de corte.
- Triturador (Shredder), composto por moinho e grelhas, tritura a sucata e realiza uma separação magnética, removendo impurezas de maneira eficaz. Esses equipamentos desempenham um papel fundamental na eficiência do processo, contribuindo para a qualidade do aço produzido e para a redução de perdas (JOHN, 2009; ALVES, 2016).

2.4.2 Processamento de sucata no equipamento Shredder

Um dos equipamentos mais potentes para processamento de sucatas, é o triturador de sucatas Shredder, composto por um moinho equipado com um conjunto de martelos (Figura 7 – (a)), permitindo a trituração eficiente da sucata em pequenos pedaços de alta densidade. Além disso, o Shredder está equipado com sistemas de separação que removem material não ferroso da sucata já triturada, resultando em um produto final não apenas de alta densidade, mas também com uma baixa concentração de não ferrosos. A sucata é alimentada no equipamento por meio de uma esteira, com um rolo alimentador regulando a quantidade de material para garantir uma alimentação adequada ao rotor, evitando excessos e entupimentos. Ao atingir o moinho, a sucata é triturada por martelos de manganês acoplados a um rotor. Na sequência, a sucata triturada passa por uma etapa de separação magnética,

conduzida por tambores magnéticos, que distinguem a parte ferrosa da não ferrosa. A sucata ferrosa resultante é direcionada para o processo de despoeiramento e armazenada para utilização nos fornos. Por outro lado, a sucata não ferrosa pode passar por uma etapa de catação manual e ser comercializada, ou, em determinadas siderúrgicas, avançar para a próxima fase no equipamento conhecido como Eddy Current (CAETANO, 2017; BATISTA, 2014; FIGUEIREDO, 2016; LANDMARK, 1994; ALVES, 2016).

Figura 7 – Esquema de geração dos resíduos no equipamento Shredder.



Adaptado de ArcelorMittal (2022).

No Eddy Current (Figura 7 – (b)), a sucata é submetida a uma separação magnética adicional, seguindo para uma calha vibratória onde uma correia transportadora encaminha o material até um indutor magnético. Neste indutor, os resíduos contidos, como plásticos, borrachas e espumas, são direcionados para uma saída específica, enquanto os metais não ferrosos são expulsos por repulsão, contribuindo para um processo eficaz de separação de materiais. A presença de impurezas na sucata pode prejudicar o rendimento metálico e complicar as operações do forno, impactando negativamente na qualidade do aço produzido. Assim, a efetiva remoção de impurezas reduz a probabilidade de sua fusão no forno, contribuindo para a diminuição do consumo de energia e a minimização da geração de material

particulado (BATISTA, 2014; FIGUEIREDO, 2016; LANDMARK, 1994; RECKZIEGEL, 2012).

A sucata ferrosa processada no Shredder, é direcionada para a Aciaria, para ser utilizada como matéria prima na produção do aço (Figura 7 – (1)). As impurezas contidas da sucata, são segregadas em “impurezas” e “metais não ferrosos”. Os metais não ferrosos consistem em cobre, latão, alumínio e outros, e são facilmente comercializados (Figura 7 – (2)). As “impurezas”, em alguns casos, são segregadas em duas partes, dependendo do Shredder e do processo implementado pela Siderúrgica, sendo frequentemente separada em “Terra de Shredder” e “Fluff” (Figura 7 – (c) e (d)). A Terra constitui a fração de maior densidade e menor granulometria, que é separada por decks de separação granulométrica, contém grande quantidade de solo e materiais voláteis fragmentados, em granulometria inferior se comparado ao Fluff. O Fluff, é o material de maior granulometria e menor densidade, com menos quantidade de solo, e grande parte de voláteis, passando pelos decks de separação. Essas impurezas, após segregadas precisam ser destinadas de forma adequada, como resíduos do processo. Esses resíduos não possuem aproveitamentos viáveis, tanto técnico como econômico, sendo destinados para Aterros (ROVINARU; RUS, 2019). A destinação para aterros impõe um ônus considerável ao custo de produção do aço, uma vez que, durante uma operação do triturador de sucata, aproximadamente 20% de resíduos são gerados em relação à sucata de entrada (RIBEIRO; FAYER, 2021; RECKZIEGEL, 2012).

2.4.3 Gestão de resíduos siderúrgicos

A gestão de resíduos tornou-se uma área na qual a indústria siderúrgica alcançou avanços significativos ao longo das últimas décadas. Através da prática de direcionar esses resíduos para outros setores produtivos, onde são aproveitados como matérias-primas e fontes de energia, denominados "coprodutos", a indústria conseguiu encontrar mercados para aproximadamente 97% de sua produção sólida e líquida (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

A indústria siderúrgica, conforme dados do Instituto Aço Brasil (2023), apresentou uma geração específica de coprodutos e resíduos de 628 kg por tonelada de aço bruto, um aumento em relação aos anos anteriores (602 em 2021 e 622 em 2020). A destinação desses resíduos revelou uma melhoria significativa, com um reaproveitamento de 104%, indicando uma superação na eficiência de aproveitamento

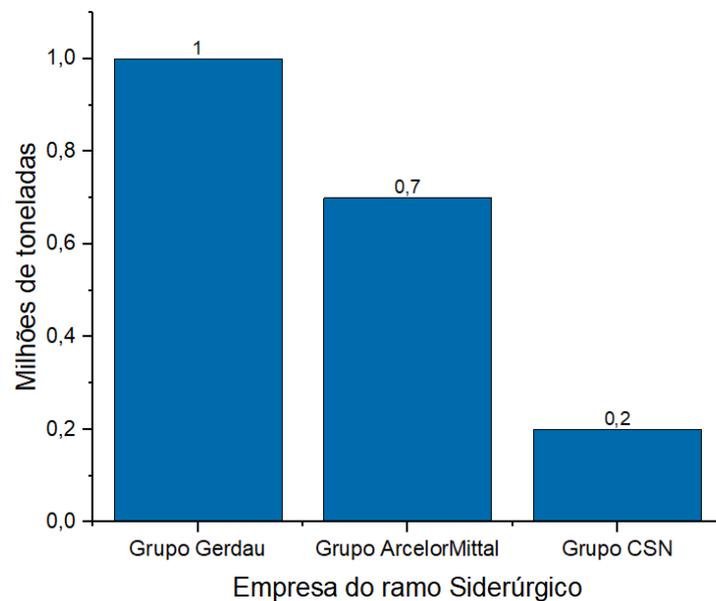
em comparação com a geração. O estoque, no entanto, registrou valores negativos, refletindo a saída de recursos armazenados. A indústria siderúrgica demonstrou uma abordagem proativa na gestão de seus resíduos, com uma significativa parcela sendo direcionada para doação (51%) e outra expressiva parte sendo vendida (26%). Essa estratégia reflete um compromisso crescente com a responsabilidade social e a promoção de práticas ambientalmente sustentáveis.

No que diz respeito aos principais usos dos resíduos siderúrgicos, destaca-se a sua aplicação como base e sub-base de estradas, representando expressivos 76% do total em 2022. Essa destinação evidencia a utilidade desses materiais na construção de infraestrutura viária, contribuindo para a economia circular e reduzindo a dependência de recursos naturais. Além disso, observa-se um aumento na reutilização desses resíduos (20%), indicando uma tendência positiva em direção ao aproveitamento eficiente desses subprodutos na cadeia produtiva, consolidando a indústria siderúrgica como um agente ativo na busca por práticas mais sustentáveis e na mitigação do impacto ambiental (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2023).

Apesar desses notáveis avanços, é importante destacar que 3% dos resíduos gerados pela indústria siderúrgica ainda são destinados a aterros sanitários. Isso é especialmente notável quando consideramos o contexto do grande volume de aço produzido e conseqüentemente de resíduos. Em 2021, um aumento global na produção de aço, que registrou um crescimento de 3,7% em 2021, atingindo a marca de 1,95 bilhão de toneladas, de acordo com dados da *World Steel Association* de 2023, aponta que o crescimento substancial na produção, inevitavelmente resulta em uma considerável geração de resíduos. Para o Brasil, se considerar os 31,9 milhões de toneladas de aço bruto produzidos no país em 2023 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2023), os 3% dos resíduos gerados que ainda são destinados à aterros, chegariam a 657 mil toneladas de resíduos.

Segundo os relatórios de Sustentabilidade dos Grupos Gerdau, ArcelorMittal e CSN, em 2022, a destinação de resíduos classe II – Não perigosos para aterros no ano de 2022 foi de 1.006.893,19 toneladas pela Gerdau, 717.902,47 toneladas pela ArcelorMittal e 228.339,74 toneladas pela CSN, indicando que apesar dos grandes avanços no que se refere ao aproveitamento de resíduos, milhões de toneladas de resíduos não perigosos, ainda não dispostas em aterros sanitários, anualmente (Figura 8) (ARCELORMITTAL BRASIL, 2022; CSN, 2022; GERDAU, 2022).

Figura 8 – Destinação de resíduos Classe II, para aterros sanitários em 2022, pelos Grupos Gerdau, ArcelorMittal e CSN.



Adaptado. (ARCELORMITTAL BRASIL, 2022; CSN, 2022; GERDAU, 2022)

Entre os resíduos siderúrgicos destinados à disposição final, os provenientes do processo de trituração - a Terra e o Fluff, apresentam desafios consideráveis em termos de separação e reaproveitamento. Como resultado, uma parcela significativa desses resíduos é direcionada para aterros sanitários pelas usinas siderúrgicas. Em alguns casos, a Terra é utilizada pelos aterros como cobertura de célula. Já o Fluff, é em alguns casos, encaminhado para o processo de coprocessamento em indústrias cimenteiras. No entanto, a quantidade gerada frequentemente excede a capacidade de absorção da indústria cimenteira, e em muitas situações, a distância entre as siderúrgicas e as cimenteiras torna inviável o transporte devido à baixa densidade do resíduo, o que acarreta custos elevados de frete. Além disso, o Fluff contém cloro, proveniente da presença de PVC nos resíduos. Quando queimado, o cloro pode resultar na emissão de dioxinas e furanos, substâncias prejudiciais à saúde e ao meio ambiente. Considerando que os limites de cloro estabelecidos nos licenciamentos das cimenteiras são baixos, torna-se ainda mais desafiador o seu aproveitamento. Diante dessas questões, têm-se buscado constantemente novas alternativas para o aproveitamento e destinação sustentável desses resíduos. (CAETANO, 2017; BATISTA, 2014; LIMA, 2019; FIGUEIREDO, 2016; RIBEIRO; FAYER;, 2021; RECKZIEGEL, 2012)

O Fluff é composto principalmente por uma variedade de polímeros, incluindo borrachas, isopor, espumas e uma ampla gama de plásticos, tanto rígidos quanto flexíveis (RIBEIRO; FAYER;, 2021; RECKZIEGEL, 2012). Embora a maioria desses materiais tenha potencial para reciclagem, a separação por tipo é extremamente desafiadora devido à heterogeneidade dos resíduos e à similaridade de densidade entre os materiais constituintes. Nesse contexto, uma abordagem de aproveitamento que não exija a separação prévia dos materiais é considerada ideal.

2.5 Resíduos sólidos

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 10004 de os resíduos sólidos são aqueles que resultam de atividade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004). No Brasil, umas das principais etapas para o correto gerenciamento dos resíduos, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, é conhecer sua classificação, ou seja, identificar se o resíduo possui substâncias que apresentem algum mal a saúde humana ou ao meio ambiente, que os torne perigosos (BRASIL, 2010). São classificados como Resíduos Classe I (Perigosos), Resíduos Classe II A (Não perigosos e não-inertes) e Resíduos Classe II B (Não perigosos e inertes).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, estabelece uma ordem de priorização para a gestão e destinação adequada dos resíduos sólidos. Esta ordem de priorização no gerenciamento dos resíduos é descrita na Figura 9 (BRASIL, 2010).

Figura 9 – Ordem de priorização no gerenciamento de resíduos.



Adaptado. (BRASIL, 2010)

Cada ordem de priorização no gerenciamento de resíduos, apresentada na Figura 9, será descrita a seguir:

- a) Não geração de resíduos: Isso envolve ações para evitar a geração de resíduos sólidos sempre que possível, seja através de práticas de redução na fonte, uso eficiente de recursos, ou mudanças nos processos de produção.
- b) Redução: Se não for possível evitar a geração de resíduos, a próxima prioridade é a redução na quantidade e na periculosidade dos resíduos gerados. Isso pode ser feito através de medidas como o uso de tecnologias mais limpas, processos de produção mais eficientes, e práticas de consumo consciente.
- c) Reutilização: Após a redução, a reutilização é incentivada como uma forma de prolongar a vida útil dos produtos e materiais, evitando assim a necessidade de descarte precoce.
- d) Reciclagem: Se não for possível evitar, reduzir ou reutilizar os resíduos, a próxima prioridade é a reciclagem, onde os materiais são coletados, processados e transformados em novos produtos ou matérias-primas.
- e) Tratamento dos resíduos: Se os resíduos não puderem ser evitados, reduzidos, reutilizados ou reciclados, a próxima opção é o tratamento dos resíduos, incluindo processos como a compostagem, a recuperação de energia, e o tratamento térmico.

- f) Disposição final ambientalmente adequada: Esta é a última opção na hierarquia e envolve a disposição final dos resíduos em aterros sanitários ambientalmente adequados.

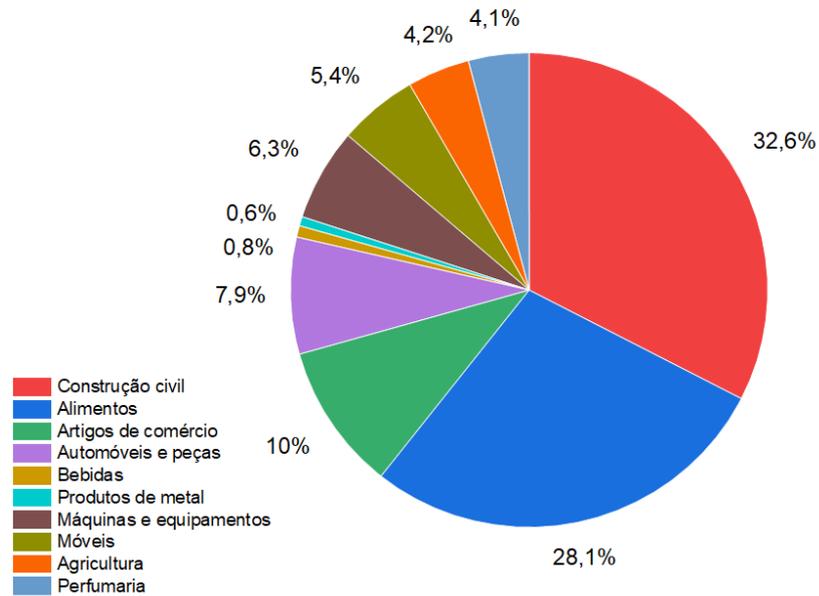
2.5.1 Reciclagem

Entre os resíduos frequentemente reciclados, destaca-se o plástico. Em 2022, observou-se um avanço significativo na gestão dos resíduos plásticos pós-consumo no país, com uma taxa de reciclagem de 25,6% desses materiais. Este período também testemunhou um aumento notável na produção de plástico reciclado pós-consumo, totalizando mais de 1 milhão e 100 mil toneladas. No mesmo contexto, a demanda por reciclagem cresceu substancialmente, alcançando um total de 1,7 milhão de toneladas de resíduo plástico consumido para este fim, representando um incremento de 8,5% em comparação com o ano anterior. Dos 1,7 milhão de toneladas recicladas, aproximadamente 1,3 milhão de toneladas são provenientes de plástico pós-consumo, isto é, materiais descartados em residências e em diversos ambientes como shoppings centers, estabelecimentos comerciais e escritórios. Adicionalmente, cerca de 421 mil toneladas de plástico têm origem nos resíduos pós-industriais, incluindo sobras dos processos da indústria petroquímica, da transformação de plásticos e da própria reciclagem (PICPLAST, 2023).

Essa abordagem, conhecida como reciclagem, possibilita a substituição de materiais convencionais, como madeira e aço. A reciclagem dos resíduos plásticos pode ser realizada de forma mecânica, química ou energética. A abordagem mecânica não apenas reduz os impactos ambientais associados ao descarte inadequado, mas também diminui o consumo de matérias-primas fósseis ou naturais utilizadas na produção de polímeros virgens (GOMES, 2021; MARTINS et al., 2019; MÜZEL, 2017).

A utilização do plástico está presente em praticamente todos os setores produtivos (Figura 10), contudo, é interessante notar que o setor da construção civil foi o maior consumidor de plásticos no Brasil em 2021, ultrapassando até mesmo a indústria de alimentos, é um reflexo da extensa gama de usos e aplicações desse material na construção. O plástico é utilizado em uma variedade de formas na construção civil, desde tubos e canos até isolamento térmico e revestimentos. A demanda por plásticos na construção pode ser atribuída à sua versatilidade, durabilidade e custo relativamente baixo em comparação com outros materiais (ABIPLAST, 2022).

Figura 10 – Consumo de plástico no Brasil, por setores em 2020.



Adaptado. (ABIPLAST, 2022).

A reciclagem dos plásticos pós-consumo (Figura 11) consiste em passarem por um sistema seletivo, seja na coleta seletiva de ambientes domésticos, industriais ou comerciais, os plásticos podem ser encaminhados para uma fase de triagem, realizada em cooperativas ou por sucateiros. Nessa etapa, os plásticos são separados por tipo (PET, PEAD, PP, entre outros) e por cor. Para facilitar o transporte para as fábricas recicladoras, os materiais são enfardados, utilizando prensas hidráulicas ou manuais. O processo de reciclagem dos diversos tipos de plásticos envolve a moagem e lavagem das embalagens. Posteriormente, os polímeros são transformados novamente em grânulos, conhecidos como grãos ou pellets. Esses grânulos servirão como matéria-prima para indústrias que fabricam uma ampla gama de produtos, como peças automotivas, utensílios domésticos, brinquedos, madeira plástica, fios para vestuário, e outros itens. Esse ciclo de reciclagem demonstra uma abordagem sustentável na utilização dos plásticos, contribuindo para a redução do desperdício e a preservação do meio ambiente (MAXIQUIM, 2023).

Figura 11 – Esquema da rota usual na reciclagem do plástico.



Adaptado. (PICPLAST; ABIPLAST; BRASKEM, 2017).

Os plásticos são frequentemente escolhidos para reciclagem devido às suas propriedades de resistência, durabilidade e viabilidade para processos mecânicos, térmicos e químicos e a evolução da reciclagem de resíduos poliméricos está alinhada com as tecnologias disponíveis, deixando de ser apenas uma estratégia para reduzir custos e consumo de energia, tornando-se uma responsabilidade social e ambiental das empresas. Isso transforma a reciclagem em um elemento crucial da economia circular, impulsionando a demanda por novas linhas de reciclagem capazes de processar diversos materiais, incluindo polietileno, polipropileno e PVC (ABIPLAST, 2022).

Em 2022, 1,1 mil toneladas de plástico pós consumo reciclado (PCR) foram comercializados no Brasil. Entre os segmentos que mais utilizaram o plástico reciclado, destaca-se a Indústria de Cosméticos e Limpeza Doméstica (152 mil toneladas), seguida pela Indústria de Bebidas (128 mil toneladas), Indústria de Utilidades Domésticas (111 mil toneladas) e Indústria da Civil e Infraestrutura (105 mil toneladas) (MAXIQUIM, 2023).

Na indústria da construção civil e infraestrutura, maior setor consumidor de plástico no Brasil, os compósitos plásticos têm ganhado destaque e o uso de materiais recicláveis pode tornar o ramo mais sustentável.

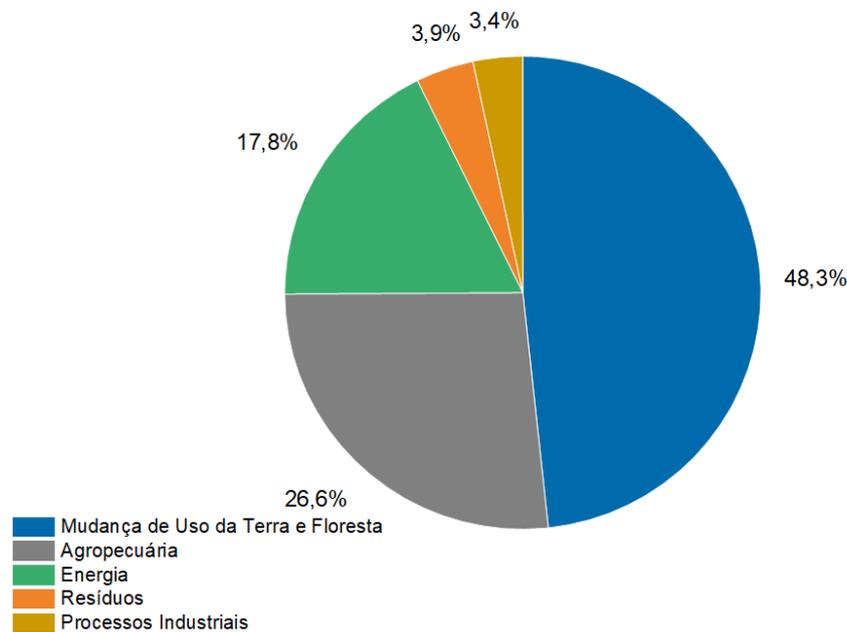
2.6 Mudanças climáticas e os gases de efeito estufa

As alterações climáticas são a principal preocupação para o futuro, segundo um inquérito do Fórum Económico Mundial. O Fórum Económico Mundial publica o *Global Risk Report 2024*, um Relatório com os resultados do *Global Risks Perception Survey* (GRPS), que considera opinião de líderes globais, da academia, das empresas, do governo, da comunidade internacional e da sociedade civil e de especialistas em temas específicos. O relatório descreve os riscos globais mais graves para as economias e sociedades em curto prazo - 2 anos e longo prazo - 10 anos para apoiar os decisores (governos, empresários, etc.) no equilíbrio entre as crises atuais e as prioridades a longo prazo. “Eventos climáticos extremos”, relacionado às mudanças climáticas e suas consequências para os sistemas terrestres, é o segundo risco indicado para os próximos dois anos, e o primeiro indicado para os próximos 10 anos (WEF, 2024).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) cita que as mudanças climáticas causam perdas e danos no planeta e que desastres naturais relacionados ao clima estão atingindo especialmente pessoas e ecossistemas mais vulneráveis. O aumento da temperatura global, consequência direta da emissão de gases de efeito estufa, eleva a temperatura do planeta e aumenta a frequência e a intensidade dos eventos climáticos extremos. Para lidar com os eventos climáticos extremos, são necessárias medidas de adaptação às mudanças climáticas com ações para reduzir ou evitar as emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2023).

Observando os dados publicados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), uma iniciativa do Observatório do Clima que compreende a produção de estimativas anuais das emissões de gases de efeito estufa no Brasil, é possível classificar as categorias de maior contribuição para emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Entre essas categorias, a Figura 12 apresenta a classificação das cinco principais categorias que mais emitem gases de efeito estufa, fornecendo uma visão importante sobre as fontes de emissão e suas contribuições relativas às mudanças climáticas (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2022).

Figura 12 – Categorias que contribuem para emissões de gases de efeito estufa no Brasil.



Adaptado. (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2022).

Neste contexto, observa-se que a categoria “resíduos” consta no ranking das 5 maiores categorias emissoras, se posicionando em quarto lugar. Comparando as emissões entre as 5, “Mudança de Uso da Terra e Floresta”, relacionada ao desmatamento e uso e cobertura do solo, compreende 48% das emissões, enquanto atividades “Agropecuárias” correspondem a 27%, seguidos do setor de energia com 18% e “Resíduos” correspondendo a 4% do total, ultrapassando “Processos Industriais”, que são conhecidos mundialmente pelo potencial de poluição. (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2022).

Dentro da categoria de resíduos, as emissões incluem principalmente metano (CH₄) e outros gases de efeito estufa resultantes dos serviços de saneamento. Essas emissões estão relacionadas ao tratamento de resíduos sólidos e efluentes líquidos. As atividades que geram emissões são divididas em quatro, sendo elas (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2022):

- a) disposição final de resíduos em aterros sanitários e outros tipos de disposição;
- b) a incineração de resíduos de serviços de saúde (RSS);
- c) a queima a céu aberto de resíduos sólidos;
- d) e o tratamento e remoção de efluentes líquidos domésticos e industriais.

Em 2022, cerca de 34% das emissões de gases de efeito estufa da categoria de resíduos foram atribuídas à disposição final de resíduos em aterros sanitários e outros locais de disposição (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2022). Essas informações ressaltam a importância de implementar práticas de gestão de resíduos mais sustentáveis e eficientes para reduzir as emissões de gases de efeito estufa provenientes dessas fontes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

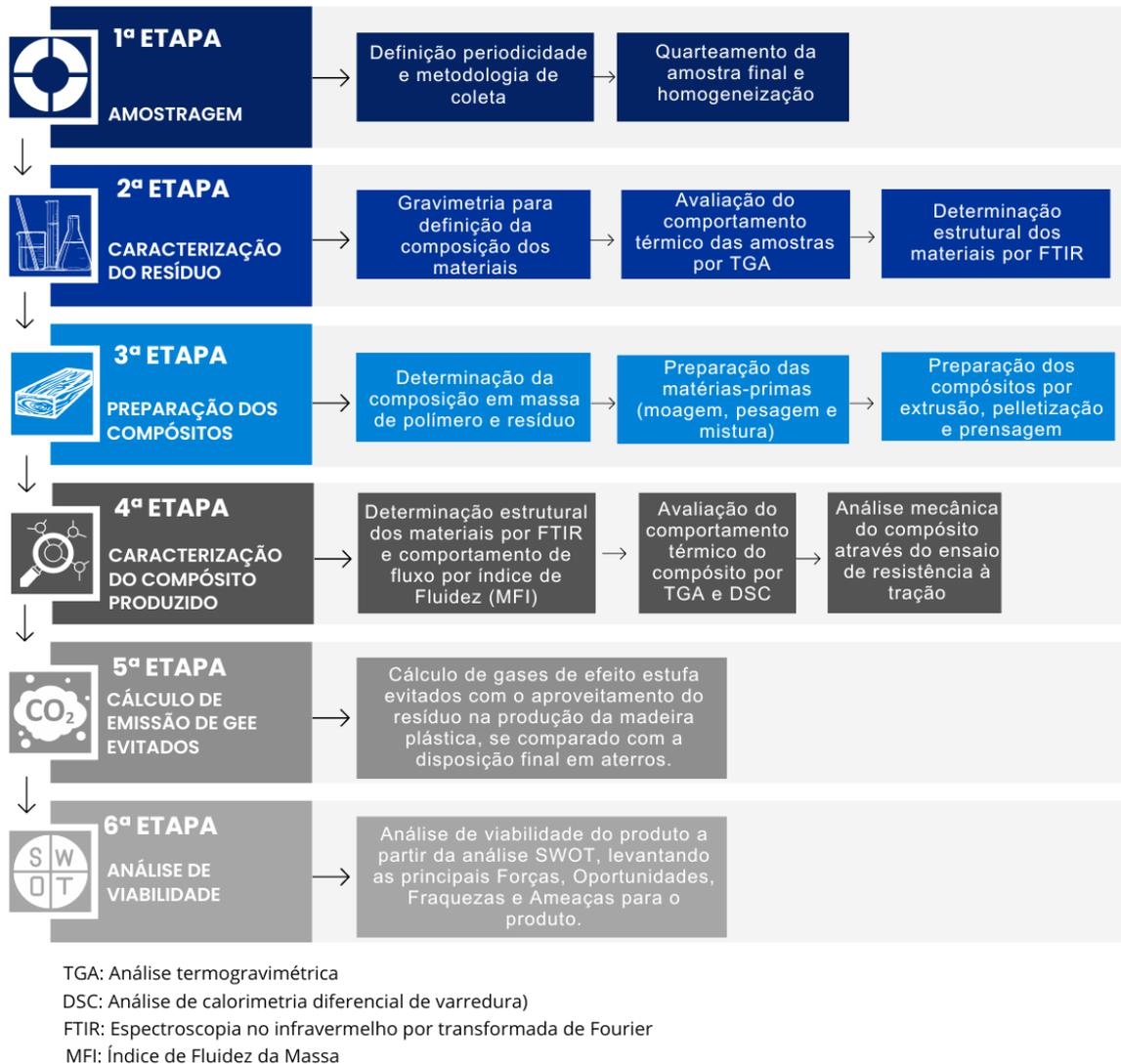
3.1 Materiais

Os materiais utilizados foram o resíduo Fluff, doado por uma Siderúrgica localizada em Minas Gerais e o polipropileno, produzido pela empresa Brasken – *grade* CP 442XP, fornecido pelo Laboratório NERDES (Núcleo de Excelência em Reciclagem e Desenvolvimento Sustentável), localizado no IMA/UFRJ.

3.2 Metodologia

A metodologia foi dividida em 5 etapas (Figura 13): (1) coleta de amostra, de forma que se obtenha uma amostra de resíduo mais representativa possível; (2) caracterização do resíduo; (3) preparação e extrusão do compósito, (4) caracterização e análise de viabilidade de produção do compósito obtido, (5) aplicação de metodologia de contabilização referente à emissão de gases de efeito estufa através do desenvolvimento de um compósito à base de PP/Resíduo Fluff e (6) análise SWOT do produto.

Figura 13 – Representação esquemática da metodologia utilizada no estudo.



Elaborado pelo autor (2023).

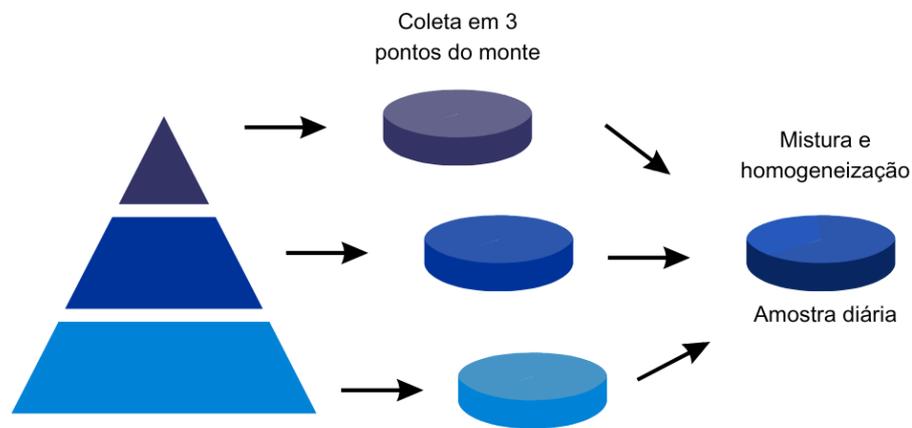
3.2.1 Amostragem (1ª etapa)

Devido à heterogeneidade do resíduo, ocasionada pela grande variedade de sucata que entra no equipamento Shredder, umas das principais etapas do trabalho, que influencia diretamente nos resultados, é a coleta de amostras. Portanto, foi estabelecido um cronograma de coleta de amostras, de forma que a amostragem seja a mais representativa possível e englobe todas as tipologias de sucatas que são inseridas no equipamento Shredder, de acordo com estudos prévios realizados em parceria com a Siderúrgica que disponibilizou as amostras.

As amostras dos resíduos foram disponibilizadas por uma Siderúrgica localizada no Estado de Minas Gerais, produtora de aços longos, pertencente ao maior grupo produtor de aço do Brasil.

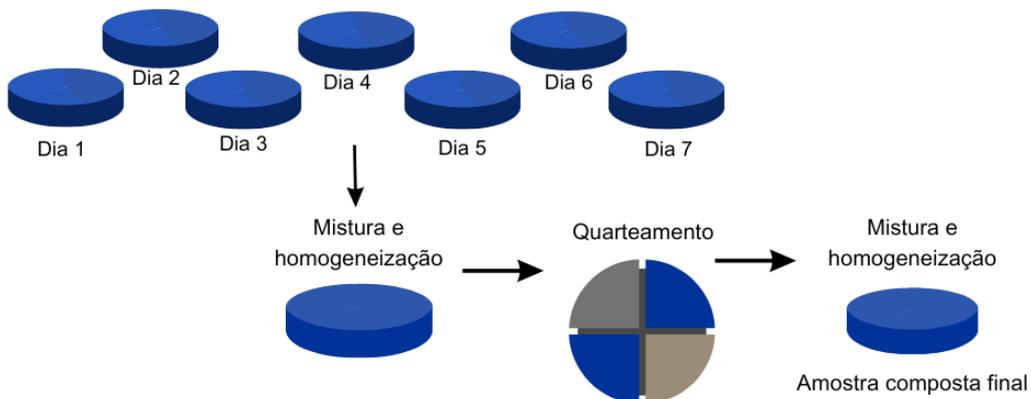
O cronograma consiste em um período de 7 dias, considerando a coleta de uma amostra diária, formada por resíduos de 3 pontos da pilha (fundo, meio e topo), conforme representado na Figura 13. Ao fim dos 7 dias, as amostras diárias foram homogeneizadas e quarteadas, formando uma única amostra, de acordo com metodologia estabelecida na NBR 10007 (ABNT,2004), representada na Figura 14 e 15.

Figura 14 – Coleta diária em três pontos da pilha, formando uma única amostra.



Elaborado pelo autor (2023).

Figura 15 – Homogeneização e quarteamento das 7 amostras diárias, formando uma única amostra.



Elaborado pelo autor (2023).

3.2.2 Caracterização do resíduo (2ª etapa)

3.2.2.1 Gravimetria

Os materiais foram separados de forma manual, por catação, segregados em plásticos rígidos, plásticos flexíveis, espumas, isopores, tecidos, borrachas, papelão/papel, orgânicos (pedaços de madeiras e galhos) e metais (ferrosos e não ferrosos), de forma a se obter a composição do resíduo.

3.2.2.2 Moagem

Após a gravimetria a amostra foi desagregada e moída em moinho de facas da marca Primotécnica, modelo LP 1003, pertencente ao Laboratório de Apoio Tecnológico (LAPTEC), no IMA - UFRJ. Os resíduos foram homogeneizados e triturados no moinho, a uma granulometria de 0,75mm.

3.2.2.3 Avaliação térmica do resíduo

A avaliação térmica do resíduo obtida por termogravimetria foi realizada em analisador termogravimétrico (TGA), modelo Q500, da TA Instruments. As corridas foram obtidas por aquecimento das amostras de 30 a 900°C, sob taxa de aquecimento de 10°C/min em atmosfera de nitrogênio.

3.2.2.4 Espectroscopia de infravermelho – FTIR

A espectroscopia de infravermelho – FTIR, foi conduzida utilizando um cristal de germânio, envolvendo 64 varreduras, com uma resolução de 4 cm⁻¹, a fim de determinar as estruturas presentes no resíduo.

3.2.3 Preparação e extrusão do compósito (3ª etapa)

3.2.3.1 Preparação das formulações

Os compósitos foram preparados utilizando dois diferentes percentuais do resíduo e outro de polipropileno puro (Tabela 1).

Tabela 1 – Composições utilizadas PP/Fluff, em massa total de mistura.

Composição (PP/Fluff), %, em massa	Código
100/0	R00
95/5	R05
90/10	R10

Antes do processamento, as matérias-primas foram previamente secas em estufa a vácuo, na temperatura de 60 °C durante 24 horas.

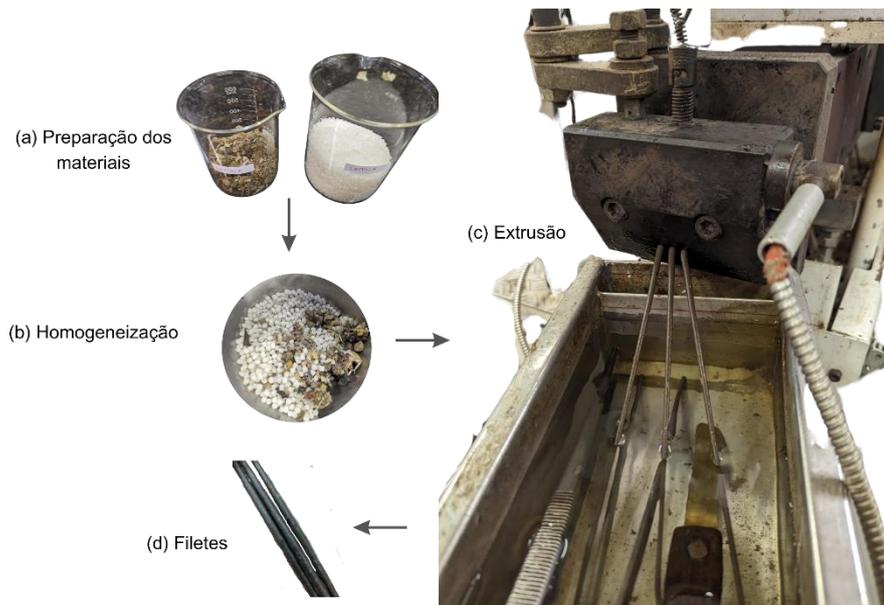
3.2.3.2 Processamento por Extrusão do PP e compósitos PP/Fluff

As três composições foram extrusadas em extrusora dupla rosca corrotatória e interpenetrante, marca Teck Trill, modelo DCT-20 (L/D = 36, D = 20 mm), localizada no Laboratório de apoio tecnológico (LAPTEC) no IMA - UFRJ. O perfil de temperatura usado variou de 90 a 200 °C, usando velocidade de rosca de 600 rpm. O perfil de rosca usado foi adequado para garantir uma perfeita dispersão do resíduo na matriz plástica.

Nesta etapa, optou-se por manter o maior percentual de resíduo em 10%, pois devido sua baixa densidade e alto volume, seu volume já superava o volume do PP, na mistura PP/Fluff (90/10, % m/m), e ultrapassar esse percentual dificultaria a sua inserção no alimentador da extrusora utilizada.

O resíduo e o PP foram secos em estufa e pesados, em três proporções distintas da mistura resíduo-matriz (a), sendo elas o R00 (100% de PP), R05 (5% de resíduo para 95% de PP) e o R10 (10% de resíduo para 90% de PP) e foram homogeneizados (b) e inseridos na extrusora (c), conforme esquematizado na Figura 16. Após extrusão, as composições preparadas foram granuladas.

Figura 16 – Esquema de extrusão: (a) preparação dos materiais, (b) homogeneização. (c) extrusão e (d) filetes obtidos.



Elaborado pelo autor (2023).

3.2.3.3 Moldagem por compressão do PP e dos compósitos PP/Fluff

O processo de moldagem por compressão dos materiais foi realizado através de uma prensa hidráulica com resfriamento automático. Para essa etapa, um molde metálico com dimensões de 10 cm x 10 cm x 0,3 cm foi inserido entre as placas da prensa. Estes moldes foram devidamente preenchidos com os grânulos das amostras. A temperatura de prensagem estabelecida foi de 210°C. Uma vez que as placas foram inseridas na prensa, esperou-se a estabilização da temperatura. Somente então, as pressões de 2 e 10 toneladas foram aplicadas, cada uma mantida por 30 segundos. Exceção feita à pressão de 10 toneladas, a qual foi sustentada por 3 minutos. Entre as transições de pressão, um processo de alívio de pressão, conhecido como degasagem, foi implementado, com propósito de minimizar a formação de bolhas resultantes da retenção de ar nas amostras. Vale ressaltar que todo esse conjunto de passos foi repetido para cada composição preparada.

3.2.4 Caracterização do compósito obtido (4ª Etapa)

A seguir serão descritas, detalhadamente, as análises de caracterização realizadas no PP puro e nos compósitos PP/Fluff.

3.2.4.1 Análises térmicas do PP e dos compósitos PP/Fluff

A avaliação térmica dos três compósitos foi obtida por termogravimetria em analisador termogravimétrico (TGA), modelo Q500, da TA Instruments. As corridas foram obtidas por aquecimento das amostras de 30 a 900°C, sob taxa de aquecimento de 10°C/min.

A calorimetria exploratória diferencial – DSC foi conduzida na faixa de temperatura de 30 a 250°C sob uma taxa de aquecimento de 10°C/min. O equipamento usado foi o DSC, modelo Q2000, da TA Instruments, O grau de cristalinidade do PP puro e dos compósitos (R05 e R10) foi determinado pela Equação 1 (PARENTEAU; AUSIAS; GROHENS, 2012).

$$\chi_c = 100 \times \frac{\Delta H_f}{\Delta H_{100\%}} \quad \text{Equação. 1}$$

Onde $\Delta H_{100\%}$ é 207 J/g (PARENTEAU; AUSIAS; GROHENS, 2012).

3.2.4.2 Análise do Índice de Fluidez do PP e dos compósitos PP/Fluff

A avaliação do comportamento de fluxo do PP e dos compósitos PP/Fluff foi realizada através da análise do índice de fluidez (MFI) no equipamento DYNISCO, modelo LMI 4000, seguindo a norma ASTM D1238-13, utilizando as condições definidas em norma para o polipropileno (g/10 min, 230°C e 2,16 kg).

3.2.4.3 Análise da resistência à tração do PP e dos compósitos PP/Fluff

Os testes de resistência à tração foram realizados em uma máquina de ensaio universal (EMIC DL-3000), utilizando uma célula de carga de 5 KN. Os corpos de prova foram moldados no formato de gravata (Tipo V), sendo 7 de cada tipo, conforme estabelecido na norma ASTM D 638. A velocidade de separação das garras foi de 15 mm/min.

3.2.4.4 Análise de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) do Fluff, do PP e dos compósitos PP/Fluff

A análise de FTIR foi conduzida utilizando acessório de reflexão total atenuada (ATR) com cristal de germânio acoplado, em equipamento Fourier Perkin-Elmer, modelo 1720. A faixa de espectro analisada foi de 4000 a 650 cm^{-1} , com uma resolução de 4 cm^{-1} e 60 varreduras.

É importante ressaltar que esta técnica foi realizada com o objetivo de confirmar a incorporação do resíduo Fluff na matriz de PP.

3.2.5 Cálculo da emissão de gases de efeito estufa (5ª Etapa)

Para avaliar o volume evitado de gases de efeito estufa com a retirada desses resíduos dos aterros sanitários, propondo sua incorporação em matrizes poliméricas para produção de madeira plástica, foi conduzido um estudo abordando dois cenários distintos e empíricos:

- Cenário 1: Destinação dos resíduos em aterro sanitário sem captação e aproveitamento de gases;
- Cenário 2: Destinação dos resíduos em aterro sanitário com captação de gases e aproveitamento para geração de energia.

Para quantificar essa emissão, utilizou-se a “Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil – Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)”, disponível para download no site do Governo Brasileiro, no Ministério das Cidades, adaptando os dados de entrada para as características do Fluff.

Optou-se pelo uso da calculadora ao invés de utilização do fator de emissão do GHG Protocol para a disposição de resíduos em aterros, uma vez que desejava-se obter números mais precisos e baseados na composição real do resíduo.

A "Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil" utiliza uma metodologia específica para calcular as emissões de GEE associadas ao gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (RSU), incluindo a destinação de resíduos siderúrgicos para aterros. Esta ferramenta foi desenvolvida com o objetivo de fornecer informações detalhadas para a tomada de decisões em diferentes cenários de gestão de resíduos.

A abordagem fundamental adotada pela calculadora é a teoria da produção de gás, que é considerada uma das mais simples para estimar as emissões de metano relacionadas ao gerenciamento de resíduos. Essa abordagem parte da suposição de que todo o metano gerado a partir dos resíduos é liberado no mesmo ano em que esses resíduos são gerados. Essa premissa é alinhada com a abordagem de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e difere das diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que utilizam um modelo de decaimento de primeira ordem para levar em conta as mudanças temporais na produção de metano (GIEGRICH, 2021).

Na etapa de entrada de dados básicos da ferramenta, é necessário caracterizar o resíduo sólido urbano (RSU) que será avaliado. Isso inclui a identificação dos percentuais de diferentes materiais presentes no resíduo, como Resíduos orgânicos, Papel e papelão, Plásticos, Vidros, Metais ferrosos, Alumínio, Têxteis, Borracha e couro, Madeira, Resíduos minerais e outros materiais. Observa-se que a composição esperada para o RSU se assemelha à composição encontrada para o "Fluff", e, portanto, os dados básicos de entrada foram relacionados à gravimetria do Fluff.

Para o cálculo de emissões, foram considerados alguns fatores que influenciam na emissão, como o volume do resíduo do cálculo, fatores de emissão, captação de gases pelo aterro, se existe ou não geração de energia no aterro e sua camada de oxidação (GIEGRICH, 2021):

- Volume de resíduo: Para os cálculos, foi utilizado volume de destinação para aterro de 20.000 toneladas de resíduos no período de um ano;
- Fatores de emissão: Os fatores de emissão utilizados na calculadora pressupõem que o carbono orgânico presente no resíduo se decompõe em biogás de aterro ao longo da vida útil do aterro, a uma taxa de 50%. Essa taxa de decomposição é maior em aterros em comparação com processos de biodigestão anaeróbia, devido ao período prolongado de degradação. Além disso, presume-se que 55% do carbono orgânico decomposto se converte em metano, enquanto 45% se transformam em CO₂ biogênico, sendo neutro para o clima (GIEGRICH, 2021);
- Captação de gases: É essencial levar em consideração a eficácia da coleta de gás, para cálculo de emissões de GEE da disposição final de resíduos, uma vez que a captação e seu uso, reduz o consumo de combustíveis, entrando no balanço de massa. As taxas de eficiência na captação de gás em projetos de

recuperação em aterros variam amplamente, de 9% a mais de 90% (IPCC, 2006). Não obstante, ao longo da totalidade do ciclo de vida do aterro, é estimado que, no melhor dos casos, apenas metade do metano potencialmente gerado possa ser capturado, mesmo com a aplicação de técnicas avançadas de coleta de gás. A eficiência média na coleta de gás estipulada para esses cálculos foi de 50% (GIEGRICH, 2021);

- Geração de energia: A geração de eletricidade a partir do gás do aterro também desempenha um papel crucial na redução final das emissões de metano. Além disso, essas opções conferem benefícios adicionais, como a substituição de fontes convencionais de energia, como a média da eletricidade da rede brasileira. A calculadora considera um teor energético do metano de 10 kWh/m³. As emissões de GEE evitadas são calculadas para a eletricidade, com base em uma taxa de emissão de GEE de 338g CO₂-eq./kWh para o diesel substituído (GIEGRICH, 2021);
- Camada de Oxidação do Aterro: Em relação à camada de oxidação, que reflete a quantidade de CH₄ que é oxidado em uma cobertura de solo ou outro material de cobertura de um aterro sanitário, quando bem administrado, o IPCC (2006) justifica a utilização de um fator de oxidação de 0,1 para situações de disposição de resíduos adequadamente gerenciadas, ao estimar a oxidação do metano durante sua difusão através da camada superior e através de aberturas e fissuras. Conseqüentemente, adotado um fator de oxidação de 10%, padrão sugerido pela metodologia da Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil (GIEGRICH, 2021).
- Estimativa em número de árvores e campos de futebol: Calculando o quanto seria necessário em árvores para absorver a quantidade de CO₂ emitida pelo resíduo em aterro no período de 1 ano, segundo dados do IPEA (2007), 3 toneladas de CO₂ podem ser neutralizadas pelo plantio de 5 árvores em média, pois a quantidade de carbono absorvido varia segundo a espécie. Portanto, foi feito um cálculo simples de regra de três. Pensando em compensação ambiental, para reflorestar o equivalente a emissão de CO₂ do resíduo em aterro no período de um ano, segundo dados da (EMBRAPA, 2015), a cada hectare de área são plantadas uma média de 1667 árvores (o valor é médio, pois pode variar de acordo com o relevo, tipo de vegetação do local e tipo de

muda), com intuito de reflorestamento. Para equivalência em campos de futebol, foi considerado um campo com tamanho de 1,08 hectares.

3.2.6 Avaliação do produto, através da análise SWOT (6ª Etapa)

Nesta etapa, foi utilizada a análise SWOT para identificar as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças do produto obtido - madeira plástica contendo resíduo Fluff, indicando os pontos negativos e positivos da utilização do resíduo na produção de madeira plástica.

Para avaliar o valor de venda dos produtos de madeira plástica, foi conduzido um orçamento junto a seis fornecedores no Brasil, utilizando o buscador Google, categoria “Shopping”, focalizando especificamente o preço de seus itens mais ofertados à base desse material.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados da caracterização das matérias-primas e dos compósitos; além das avaliações referentes ao cálculo da emissão de gases de efeito estufa e da análise SWOT.

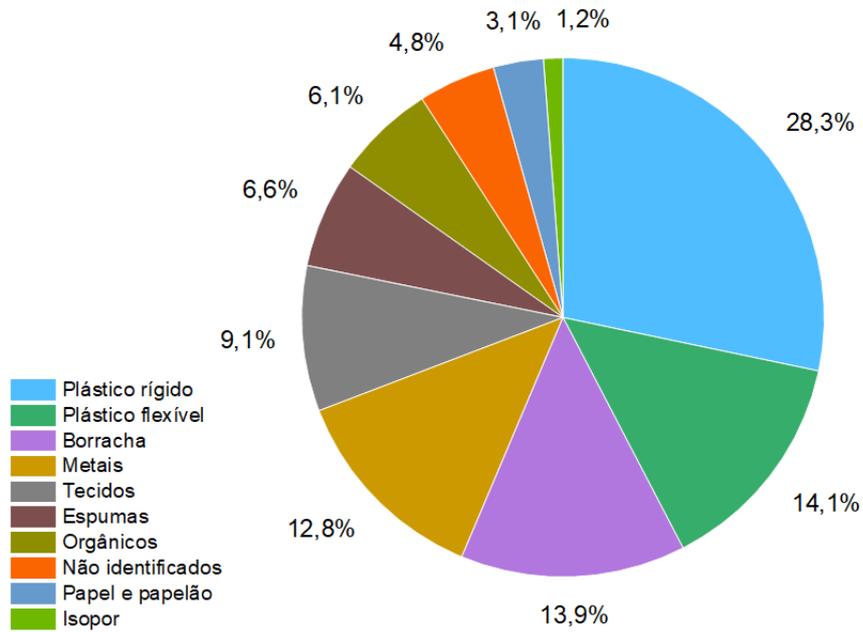
4.1 Caracterização do resíduo Fluff

A seguir serão discutidos os resultados referentes à caracterização do resíduo Fluff.

4.1.1 Gravimetria

Após a homogeneização e quarteamento, aplicou-se método de separação dos materiais através da análise gravimétrica manual. Nesse procedimento, foi possível determinar a composição percentual dos diferentes materiais presentes no resíduo. Os valores obtidos indicam que o resíduo é composto por plástico rígido (28%); plástico flexível (14%); espumas (7%); isopor (1%); tecidos (9%); metais (13%); papelão/papel (3%); orgânicos (7%); borracha (15%) e uma fração de difícil separação, composta por pequenos fragmentos não identificados e solo (5%), conforme ilustrado na Figura 17. Essa análise quantitativa oferece informações para a gestão adequada e a implementação de estratégias eficazes de tratamento e disposição dos diferentes tipos de materiais presentes no resíduo.

Figura 17 – Resultados da gravimetria do resíduo, em percentual.



Os materiais listados apresentam uma diversidade de constituições, sendo que alguns deles são classificados como polímeros (Figura 18).

Figura 18 – Materiais por grupos e sua constituição, separados durante a gravimetria.



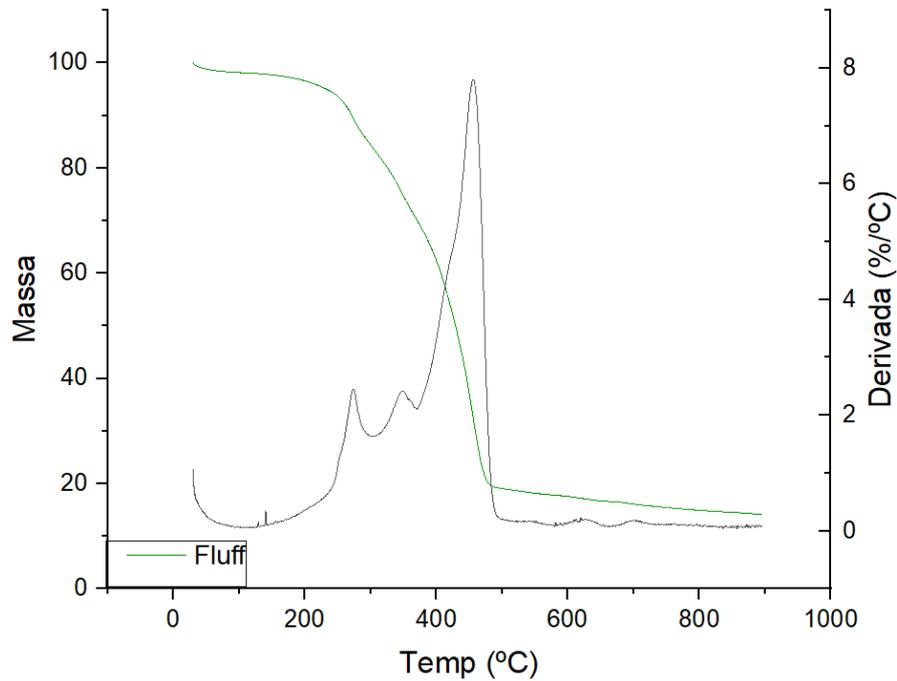
Observa-se que mesmo com a etapa de separação de metais ferrosos e não ferrosos no equipamento Shredder, na Siderúrgica ainda há uma perda significativa de não ferrosos.

Após a gravimetria, os metais foram descartados e o restante dos materiais novamente misturados, para seguirem para as demais etapas.

4.1.2 Análise Termogravimétrica (TGA)

As curvas TGA/DTG indicam que o resíduo Fluff possui diferentes componentes, com diferentes massas molares. Cada componente tem faixas de degradação diferentes, indicando a composição complexa do resíduo analisado. A partir da Figura 19, foi observado que a temperatura inicial de degradação (T_{onset}) da amostra de Fluff foi medida em 205°C ; enquanto a temperatura de máxima taxa de degradação (T_{max}) foi de 455°C , com um resíduo restante de 14% (material inorgânico).

Figura 19 – Curva TGA/DTG do resíduo Fluff.



Os resultados apresentados podem ser observados na Tabela 2 e são similares aos resultados encontrados por Vijayan et al. (2021).

Tabela 2 – Resultados do TGA para o resíduo Fluff.

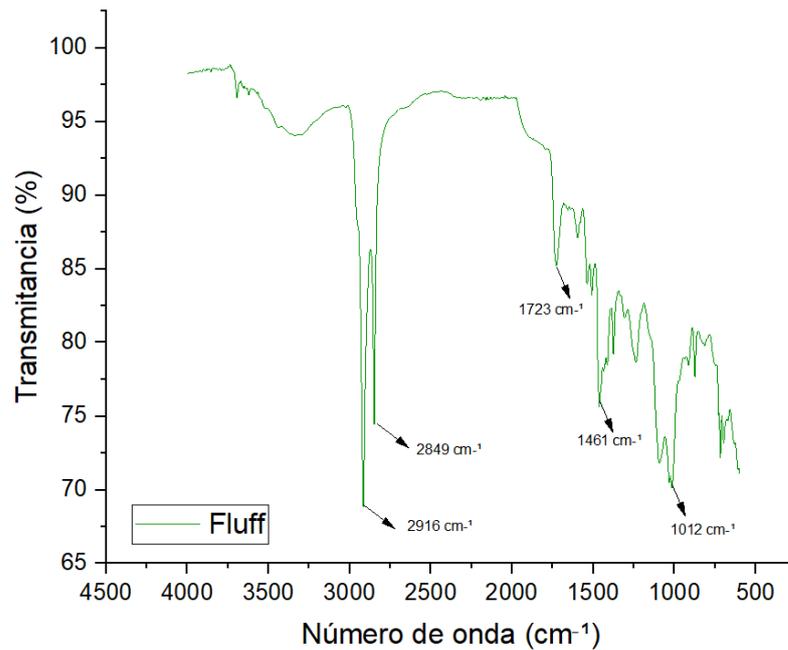
Material	Temperatura inicial de degradação (T_{onset}) (°C)	Temperatura máxima de degradação (T_{max}) (°C)	Resíduo (%)
Fluff	205	455	14

4.1.3 Análise por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A análise por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) é uma ferramenta para a identificação de grupos funcionais em uma

variedade de compostos químicos. Por meio da absorção de radiação infravermelha, o FTIR permite a identificação de grupamentos específicos presentes em moléculas orgânicas e inorgânicas. O espectro de FTIR do resíduo Fluff é apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Espectro de FTIR do resíduo Fluff.



O pico em 2916 cm^{-1} e 2849 cm^{-1} estão relacionados a ligações C-H assimétricas, frequentemente encontradas em hidrocarbonetos presentes em plásticos, borrachas e outros materiais poliméricos. Os picos em 1723 cm^{-1} e 1596 cm^{-1} indicam grupamentos C=O, caracterizando grupos carbonila, comuns em compostos orgânicos como aldeídos e cetonas, presentes em plásticos e outros materiais poliméricos. O pico em 1463 cm^{-1} é atribuído a ligações C-H em grupos metil, encontrados em polímeros como polietileno e polipropileno. Além disso, o pico em 1376 cm^{-1} pode ser associado a ligações C-H em grupos metil; enquanto o pico em 1237 cm^{-1} sugere a presença de ligações C-O, encontradas em éteres e álcoois presentes em plásticos e materiais orgânicos. Os picos em 1093 cm^{-1} e 1016 cm^{-1} indicam ligações C-O, comuns em grupos álcool e éter. Por fim, os picos abaixo de 1016 cm^{-1} estão associados a ligações C-H em anéis aromáticos e cadeias alifáticas, sugerindo a presença de materiais poliméricos aromáticos

(REIS, 2015; MARINHO, 2021; ROSA, 2014). Os resultados estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados da FTIR para o resíduo Fluff.

Amostra	Pico (cm⁻¹)	Ligação	Grupo sugerido	Material sugerido
	2916 e 2849	C-H	hidrocarbonetos	plásticos, borrachas e outros materiais poliméricos.
	1723 e 1596	C=O	carbonila	plásticos e outros materiais poliméricos
Fluff	1462	C-H	metil	polímeros como polietileno e polipropileno plásticos e
	1237	C-O	éteres e álcoois	materiais orgânicos
	1016	C-H	anéis aromáticos e cadeias alifáticas	materiais poliméricos e orgânicos

4.2 Preparação dos compósitos PP/Fluff

Os metais foram separados e descartados da amostra e o resíduo foi moído (Figura 21). Foi possível observar que, após a moagem, a amostra formou grumos, devido às espumas presentes terem sido fragmentadas em pedaços menores. Nota-se ainda, que algumas borrachas não foram fragmentadas pelo moinho, permanecendo inteiras.

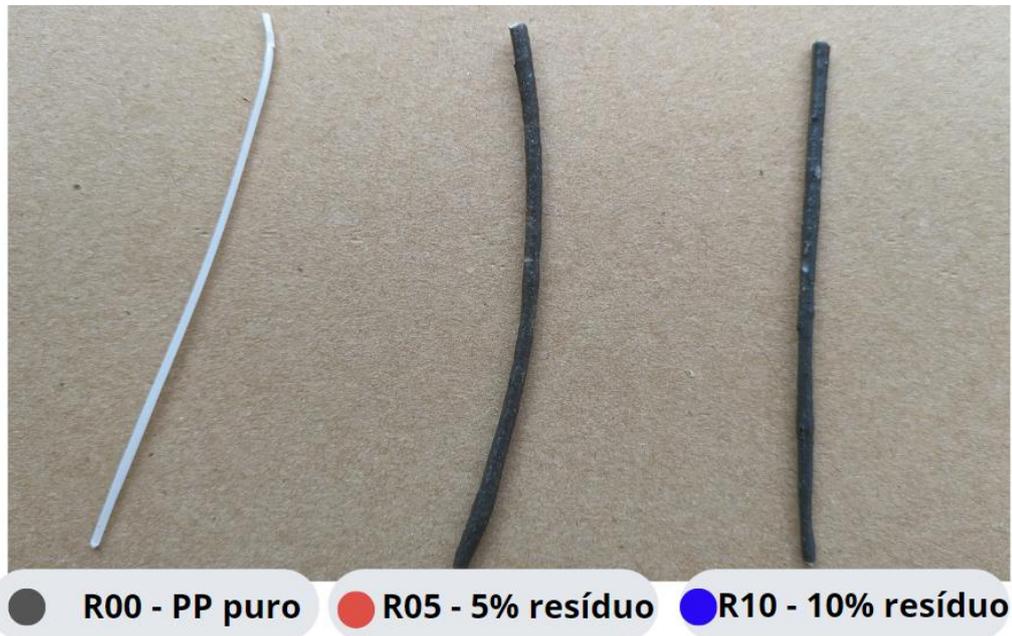
Figura 21 – Resíduo antes da moagem e após moagem.



4.2.1 Processamento por Extrusão

Durante o processo de extrusão, observou-se que a mistura R05, contendo 5% de resíduo, resultou em um filamento mais uniforme e rígido. Por outro lado, a mistura R10, com uma adição de 10% de resíduo, produziu um filamento com variações em sua espessura, apresentando áreas mais grossas e outras mais finas, sinalizando uma heterogeneidade na dispersão do resíduo na matriz polimérica. Já a mistura R00 (PP puro), gerou um filamento de espessura uniforme, porém mais fino em comparação aos outros materiais (Figura 22).

Figura 22 – Monofilamentos obtidos por extrusão dos materiais R00 (polipropileno puro), R05 (PP + 5% Fluff) e R10 (PP + 10% Fluff) (% , massa).



4.2.2 Processo de granulação dos extrusados – *pelletização*

Na etapa de granulação dos filamentos, observou-se que a mistura R05, contendo 5% de resíduo, resultou em *pellets* de coloração uniforme com um tom marrom escuro consistente. Em contraste, a mistura R10, com 10% de resíduo adicionado, apresentou uma coloração menos homogênea, exibindo áreas mais esbranquiçadas, o que pode indicar uma dispersão não homogênea do resíduo na matriz de PP. No caso do filamento R00, composto exclusivamente por PP puro, a *pelletização* resultou em *pellets* de dimensões mais finas e características de PP (Figura 23).

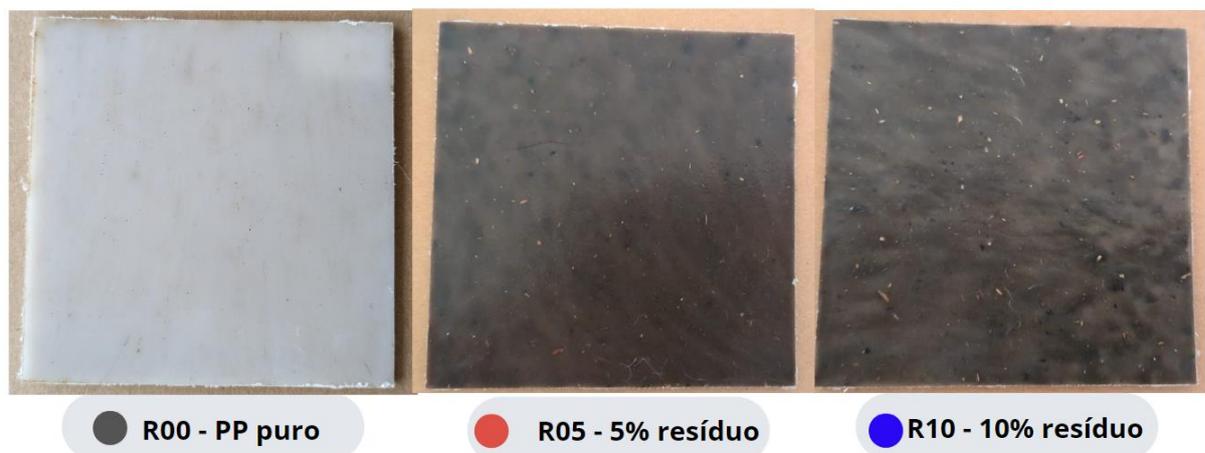
Figura 23 – Grânulos obtidos após extrusão e granulação dos materiais R00 (PP), R05 (PP+5% Fluff) e R10 (PP+10% Fluff) (% , massa).



4.2.3 Processamento por moldagem por compressão

Os grânulos foram prensados para obter uma placa uniforme. A Figura 24 mostra as placas produzidas de cada amostra através da moldagem por compressão. Como pode ser observado, os materiais apresentam fragmentos ainda visíveis, sendo que a amostra R10, com 10% de adição de resíduo, mostra-se menos uniforme no que se refere à coloração em comparação à amostra R05, com 5% de adição de resíduo.

Figura 24 – Materiais R00 (PP), R05 (PP+5% Fluff) e R10 (PP+10% Fluff) (% , massa).



Observa-se que os compósitos produzidos apresentam uma semelhança visual notável com a madeira plástica, tanto em termos de estrutura quanto de coloração.

A coloração natural das placas foi marrom (Figura 24), sem necessidade de adicionar nenhum aditivo para aumentar o aspecto de madeira, e os fragmentos que ficaram visíveis, deram aspecto visual de serragem, muito semelhante a madeira plástica convencional, produzida com plástico e serragem.

4.2 Caracterização dos compósitos produzidos

A seguir serão apresentados os resultados referentes às caracterizações do PP puro processado e dos compósitos PP/Fluff.

4.3.1 Índice de Fluidiez – MFI do PP e compósitos PP/Fluff

Os grânulos produzidos na etapa de extrusão e pelletização foram utilizados para o ensaio de MFI, para avaliar o comportamento de fluxo dos materiais. A partir dos resultados, como esperado, percebe-se que o índice de fluidez tende a diminuir com a adição do resíduo, sinalizando um leve aumento da viscosidade do sistema final. Portanto, em comparação com o R00, o R05 apresenta uma redução de aproximadamente 4,68% em seu índice de fluidez, enquanto o R10 apresenta uma redução de cerca de 8,77% (Tabela 4).

Este fenômeno é comumente observado em materiais compósitos, onde a presença de partículas adicionais interfere no fluxo das cadeias poliméricas, resultando em aumento da resistência ao fluxo e, conseqüentemente, redução na fluidez do material, conforme observado por outros autores (Silva et al., 2013; Ramos et al., 1993).

É importante ressaltar que a maior parte dos componentes do resíduo Fluff é constituída por materiais poliméricos.

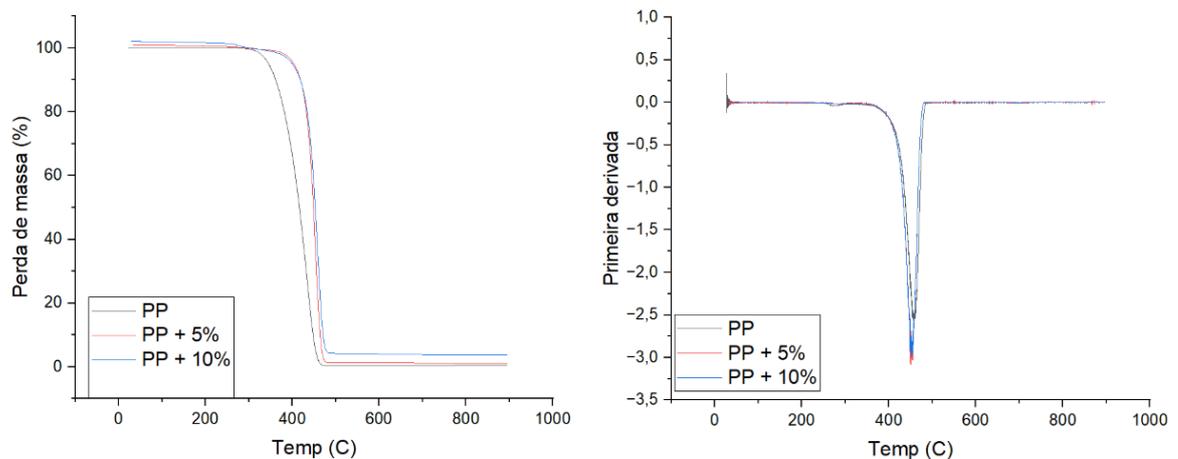
Tabela 4 – Resultados do Índice de Fluidiez (MFI) para o PP puro e para os compósitos.

Material	Índice de Fluidiez (g/10min)
R00 (PP)	3,42 ± 0,01
R05 (PP + 5%)	3,26 ± 0,01
R10 (PP + 10%)	3,12 ± 0,01

4.3.2 Análise termogravimétrica (TGA) do PP e compósitos PP/Fluff

Os dados da Tabela 5 mostram que a adição de Fluff na matriz de PP resultou em um aumento nos valores de T_{MAX} , mantendo as temperaturas de T_{ONSET} , indicando que há uma boa interação entre as fases de Fluff e PP. Como esperado, à medida que o Fluff é adicionado, ocorre um aumento nos valores de resíduo (Figura 25).

Figura 25 – Análise termogravimétrica (TGA) para os materiais R00 (PP), R05 (PP+5% Fluff) e R10 (PP+10% Fluff) (% , massa).



Em resumo, os resultados da TGA indicam que a incorporação de resíduos da siderúrgica na preparação de compósitos poliméricos não impactou negativamente a estabilidade térmica do PP comercial. Os compósitos R05 e R10 mostraram uma temperatura ligeiramente mais alta na taxa máxima de degradação (T_{MAX}) em comparação com o PP puro (R00). Os resultados estão expostos na Tabela 5.

Tabela 5 – TGA para o PP e compósitos PP/Fluff.

Material	Temperatura inicial de degradação (°C)	Temperatura máxima de degradação (°C)	Resíduo (%)
R00 (PP)	268	434	0,05
R05 (PP + 5%)	270	452	0,23
R10 (PP + 10%)	270	457	1,63

4.3.3 Análise por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) do PP e compósitos PP/Fluff

A análise de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) mostrou que o R00 (PP puro) apresentou uma temperatura de fusão (T_m) de 119 °C, enquanto os compósitos R05 e R10, com teores de 5% e 10% (% , massa), mostraram temperaturas ligeiramente mais altas, aumentando em 5,54% para R05 e 6,21% para R10. Tal comportamento sugere uma tendência de aumento na interação entre os componentes. No entanto, as temperaturas de cristalização (T_c) para os compósitos R05 e R10, com teores de 5% e 10%, são similares à do PP puro, indicando que a adição do resíduo não afetou significativamente essa propriedade.

A variação na entalpia de fusão (ΔH_f), que representa a entalpia necessária para fundir o material, aumentou nos compósitos em comparação com o R00, um aumento de 6% para R05 e 8% para R10, como mostrado na Tabela 6. Isso sugere que a adição do resíduo contribui para uma maior quantidade de energia necessária para fundir o material, possivelmente devido a uma interação mais forte entre as fases, como já mencionado. Esse comportamento levou a um leve aumento no grau de cristalinidade dos compósitos.

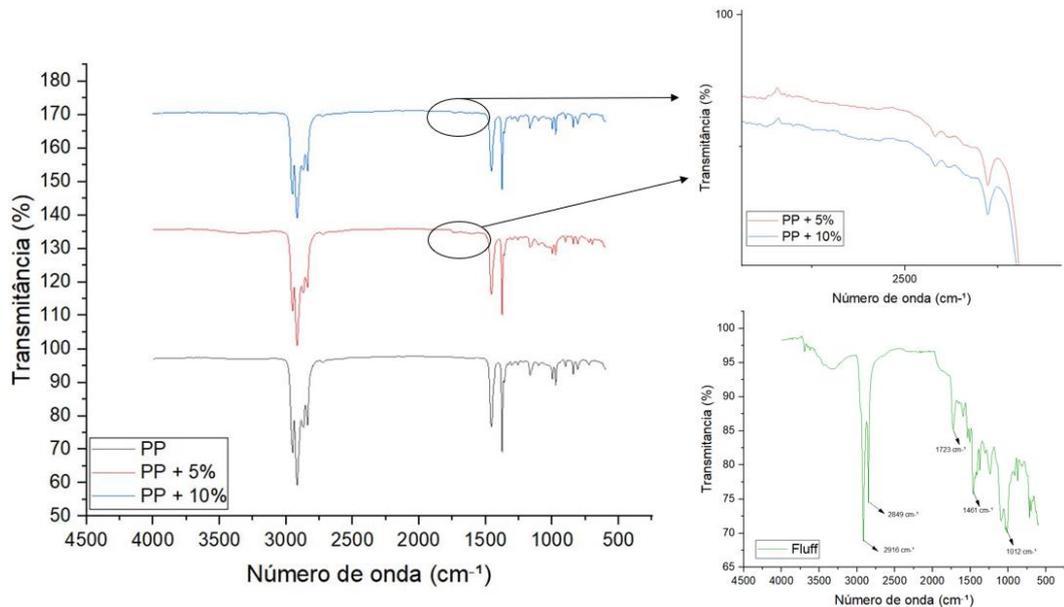
Tabela 6 – Análise por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) para os compósitos

Material	Temperatura		ΔH_f (J/g)	Grau de cristalinidade (χ_c) (%)
	Temperatura de fusão (°C)	de cristalização (°C)		
R00 (PP)	119	155	105	51
R05 (PP + 5%)	126	154	111	54
R10 (PP + 10%)	127	155	114	55

4.3.4 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 26 mostra os espectros de FTIR do Resíduo Fluff e das amostras R00, R05 e R10.

Figura 26 – Espectros FTIR dos materiais Resíduo Fluff, R00 (PP), R05 (PP+5% Fluff) e R10 (PP+10% Fluff) (% , massa).

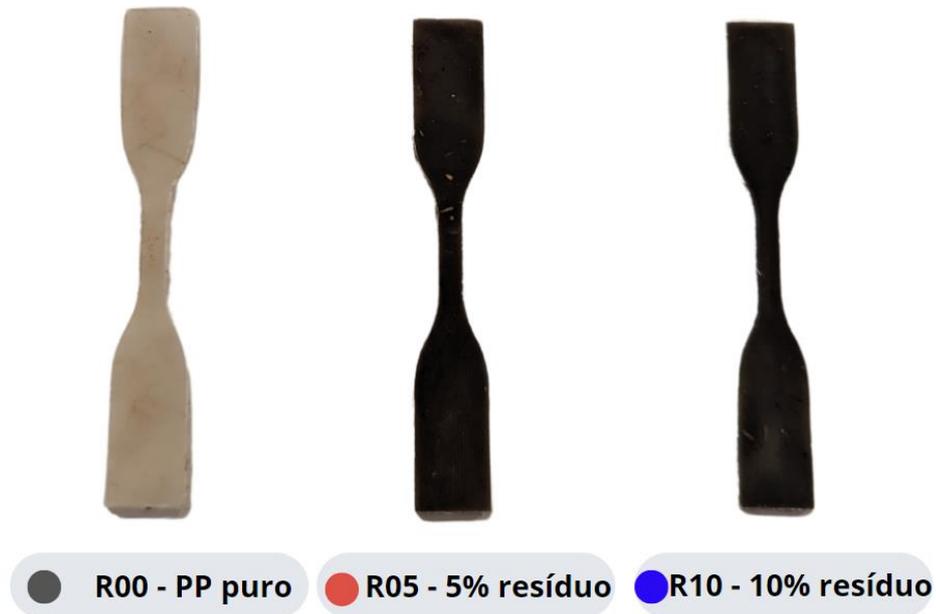


Os resultados apresentados na Figura 26 mostram que os grupamentos presentes no Resíduo Fluff e do polímero comercial, PP, são similares, visto que, como já discutido anteriormente, na composição do Fluff existem muitos grupamentos do tipo C-H, característicos de poliolefinas. É possível também observar a presença de um pico em torno de 1700 cm^{-1} , característico de grupamentos C=O, presentes no Fluff, sinalizando a incorporação do resíduo ao PP comercial.

4.3.5 Comportamento mecânico

Os corpos de prova moldados e prensados do Tipo V, segundo norma ASTM D638 (Figura 27), foram submetidos ao ensaio de tração.

Figura 27 – Corpos de prova dos compósitos moldados e prensados em formato gravata borboleta.



Os resultados para o ensaio de tração são apresentados na Tabela 7, onde o módulo de Young está associado à rigidez do material, representando sua capacidade de resistir à deformação elástica sob tensão.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de tração para os compósitos.

Compósito	Módulo de Young (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Deformação na ruptura (%)
R00 (PP)	1082 ± 213	19,85± 1,63	14,69 ± 3,66
R05 (PP + 5%)	1058 ± 227	18,96 ± 2,86	11,43 ± 2,65
R10 (PP + 10%)	1087 ± 233	20,63 ± 1,28	15,29 ± 4,17

Observa-se na Tabela 7 que o módulo de Young dos dois compósitos permaneceu próximos ao do PP puro e a deformação a ruptura para o R05 (PP+5% Fluff) apresentou uma pequena redução, que pode ser desconsiderada, tendo em vista os erros experimentais da análise. Isso sugere que a rigidez do polipropileno não foi significativamente alterada com a adição do resíduo. Portanto, os compósitos

mantiveram uma rigidez comparável à do PP comercial, indicando uma preservação das propriedades relacionadas à integridade mecânica do polímero puro.

É importante ressaltar que a proposta do trabalho é a incorporação de um resíduo constituído por uma mistura de vários componentes, inclusive, materiais elastoméricos, e que, até seria esperado, um decréscimo pronunciado da rigidez do compósito final em comparação com o PP comercial. Entretanto, isso não foi observado; ao contrário, as propriedades mecânicas analisadas foram preservadas (resistência à tração), o que sinaliza uma vantagem no uso do resíduo siderúrgico para a produção da madeira plástica, visando o setor da construção civil.

4.4 Cálculo de gases de efeito estufa (GEE) evitados com a aplicação

Nos dois cenários propostos, utilizando a Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil – Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), observa-se que as emissões de gases de efeito estufa provenientes da disposição de 20.000 toneladas dos resíduos siderúrgicos em aterros sanitários são significativamente altas. No Cenário 1, que representa a destinação dos resíduos em aterros sanitários sem aproveitamento de gases, as emissões totalizam 19.054 toneladas de CO_{2eq} por ano. Enquanto no Cenário 2, onde os resíduos são direcionados para aterros sanitários com captação de gases e aproveitamento para geração de energia, registra-se uma redução notável nas emissões, totalizando 10.617 toneladas de CO_{2eq} por ano (Tabela 8).

Tabela 8 – Cálculo de toneladas de CO₂ equivalente emitidas pela disposição dos resíduos Fluff em aterros, no período de 1 ano, para dois cenários propostos.

Cenários	Emissões de CO_{2eq} (ton/ano)
Cenário 1	19.054
Cenário 2	10.617

Nesse contexto, a incorporação dos resíduos em materiais de construção civil à base de madeira plástica surge como uma estratégia eficaz para reduzir significativamente essas emissões e promover práticas mais sustentáveis no gerenciamento de resíduos.

Calculando o quanto seria necessário em árvores, para absorver a quantidade de CO₂ emitida pelo resíduo em aterro no período de 1 ano, segundo dados do (IPEA, 2007), 3 toneladas de CO₂ podem ser neutralizadas pelo plantio de 5 árvores em média, pois a quantidade de carbono absorvido varia segundo a espécie, localização, tipo de solo e clima. Portanto, fazendo um cálculo simples à base de regra de três, para reduzir as 19.054 toneladas CO₂eq para o período de um ano, para o cenário 2, seriam necessárias em torno de 31 mil árvores. Já para o cenário 1, seriam necessárias 17 mil árvores para absorver o equivalente a 10.617 toneladas CO₂eq correspondente à emissão do período de um ano do resíduo em aterro.

Pensando em compensação ambiental, para reflorestar o equivalente a emissão de CO₂ do resíduo em aterro no período de um ano, seriam necessárias para o cenário 1, o reflorestamento de uma área equivalente a 19 hectares, enquanto no cenário 2, seriam 10 hectares de área. Estimando a equivalência em campos de futebol, que possuem cerca de 1,08 hectares, seria necessário o equivalente a 17 campos de futebol para o cenário 1 e 9 campos de futebol, para o cenário 2 (Figuras 28 e 29).

Figura 28 – área equivalente, em número de campos de futebol, para plantio de árvores para absorção da quantidade de CO₂ emitido pelo resíduo disposto em aterro no período de um ano (Cenário 1).



Figura 29 – Área equivalente, em número de campos de futebol, para plantio de árvores para absorção da quantidade de CO2 emitido pelo resíduo disposto em aterro no período de um ano (Cenário 2).



Os resultados observados, mais uma vez, sinalizam a vantagem do uso do resíduo siderúrgico na produção de novos materiais, como por exemplo, a madeira plástica para uso no setor da construção civil.

4.5 Análise SWOT

Para avaliar a viabilidade do produto obtido, elaborou-se uma análise SWOT, onde foram consideradas as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças da produção da madeira plástica utilizando os resíduos do Shredder (Figura 30). Essa abordagem permitiu identificar os pontos positivos e negativos do produto, bem como as possíveis oportunidades e ameaças. As forças e fraquezas geralmente referem-se ao produto em si, enquanto as oportunidades e ameaças são relacionadas ao ambiente externo.

Figura 30 – Matriz SWOT com forças, oportunidades, fraquezas e ameaças para o produto.



A seguir serão apresentados os pontos levantados na matriz, as justificativas e discussão.

4.5.1 Forças

4.5.1.1 Sustentabilidade

O produto oferece uma série de benefícios em termos de sustentabilidade. Além de contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, a utilização de resíduos na produção da madeira plástica também reduz a demanda por matérias-primas virgens, alinhando-se aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU, de números 9, 11, 12 e 13 (Figura 31).

- Objetivo 9: Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável, e fomentar a inovação. Isso inclui fortalecer a pesquisa científica e melhorar as capacidades tecnológicas em todos os países, incentivando a inovação e aumentando os investimentos em pesquisa e desenvolvimento.
- Objetivo 11: Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. Uma meta importante é reduzir o impacto ambiental das cidades, incluindo a gestão adequada de resíduos, até 2030.

- Objetivo 12: Assegurar padrões de produção e consumo sustentáveis. Isso envolve reduzir significativamente a geração de resíduos por meio de medidas como prevenção, redução, reciclagem e reuso.
- Objetivo 13: Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos. Isso inclui a necessidade de melhorar a educação, aumentar a conscientização e reforçar as capacidades humanas e institucionais relacionadas à mitigação, adaptação e redução dos impactos das mudanças climáticas (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU), 2024).

Figura 31 – Os ODS que se alinham com o aproveitamento do resíduo na produção da madeira plástica.



Adaptado. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (2024).

Integrar a sustentabilidade ao marketing do produto pode trazer resultados positivos e consolidar a imagem da marca. Em um cenário competitivo, o marketing surge como um fator determinante, à medida que as empresas se esforçam por inovações contínuas e adaptações contextuais para atender às demandas dos consumidores contemporâneos. Estes, cada vez mais conscientes do impacto ambiental de seus hábitos de consumo, tendem a priorizar marcas comprometidas com práticas sustentáveis (Sainz, 2023).

4.5.1.2 Durabilidade e resistência

Em termos de resistência mecânica, percebe-se através dos ensaios de tração que o material não perdeu suas características com a adição do resíduo. Além disso, o plástico, no lugar da madeira convencional, pode trazer mais durabilidade. O plástico é resistente, não requer manutenção regular, não é suscetível a danos causados por cupins e é menos afetado pela exposição às intempéries, como chuva e umidade, em comparação com a madeira convencional (ABIPLAST, 2022). Essas características

adicionais tornam o plástico uma escolha atraente para aplicações que demandam durabilidade e resistência ao longo do tempo.

Outro fator positivo é a padronização das peças adquiridas, diferente da madeira natural, que pode conter nós, fendas, abaulamento, arqueamento e empenamento, que podem comprometer sua qualidade e resistência (CORDEIRO; SILVA; SOARES, 2017).

4.5.1.3 Custo competitivo

Constata-se que os itens ofertados se concentram, principalmente, em materiais destinados à área externa, evidenciando a versatilidade desse recurso sustentável. Itens como réguas para decks, bancos de jardim, ripas de madeira e pergolados emergiram como os produtos de maior saída. Essa observação indica uma preferência do mercado por soluções duráveis e esteticamente atraentes, orientadas para aplicações em ambientes ao ar livre, reforçando a posição da madeira plástica como uma escolha proeminente para projetos que valorizam a sustentabilidade e resistência.

Tabela 9 – Materiais de madeira plástica comercializados e seus valores.

Item	Tamanho	Finalidade	Preço em 2024 (R\$)	Unidade de Medida
Ripa	15x290cm	Deck	R\$107,34	Unidade
Ripa	14,5x240cm	Deck	R\$ 119,90	Unidade
Banco	200cm	Banco de Jardim	R\$ 1.305,16	Unidade
Ripa	10cm x 2cm x 3m	Deck	R\$ 104,86	Unidade
Ripa	30x30 cm 250cm x	Deck	R\$ 180,00	10 unidades
Pergolado	300cm	Pergolado	R\$ 4.219,90	Unidade

Dado que o produto pode preservar sua matriz polimérica e incorporar até 10% de resíduos, substituindo parte do polímero, sem a necessidade de alterações no maquinário existente - uma vez que os resíduos podem ser introduzidos na extrusora

junto com a matriz polimérica - não há aumento no custo do produto. Uma oportunidade potencial é que o fabricante explore negociações comerciais com o provedor dos resíduos, buscando vantagens econômicas. A substituição da madeira, comumente utilizada como carga no compósito polimérico, pelo resíduo, pode resultar em uma redução nos custos de aquisição de matéria-prima para o fabricante. O produto pode ser vendido ao mesmo preço de mercado da madeira plástica, ou com valor menor, ganhando em competitividade.

4.5.1.4 Parcerias estratégicas

A possibilidade de estabelecer parcerias estratégicas entre o fabricante da madeira plástica e a indústria geradora do resíduo siderúrgico é uma oportunidade. Essas parcerias podem ser mutuamente benéficas, com o fabricante obtendo matéria-prima sem custo direto, enquanto a indústria geradora reduz seus custos de destinação do resíduo para aterros. Essa colaboração pode fortalecer as cadeias de suprimentos e promover práticas sustentáveis de gestão de resíduos.

Além disso, o fabricante que optar pelo uso do resíduo, pode atrelar o apelo ambiental ao marketing do seu produto.

4.5.2 Fraquezas

4.5.2.1 Resistência do Mercado à Utilização de Resíduos

Uma das fraquezas identificadas reside na relutância do mercado em adotar produtos derivados de resíduos, especialmente quando se espera uma certa durabilidade. O consumidor está habituado a materiais tradicionais, considerados duráveis e de qualidade ao longo dos anos. Portanto, substituir um material estabelecido por um novo produto à base de resíduos pode enfrentar desafios em termos de aceitação.

Além da resistência do consumidor, caso o resíduo tente ser oferecido para os próprios fabricantes de madeira plástica, eles podem haver relutância em adicionar o resíduo ao material devido à falta de familiaridade com essa prática e à ausência de exemplos de outros comerciantes que a adotaram.

4.5.2.2 Baixa Densidade dos Resíduos

A baixa densidade dos resíduos representa uma fraqueza para o desenvolvimento em questão. Devido ao alto volume e baixa densidade dos resíduos, o processo de mistura dos materiais para a entrada na extrusora é dificultado, como relatado acima. Além disso, a questão da densidade afeta diretamente o transporte dos resíduos, especialmente considerando que no Brasil o modal rodoviário é predominante e o resíduo apresenta um alto volume e materiais com baixa densidade e alto volume tendem a encarecer o transporte (MOREIRA; SOUZA, 2024).

4.5.2.3 Necessidade de beneficiamento

Uma limitação no uso de resíduos para a produção de madeira plástica é a necessidade de beneficiamento. Além do fabricante e do gerador de resíduos, é imprescindível envolver um terceiro para tratar adequadamente os resíduos, tornando-os aptos para serem utilizados como matéria-prima. Esse processo de beneficiamento inclui a remoção de metais presentes e a moagem para reduzir e padronizar a granulometria. A padronização da matéria-prima é essencial para evitar variações e a presença de metais, exigindo rigor no processo de beneficiamento.

A heterogeneidade do resíduo, devido a variação de sucatas entrantes no equipamento Shredder também pode ser considerada uma fraqueza, uma vez que é esperado certa padronização quando se trata de matérias primas.

4.5.3 Oportunidades

4.5.3.1 Legislações para o uso de madeira convencional

As legislações para o uso da madeira convencional podem variar de acordo com o país e até mesmo dentro de regiões específicas de um mesmo país. No entanto, há várias tendências globais e regulamentações específicas que podem influenciar a utilização da madeira convencional e, por consequência, abrir oportunidades para alternativas como a madeira plástica. Muitos países têm implementado regulamentações ambientais rigorosas para proteger as florestas naturais e promover práticas sustentáveis de manejo florestal. Isso inclui restrições sobre a exploração de determinadas espécies de madeira e a aplicação de certificações que atestam a origem legal e sustentável da madeira. Há uma crescente preocupação global com a sustentabilidade dos recursos naturais, incluindo a madeira. As organizações e

governos estão cada vez mais incentivando o uso de materiais alternativos que não dependem da exploração excessiva de florestas e que possuem menor impacto ambiental. Em muitos lugares, o uso de certas espécies de madeira está sujeito a restrições devido à exploração, risco de extinção ou impactos ambientais negativos associados à sua colheita. Em setores como a construção civil e de móveis, existem normas e regulamentações que estabelecem requisitos de qualidade e desempenho para os materiais utilizados. Essas normas podem influenciar as escolhas de materiais e promover a adoção de alternativas como a madeira plástica, que pode atender ou superar esses padrões (VIDAL et al., 2015).

4.5.3.2 Redução de custos

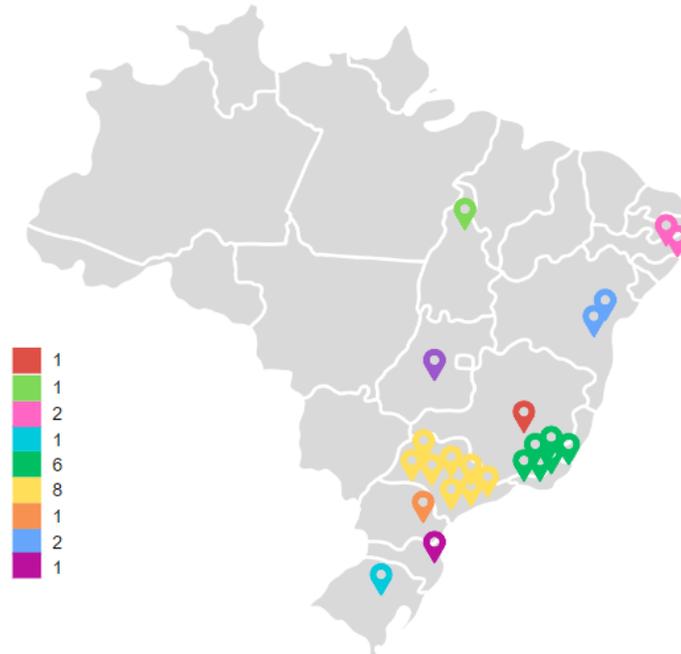
A redução de custos para ambas as partes, como resultado das parcerias mencionadas, é uma oportunidade adicional. A indústria geradora do resíduo pode economizar nos custos de destinação e transporte para aterros, enquanto o fabricante da madeira plástica pode reduzir os custos de aquisição de matéria-prima. Essa redução de custos pode aumentar a competitividade no mercado e melhorar a viabilidade econômica da produção de madeira plástica.

4.5.3.3 Mercado de madeira plástica presente em vários estados do Brasil

Para compreender a distribuição e a presença do mercado de comercialização e distribuição de madeira plástica no território brasileiro, foi realizada uma busca utilizando o Google Maps, focando em comerciantes e fabricantes de madeira plástica. Os resultados revelaram uma presença significativa em diversos estados do país, com um total de 25 comerciantes e fabricantes identificados em 10 diferentes estados (Figura 32).

Figura 32 – Fabricantes e comerciantes de madeira plástica no Brasil, por região, obtidos através do buscador Google Maps.

NÚMERO DE FABRICANTES/DISTRIBUIDORES DE MADEIRA PLÁSTICA POR REGIÃO DO BRASIL



O estado do Rio de Janeiro desponta como um dos principais centros comerciais de madeira plástica no Brasil. Com 7 comerciantes e fabricantes identificados, destacam-se empresas como RT Comércio de Madeira Plástica, EcoPlace Decks Ecológicos, Super Deck, entre outras. A concentração expressiva nesse estado sugere uma demanda robusta, possivelmente influenciada por fatores como a necessidade de durabilidade dos materiais devido à exposição à maresia, bem como uma elevada procura por decks e materiais externos destinados a áreas de piscina, pousadas e hotéis situados nas proximidades do litoral.

No estado de São Paulo foram encontrados 8 comerciantes e fabricantes, como StarDeck Madeira Plástica, Madeira Plástica SP, 3RSustentável Madeira Plástica, entre outros. Além do Rio de Janeiro e São Paulo, identificou-se a presença de empresas em estados como Minas Gerais, Goiás, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Bahia, Pernambuco e Tocantins. Esse mapeamento revela uma distribuição geográfica abrangente, indicando uma crescente aceitação e demanda por produtos de madeira plástica em diferentes regiões do país.

Os resultados desta análise indicam que o mercado de madeira plástica no Brasil está em expansão, com uma presença notável em diversos estados. A diversificação

geográfica sugere uma aceitação generalizada dessa alternativa sustentável em diferentes contextos.

À medida que a conscientização ambiental continua a crescer e as regulamentações sustentáveis se fortalecem, é esperado que o mercado de madeira plástica no Brasil prospere ainda mais. Empresas que adotam práticas sustentáveis e oferecem soluções inovadoras têm o potencial de liderar esse setor dinâmico, contribuindo para um futuro mais sustentável no país.

4.5.4 Ameaças

4.5.4.1 Logística

Um desafio externo que pode impactar a aplicação da madeira plástica é a logística, especialmente considerando o modal rodoviário (MOREIRA; SOUZA, 2024). O transporte dos resíduos do local de geração até o local de produção da madeira plástica pode aumentar os custos e representar um risco para o negócio, sujeito a fatores externos incontroláveis, como greves, acidentes, bloqueios de estradas e aumentos nos preços dos combustíveis, os quais podem impactar diretamente o produto final. Por isso, é estratégico que os produtores de madeira plástica estejam localizados próximos aos pontos de geração de resíduos.

4.5.4.2 Competitividade com materiais convencionais

Uma ameaça surge da disponibilidade de resíduos madeireiros para serem incorporados na matriz e na produção da madeira plástica. Considerando que resíduos como serragem e pó de madeira são frequentemente utilizados em compósitos, pode haver uma preferência por parte dos produtores de madeira plástica. Além disso, devido à natureza dos resíduos e às possíveis vantagens econômicas associadas, sua utilização pode competir com o resíduo Fluff.

5 CONCLUSÕES

A metodologia de coleta de amostras mostrou-se crucial para obter uma representação precisa do resíduo, dada sua heterogeneidade. A análise gravimétrica revelou que o resíduo usado no presente estudo é composto principalmente por plásticos rígidos (28%); plástico flexível (14%); espumas (7%); isopor (1%); tecidos (9%); metais (13%); papelão/papel (3%); orgânicos (7%) e borracha (15%), com uma fração de difícil separação composta por pequenos fragmentos não identificados e solo (5%). As análises termogravimétricas (TGA) e de FTIR confirmaram a presença de uma variedade de compostos orgânicos e inorgânicos.

Durante o processo de moagem, observou-se a formação de grumos devido à fragmentação das espumas em pedaços menores. Algumas borrachas não foram fragmentadas pelo moinho, permanecendo intactas. Na etapa de extrusão, notou-se que a mistura R05, com 5% de resíduo, resultou em um filamento mais uniforme e rígido em comparação com R10, que continha 10% de resíduo. Na granulação dos filamentos, R05 apresentou pellets de coloração uniforme, enquanto R10 exibiu uma coloração menos homogênea, sugerindo uma dispersão desigual do resíduo na matriz de PP. A coloração das placas foi naturalmente marrom, assemelhando-se à coloração da madeira plástica convencional.

As análises de degradação térmica (TGA) indicaram que a incorporação do resíduo não afetou negativamente a estabilidade dos materiais. A calorimetria diferencial de varredura (DSC) mostrou uma ligeira elevação das temperaturas de fusão nos compósitos, sugerindo uma interação entre as fases Resíduo Fluff e a matriz de PP.

A análise FTIR revelou a incorporação do Fluff na matriz de PP. O índice de fluidez (MFI) diminuiu com a adição do resíduo, devido à restrição do escoamento da massa fundida na presença do Fluff. Os ensaios de tração indicaram que a resistência a tração do PP comercial foi mantida.

O cálculo das emissões de gases de efeito estufa, para os dois cenários propostos, indicaram que reaproveitar o resíduo como matéria-prima ao invés de serem enviados para a disposição final em aterros, passa a ser uma importante estratégia para a descarbonização nas Indústrias Siderúrgicas. No Cenário 1, as emissões totalizaram 19 mil toneladas de CO₂eq por ano, enquanto no Cenário 2, com aproveitamento de

gases, registraram-se 10 mil toneladas de CO₂eq por ano, para a disposição final de 20 mil toneladas de resíduos, anualmente.

A análise SWOT destacou diversas forças do produto, incluindo sua sustentabilidade, durabilidade e resistência a tração, custo competitivo e parcerias estratégicas. No entanto, também identificou ameaças, como a aceitação do mercado em relação ao uso de resíduos e a competição com produtos convencionais, como a madeira. Quanto às fraquezas, foram apontadas questões relacionadas à logística, baixa densidade, variabilidade na composição do Resíduo Fluff e a necessidade de beneficiamento para a remoção dos metais e moagem. Por outro lado, foram identificadas diversas oportunidades, como a existência de legislações favoráveis ao uso da madeira convencional, a redução de custos na produção da madeira plástica e na destinação final do resíduo para aterros. Além disso, o mercado da madeira plástica demonstrou não estar restrito a apenas um estado do Brasil, apresentando presença em diversos estados.

Com os resultados obtidos, conclui-se que o reaproveitamento do resíduo Fluff em matrizes poliméricas, para a produção da madeira plástica é viável e pode ser uma ferramenta importante para apoiar as indústrias siderúrgicas no processo de descarbonização de suas atividades.

6 TRABALHOS FUTUROS

A seguir serão propostos alguns estudos para darem continuidade à presente pesquisa:

- Utilização do PP-PCR ou outro polímeros pós-consumo, aumentando a sustentabilidade do produto;
- A utilização de uma extrusora de escala industrial, para testes com maior percentual de Fluff;
- Avaliar a injeção do compósito, ao invés da compressão e repetir os ensaios de tração, adicionando ensaio de impacto;
- Apesar do produto proposto ser durável e fabricado para durar muitos anos, é interessante avaliar a reciclabilidade da madeira plástica contendo Fluff;
- Avaliar diferentes amostragens de resíduos provenientes da siderúrgica e fazer um estudo visando à padronização de uma especificação para o Fluff para uma dada aplicação.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST. As indústrias de transformação e reciclagem de plástico no Brasil. p. 61, 2022.

ANDRÉ TRIGUEIRO; RODRIGO BOCARDI. Madeira plástica evita derrubada de árvores para fabricar móveis. **Jornal da Globo**, 2012.

ARCELORMITTAL. **Catálogo de Coprodutos**. , 2022.

ARCELORMITTAL BRASIL. Relatório de Sustentabilidade ArcelorMittal Brasil. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/170/nbr10004-residuos-solidos-classificacao>

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos. **LEI Nº 12.305**, 2010.

BRASIL, I. A. **Indicadores de Sustentabilidade**. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/indicadores-de-sustentabilidade/>>.

Bispo, S.J.L.; Freire Júnior, R.C.S.; Aquino, E.M.F. de Mechanical Properties Analysis of Polypropylene Biocomposites Reinforced with Curaua Fiber. *Mater. Res.* 2015, 18, 833–837. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.022815>.

BRASKEM. Glossário de Termos Aplicados a Polímeros. **Tecnologia do PVC - 3ª Edição**, p. 496–509, 2002.

CAETANO, J. A. Reaproveitamento do resíduo Terra da Shredder através da técnica de solidificação/estabilização em matrizes de cimento Portland para aplicação na construção civil. 2017.

CARNIETTO, M. Análise De Mercado De Wood-Plastic Composite (Wpc) No Brasil. **REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL UNESP**, p. 1–91, 2020.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética e competitividade. **BNDES setorial**, v. 41, p. 181–236, 2015.

CATTO, A. L. et al. Wood plastic composites weathering: Effects of compatibilization on biodegradation in soil and fungal decay. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 109, p. 11–22, abr. 2016.

CHINDAPRASIRT, P. et al. Properties of wood flour/expanded polystyrene waste composites modified with diammonium phosphate flame retardant. **Polymer Composites**, v. 36, n. 4, p. 604–612, abr. 2015.

CORDEIRO JÚNIOR, C. R.; SILVA, W. C. R.; SOARES, P. DE T. M. L. USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL Carlos. **Projectus**, p. 79–93, 2017.
CSN. **Relato Integrado CSN Brasil 2022**. , 2022.

da Silva, A.L.N.; Bertolino, L.C.; Nasser, R.O.; da Costa, L.S.; de Melo, A.A.; Marquezine, L.P.S.; de Silva, A.H.M.d.F.T.; Alves, V.O.; Nascimento, C.R.V. Aplicação de um planejamento fatorial para a avaliação das propriedades mecânicas, térmicas, morfológicas e de escoamento de compósitos à base de PEAD e CaCO₃. *Rev. Mater.* 2013, 18, 1382–1394. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762013000300006>.

DANIELLE CRISTINA BATISTA. Classificação e caracterização dos resíduos do beneficiamento da sucata de ferro e aço utilizada no processo siderúrgico para identificação de viabilidade de aplicações. 2014.

DE, C. S. M.; BARATA, T. Q. F.; SOUSA, F. DE O. L. Polímeros: Principais tipos, características e especificações comerciais, processos de transformação e aplicações. **Universidade de São Paulo**, p. 32, 2020.

DJAIR ROBERTO FERNANDES, D. Uma Visão Sobre a Análise da Matriz SWOT como Ferramenta para Elaboração da Estratégia A Look into the SWOT Analysis as a tool of Strategic Planning. **Juríd. Empres**, n. 2, p. 57–68, 2012.

DOS REIS, C. E. Estudo da eficácia da amoxicilina incorporada em membranas de látex. p. 66, 2015.

ELMUSHYAKHI, A. Parametric characterization of nano-hybrid wood polymer composites using ANOVA and regression analysis. **Structures**, v. 29, p. 652–662, fev. 2021.

ELSHEIKH, A. H. et al. Recent progresses in wood-plastic composites: Pre-processing treatments, manufacturing techniques, recyclability and eco-friendly assessment. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 8, p. 100450, jun. 2022.

EMBRAPA. **Estratégia de recuperação: Plantio em Área Total**. , 2015. Disponível em: [https://www.embrapa.br/codigo-florestal/plantio-por-mudas#:~:text=Os espaçamentos mais usuais são,\(1.667 plantas%2Fha\).](https://www.embrapa.br/codigo-florestal/plantio-por-mudas#:~:text=Os espaçamentos mais usuais são,(1.667 plantas%2Fha).)

FERNANDEZ-MELCHOR. Compósitos plásticos como materiais de construção sustentáveis: uma exploração térmica e mecânica. **Construção e Materiais de Construção**, v. 344, 2022.

GARDNER, D. J.; HAN, Y.; WANG, L. Wood–Plastic Composite Technology. **Current Forestry Reports**, v. 1, n. 3, p. 139–150, 4 set. 2015.

GERDAU. Relatório Anual Gerdau Brasil 2022. 2022.

GIEGRICH, J. Manual Da Calculadora De Emissões De GEE Para Resíduos. v. 1, p. 134, 2021.

GOMES, R. M. Avaliação do ciclo de vida: um estudo de caso sobre compósito à base de plástico reciclável e endocarpo de tucumã. **REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL UEA**, 2021.

HENRIQUE BRASILEIRO VERAS LIMA. ANÁLISE ENERGÉTICA DO RESÍDUO DA SUCATA TIPO FLUFF DE UMA PLANTA SHREDDER NO RECIFE. **Universidade Federal do Pernambuco**, v. 1, n. 1, p. 77, 2019.

IBAMA. **Geração de Resíduos no Brasil**. , 2022. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjQ0NWYjUtOWRmYS00M2ZjLWEzY2YtMjc0NTA3NDI3NGI5liwidCI6IjZhZTNmNWU3LTU0MTktNDJhNy04MDc1LThjMTQ5MGM3MmlyNSJ9>

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade**. , 2021. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/index.html>

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatísticas da Siderurgia**. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/>.

IPCC. Synthesis report. Climate change. **European University Institute**, n. 2, p. 2–5, 2023.

JOHN, A. LIBÓRIO. **Melhorias no desempenho dos injetores supersônicos em operação em um forno elétrico a arco**. , 2009. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/18597>

JUBINVILLE, D. et al. Thermo-mechanical recycling of polypropylene for the facile and scalable fabrication of highly loaded wood plastic composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 219, p. 108873, ago. 2021.

JULIANA DIAS DE CASTRO FIGUEIREDO. Aplicação de uma fração do resíduo do shredder na fabricação de blocos cerâmicos estruturais. 2016.

LANDMARK, M. E. The newell shredder. n. September, 1994.

LETÍCIA SIMÕES RIBEIRO; GEANE CRISTINA FAYER; CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS DURANTE O PROCESSO DE RECICLAGEM DA SUCATA FERROSA, EM SIDERÚRGICAS DO BRASIL. **12 Forum Internacional de Resíduos Sólidos**, v. 1, p. 1–10, 2021.

MARTINEZ LOPEZ, Y. et al. Production of wood-plastic composites using cedrela odorata sawdust waste and recycled thermoplastics mixture from post-consumer products - A sustainable approach for cleaner production in Cuba. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 118723, jan. 2020.

MARTINS, E. et al. Madeira plástica. **Resposta Técnica Brasil**, 2022.

MARTINS, S. et al. Use of manufacture residue of fluidized-bed catalyst-cracking catalyzers as flame retardant in recycled high density polyethylene. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 2, p. 2386–2394, abr. 2019.

MAXIQUIM. **MONITORAMENTO DOS ÍNDICES DE RECICLAGEM MECÂNICA DE PLÁSTICOS PÓS-CONSUMO NO BRASIL.** , 2023.

MOREIRA, H.; SOUZA, L. DE. Heurística para o problema de alocação de cargas de produtos siderúrgicos acabados via modal rodoviário Igor Barros Mairinck Heurística para o problema de alocação de cargas de produtos siderúrgicos acabados via modal rodoviário. 2024.

MÜZEL, S. D. ESTUDO DA USINAGEM DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO MADEIRA E MADEIRA PLÁSTICA. **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**, 2017.

NNEKA ANOSIKE-FRANCIS, E. et al. Physical-Mechanical properties of wood based composite reinforced with recycled polypropylene and cowpea (*Vigna unguiculata* Walp.) husk. **Cleaner Materials**, v. 5, p. 100101, set. 2022.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://seeg.eco.br/>>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil.** 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br>

OWEN, M. M. et al. Thermal and mechanical characterization of composite materials from industrial plastic wastes and recycled nylon fibers for floor paving tiles application. **Waste Management**, v. 166, p. 25–34, jul. 2023.

PEDRO CUNHA ALVES. **ANÁLISE DO RENDIMENTO METÁLICO DO FEA DEVIDO AO USO DO SISTEMA DE DESPOEIRAMENTO DO SHREDDER**. 2016.

PESQUISA AÇÃO SOCIAL DAS EMPRESAS - IPEA. **Carbono zero é meta de empresas do Brasil para 2007**. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/acaosocial/article7597.html?id_article=320#:~:text=3 toneladas de CO2 podem, absorvido varia segundo a espécie.

PHELIPE PEREIRA MARINHO. Phelipe Pereira Marinho Avaliação e caracterização de microplástico em águas superficiais costeiras entre a Baía de Guanabara e Ilhas Cagarras, Rio de Janeiro. p. 1–155, 2021.

PICPLAST; ABIPLAST; BRASKEM. **Movimento Plástico Transforma**. , 2017. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=TWdUmQkScRY&t=6s&ab_channel=MovimentoPlásticoTransforma

PIPATTI, R. et al. Chapter 2: Waste generation and composition and management data. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, v. 5, n. 2, p. 23, 2006.

RECKZIEGEL, V. NEDEL. **Caracterização para o aproveitamento do resíduo de um triturador de sucata em uma usina siderúrgica**. , 2012.

REZENDE, M.C.; COSTA, M.L.; BOTELHO, E. C. **Compósitos Estruturais: Tecnologia e Prática**. **Artliber: São Paulo, Brazil, 2011**., v. 1st ed, [s.d.].

Ramos, S.M.L.S.; Carvalho, L.H.D.; Spieth, E.; Rivadula, R.S.M. Efeitos da estabilização do Polipropileno nas propriedades térmicas , mecânicas e termomecânicas de compósitos de Propileno/Atapulgita. *Polímeros Ciência e Tecnol.* 1993, 3, 26–31.

ROSA, R. V. D. S. Universidade Federal De Universidade Federal De. **Dissertação**, v. 60, n. 16, p. 1–3, 2014.

Rosário, F.; Pachekoski, W.M.; Silveira, A.P.J.; Santos, S.F.d.; Júnior, H.S.; Casarin, S.A. Resíduos de sisal como reforço em compósitos de polipropileno virgem e reciclado. *Polímeros* 2011, 21, 90–97. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282011005000021>.

SAINZ, L. O papel do marketing ecológico no propósito das marcas e na intenção de compra dos clientes. 2023.

SARAH DAVID MÜZEL. ESTUDO DA USINAGEM DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO MADEIRA E MADEIRA PLÁSTICA. **REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL UNESP**, 2017.

SINGH, M. K. et al. Effect of pine cone filler particle size and treatment on the performance of recycled thermoplastics reinforced wood composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 7358–7363, 2022.

SIQUEIRA, C. S. B. Caracterização e aplicação do resíduo de Shredder como absorvedor acústico. **Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto**, 2020.

TANG, W. et al. Rheological behavior and mechanical properties of ultra-high-filled wood fiber/polypropylene composites using waste wood sawdust and recycled polypropylene as raw materials. **Construction and Building Materials**, v. 351, p. 128977, out. 2022.

VALIM, A. et al. O Modelo Swot. **Administradores.Com.Br**, p. 1–7, 2010.

VIDAL, J. M. et al. PRESERVAÇÃO DE MADEIRAS NO BRASIL: HISTÓRICO, CENÁRIO ATUAL E TENDÊNCIAS. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1, p. 257–271, 2015.

WANG, C.; MEI, J.; ZHANG, L. High-added-value biomass-derived composites by chemically coupling post-consumer plastics with agricultural and forestry wastes. **Journal of Cleaner Production**, v. 284, p. 124768, fev. 2021.

WANG, Y. et al. High-performance poplar-polyethylene laminates based on microwave-assisted acetic acid pretreatment process with potential application in construction. **Journal of Building Engineering**, v. 72, p. 106731, ago. 2023.

WEF. **Global Risk Report 2024**. [s.l: s.n.]. v. 2

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Steel - The Permanent Material in the Circular Economy**. Disponível em: <<https://worldsteel.org/publications/bookshop/steel-permanent-circular-economy/>>.

XIAO, R. et al. Visual design of high-density polyethylene into wood plastic composite with multiple desirable features: A promising strategy for plastic waste valorization. **Journal of Building Engineering**, v. 63, p. 105445, jan. 2023.

ZHOU, H. et al. Recycling end-of-life WPC products into ultra-high-filled, high-performance wood fiber/polyethylene composites: a sustainable strategy for clean and

cyclic processing in the WPC industry. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 18, p. 1–14, maio 2022.

Vijayan, S.K.; Kibria, M.A.; Uddin, M.H.; Bhattacharya, S. Pretreatment of automotive shredder residues, their chemical characterisation, and pyrolysis kinetics. *Sustainability* 2021, 13, 10549. <https://doi.org/10.3390/su131910549>.