



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia

Pedro Henrique Alves Cruz

**DESENVOLVIMENTO DE BLENDAS POLIMÉRICAS A BASE DE RESÍDUOS DA
INDÚSTRIA AUTOMOTIVA: desempenho mecânico e análise da intensidade
energética do processo**

São José dos Campos

2025

Pedro Henrique Alves Cruz

**DESENVOLVIMENTO DE BLENDAS POLIMÉRICAS A BASE DE RESÍDUOS DA
INDÚSTRIA AUTOMOTIVA: desempenho mecânico e análise da intensidade
energética do processo**

Trabalho de graduação apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Unesp.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Yutaka Shiino

São José dos Campos

2025

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2025]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Cruz, Pedro Henrique Alves

Desenvolvimento de blenda polimérica a base de resíduos da indústria automotiva: desempenho mecânico e análise da intensidade energética do processo / Pedro Henrique Alves Cruz. - São José dos Campos : [s.n.], 2025. 56 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Graduação em Engenharia Ambiental - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2025.

Orientador: Marcos Yutaka Shiino.

1. Reciclagem de polímero. 2. PET. 3. PU. 4. Consumo energético. 5. SEC. I. Shiino, Marcos Yutaka, orient. II. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. III. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - UNESP. IV. Universidade Estadual Paulista (UNESP). V. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Achille Bassi e Seção Técnica de Informática, ICMC/USP com adaptações - STATI, STRAUD e DTI do ICT/UNESP.
Renata Aparecida Couto Martins CRB-8/8376

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Yutaka Shiino

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de São José dos Campos
Departamento de Engenharia Ambiental

Prof. Dr. Antonio Carlos Varela Saraiva

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de São José dos Campos
Departamento de Engenharia Ambiental

Eng. MSc. Luiz Gustavo Rodrigues Godoy

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de São José dos Campos
Departamento de Engenharia Ambiental

São José dos Campos, 08/05/2025.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Marcos Yutaka Shiino pelo constante apoio nas etapas do trabalho de graduação e previamente na iniciação científica que serviu de base para o mesmo, uma jornada que se iniciou em 2021 que passou por diversos desafios e culminou neste projeto final, uma honra ter o tido como orientador. Muito obrigado.

Agradeço a todos os professores e funcionários do instituto de Ciência e Tecnologia – ICT UNESP pela dedicação e auxílio ao longo da minha formação profissional durante estes 5 anos de graduação.

A Pró-Reitoria de Pesquisa (PROPe) por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica da Unesp (PIBIC) da Unesp por conceder através do edital Nº 04/2021 uma bolsa para o desenvolvimento da iniciação científica citada anteriormente.

Aos meus amigos Luiz Ferreira, Rodrigo Gomes, Vitor Yuichi, Filipe Leme, Felipe Nascimento, Fellipe Mira e Felipe Makita agradeço pela companhia ao decorrer da graduação, tenho certeza que sem as suas participações a vivencia na faculdade teria sido muito mais difícil.

Por fim agradeço aos meus pais por todo o apoio em toda minha vida, apoio esse que culminou neste momento, sem vocês essa conquista não teria sido possível. Muito obrigado.

RESUMO

ALVES CRUZ, Pedro Henrique. Desenvolvimento de blenda polimérica a base de resíduos da indústria automotiva: desempenho mecânico e análise da intensidade energética do processo. 2025. Trabalho de graduação (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2025.

Com o incremento do uso de materiais poliméricos e seus derivativos na indústria nas últimas décadas surge a necessidade de lidar com os tipos de impactos que a sua produção pode causar ao meio ambiente. Neste cenário, houve um aumento na demanda pelos meios para se contornar os problemas ambientais, um deles sendo a reciclagem de materiais descartados pela indústria. Um dos métodos de reciclagem, que será discutido neste trabalho, é o de desenvolver novos materiais a partir da reciclagem por compressão à quente dos descartes de uma mistura de polímeros e fibras, assim formando uma “blenda” polimérica. A mistura de polímeros consiste de um composto com diferentes características mecânicas e físicas, algo que possibilita sua utilização em diferentes aplicações. Assim, este estudo tem como objetivo descrever, aplicar e avaliar uma metodologia alternativa de reciclagem dos polímeros de polietileno tereftalato (PET), poliuretana (PU) e fibra de vidro que são empregados na indústria automotiva. A avaliação do material desenvolvido contemplou a intensidade energética do processo e as características mecânicas do material obtido ao final da sua aplicação, para então compará-las com processos já consolidados na literatura, como a extrusão, para validar se o aplicado no artigo é viável dentro das comparações realizadas. Os resultados demonstraram que ao buscar-se por uma placa de material mais homogênea que consequentemente apresentará características mecânicas próximas as comparadas na literatura identificou-se que um aumento considerável do consumo energético, aumento esse na proporção de 250 vezes maior que um processo empregado na indústria, isso evidencia que a metodologia desenvolvida no projeto necessitará de adaptações em futuras interações.

Palavras-chave: reciclagem de polímeros; PET; PU; consumo energético; sec.

ABSTRACT

CRUZ ALVES, Pedro Henrique. *Development of a polymeric blend from automotive industry waste: mechanical performance and analysis of the energy intensity of the process.* 2025. Undergraduate thesis (Environmental Engineering Degree) – São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology, São José dos Campos, 2025.

With the increase of the use of polymeric materials and their derivatives within the industry in recent decades, there has arisen a necessity to address the environmental impacts associated with both their utilization and the production processes involved. Within this framework, there has been a growing demand for solutions to mitigate these effects, one of which is the recycling of surplus materials and industrial waste. Among the various recycling methods, this study proposes the development of new materials through the reuse of discarded polymeric and fibrous waste, resulting in the formation of a polymer blend, a composite exhibiting mechanical characteristics distinct from those of the original materials, thereby enabling its application across diverse fields. Accordingly, the objective of this study is to describe, implement, and evaluate a novel methodology for recycling polyethylene terephthalate (PET), polyurethane (PU), and fiberglass polymers commonly employed in the automotive industry. The evaluation encompasses both the energy intensity of the proposed method and the mechanical properties of the material obtained upon completion of the process. These outcomes will then be compared to established processes documented in the literature, such as extrusion, to assess the viability of the methodology within the context of these comparisons. The results demonstrated that, in seeking to produce a more homogeneous material plate, which would consequently exhibit mechanical properties comparable to those reported in the literature, a significant increase in energy consumption was observed, with levels reaching approximately 250 times higher than those of conventional industrial processes. This analysis highlighted that the methodology developed in this project will require adjustments in future iterations to enhance its feasibility and align it with industrial efficiency standards.

Keywords: polymer recycling; PET; PU; energy consumption; sec.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Diagrama processo produção polímeros	11
Figura 2.1: Formula química PET	13
Figura 2.2: Oxidação do p-xileno	15
Figura 2.3: Reação de formação do PET	16
Figura 2.4: Formula química PU.....	17
Figura 2.5: Esquema reação de formação PU	17
Figura 2.6: Esquema extrusora	20
Figura 2.7: IC-RV 74d Máquina de alimentação automática por rolos	21
Figura 2.8: Esquema Circuito Trifásico	23
Figura 2.9: Configuração: a) em Y e b) Delta.....	24
Figura 2.10: Tipos de sequência em sistemas trifásicos.	24
Figura 2.11: Defasagem entre as fases.	25
Figura 2.12: Circuito trifásico em Delta.	26
Figura 2.13: Circuito trifásico em Y.....	26
Figura 2.14: Método um wattímetro.....	28
Figura 2.15: Método 3 Wattímetros.....	28
Figura 3.1: Configuração do material no molde.	31
Figura 3.2: Material descartado do processo fabril.	32
Figura 3.3: Primeiras camadas.....	33
Figura 3.4: Prensado.....	34
Figura 3.5: PET-Branco em forma de fibra.	34
Figura 3.6: Camadas finais de Prensado e PET-C.....	35
Figura 3.7: Disposição do molde com material dentro da prensa.	36
Figura 3.8: Aspecto da blenda ao final do processo.	36
Figura 3.9: Analisador de energia DMI P500R.....	37
Figura 3.10: Fios condutores conectados.....	37
Figura 3.11 - Set up para ensaio de flexão em três pontos.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Consumo energético da produção de fibra de vidro por etapa por autor	18
Tabela 2: Distribuição do consumo energético por tipo de termo moldagem	22
Tabela 3: SEC Termomoldagem	22
Tabela 4: Especificação do material	29
Tabela 5: Gramaturas dos materiais	30
Tabela 6: Dados do teste de Flexão em três pontos	43
Tabela 7: Dados da literatura para a resistência a flexão	44
Tabela 8: Consolidado potencias nos três Ciclos	46
Tabela 9: Valores obtidos a partir das áreas	47
Tabela 10: Valores obtidos a partir das áreas	51
Tabela 11: Valores obtidos a partir das áreas	52
Tabela 12: Valores obtidos a partir das áreas	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PET	Polietileno tereftalato
PU	Poliuretano
FV	Fibra de Vidro
SEC	Specific Energy Consumption
EG	Etileno Glicol
EO	Óxido de etileno
T_g	Temperatura de Transição Vítrea
σ_f	Resistência à flexão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1 Material utilizado.....	13
2.2 Materiais poliméricos.....	13
2.3 Processamento de polímeros.....	19
2.3.1 Processo de injeção.....	19
2.3.2 Processo de termomoldagem.....	20
2.4 Medição de potência em Sistema trifásico para avaliação do consumo energético.....	23
2.4.1 Cálculo da potência em circuitos Trifásicos.....	26
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	29
3.1 Caracterização do material.....	29
3.2 Caracterização e processamento.....	32
3.3 Medição de energia.....	37
3.4 Caracterização mecânica.....	38
3.5 Análise do consumo energético.....	40
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	43
4.1 Características Mecânicas.....	43
4.2 Características Energéticas.....	46
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

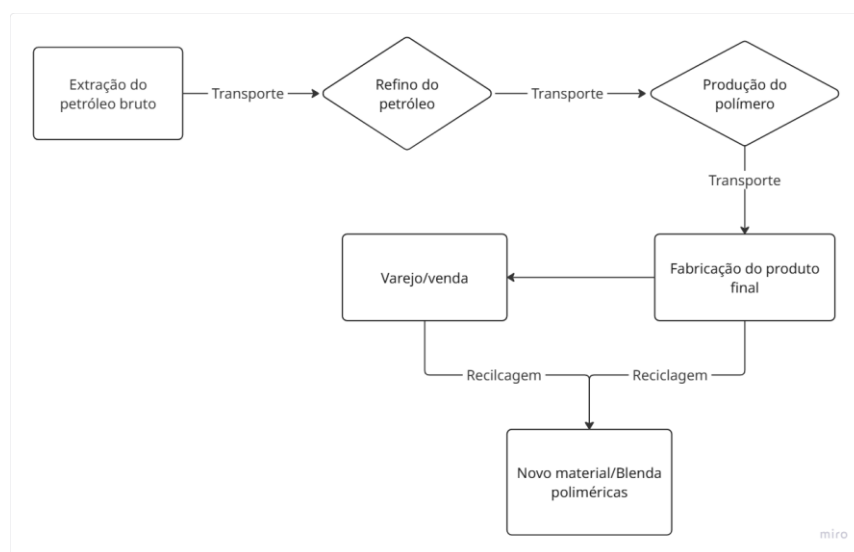
Nas últimas décadas a indústria automotiva vem substituindo partes metálicas e polímeros virgens de seus veículos por “blendas” poliméricas (Pessey et al., 2008) e, desta forma, acarretando em um aumento exponencial no uso dessas misturas de polímeros, isso gerou uma preocupação no viés ambiental dos possíveis impactos que o descarte e a produção desses materiais podem gerar.

Impacto este que se estende desde a extração da matéria prima, produção definitiva dos materiais, o transporte deles e os refinamentos finais empregados.

Uma forma de diminuir tais impactos é por meio da reciclagem de polímeros sendo a formação de “blendas” poliméricas um meio economicamente viável. As blendas poliméricas são caracterizadas pela mistura de dois ou mais polímeros com o intuito de alcançar características físicas ou químicas desejáveis pela indústria, a fim de reduzir gastos em comparação a outros métodos (Silva et al., 2016).

Com isso está indicado na Figura 1.1 o fluxo completo da produção dos polímeros e suas etapas principais, nas quais ocorrem os impactos, e ao final como o processo de reciclagem, a ser detalhado no projeto, diminui o descarte.

Figura 1.1 - Diagrama processo produção polímeros



Fonte: Elaborado pelo autor

Processo esse com atuação direta no combate dos possíveis problemas que o descarte de polímeros pode causar ao meio ambiente, alguns métodos para reutilizar e reciclar o descarte foram desenvolvidos, o mais presente é a reciclagem, através dela é possível recuperar resíduos e atribuir novas aplicações e, assim, evitando o seu descarte ao máximo, pois com esses processos reduz-se a extração e exploração da matéria-prima muitas vezes finitas utilizadas nos processos de fabricação de polímeros (Rudolph, Kiesel e Aumnate, 2020).

O tratamento dessas misturas varia dependendo de suas propriedades físicas e químicas, ao ponto da formação de algumas blendas e polímeros não serem passíveis de um processo de reciclagem físico como a fusão. Este é o caso de polímeros termorrígidos, pois quando expostos ao aquecimento não podem ser remoldados, eles na medida em que a energia térmica é aplicada ocorre o processo de decomposição do material a altas temperaturas, que por fim impossibilita sua reciclagem física por fusão. Já os polímeros termoplásticos quando aquecidos apresentam certa mobilidade macromolecular e começam a apresentar uma diminuição em sua viscosidade, isso permite que eles sejam remoldados, o que garante uma capacidade abrangente de reciclagem (Harper e Petrie, 2003).

Outra questão ambiental além do descarte destes materiais é o consumo energético durante sua fabricação, e neste caso os processos de manufatura de polímeros na indústria são muito intensos do ponto de vista energético. Portanto, é interessante avaliar o consumo energético destes processos para obter estratégias visando a diminuição do impacto em termos intensidade energética, a unidade escolhida para essa avaliação pode ser expressa na razão entre energia (KWh ou kJ) por massa (Kg), resultando em KWh/kg ou kJ/kg.

Para a estratégia mencionada, um comparativo entre o método de manufatura proposto nesta pesquisa para a reciclagem e o processo de moldagem por injeção, amplamente utilizado na indústria, será conduzido. Para injeção, o cálculo de consumo de energia elétrica é realizado a partir da massa que é injetada em que é contabilizada a energia das operações fechando um ciclo e o tempo total. Além disso, o consumo varia em relação ao que está se moldando como por exemplo: tampas de garrafa PET, para-choques de carros e recipientes para resíduos e que inclui a geometria e o tamanho da peça (Elduque et al., 2015). Adicionalmente, será comparada as propriedades mecânicas específicas dos materiais obtidos com as apresentadas na literatura.

Assim o objetivo deste trabalho é analisar o consumo energético da metodologia empregada previamente que, visa gerar uma alternativa aos métodos consolidados na indústria, para então poder analisá-lo seu rendimento com base nas propriedades em flexão.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

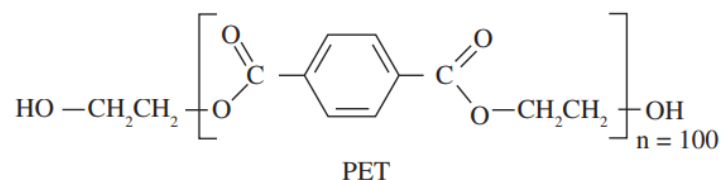
2.1 Material utilizado

Nesta seção serão abordadas as características dos materiais e os processos utilizados na indústria para a produção dos materiais poliméricos, o conteúdo tem como objetivo entender as etapas dos processos que apresentam consumo energético e os possíveis impactos no meio ambiente.

2.2 Materiais poliméricos

Os polímeros utilizados no desenvolvimento desta pesquisa são os resíduos compostos dos materiais: Polietileno tereftalato (PET) e o Poliuretano (PU), estes em maiores volumes, além da FV. Sendo os principais constituintes dos materiais que foram submetidos ao processo de reciclagem, para aprofundar a pesquisa foi necessário compreender como são produzidos na indústria e suas propriedades térmicas sob efeito de pressão e temperatura. Na Figura 2.1 tem-se ilustrado a fórmula química do PET:

Figura 2.1- Fórmula química PET



Fonte: (Romão, Spinacé e Paoli, 2009)

O PET é um polímero semicristalino, e seu ponto de fusão é uma característica crítica que define a transição da fase sólida cristalina para a fase viscosa, seu ponto de fusão geralmente está na faixa de 250°C a 260°C, já a temperatura de transição vítrea do PET, que marca a transição do estado vítreo (frágil) para o estado amorfo (borrachoso), está geralmente em torno de 70°C a 80°C. Acima desta temperatura, o material se torna mais flexível e dúctil, enquanto abaixo dela, ele é mais rígido e quebradiço (Usman e Kunlin, 2024).

As propriedades térmicas dos polímeros são utilizadas como parâmetro para se ter um controle da temperatura aplicada ao molde visando a consolidação do material final.

Sobre a produção, o PET é produzido através da reação química de um ácido, que apresente duas funções orgânicas em sua estrutura, e um diálcool na presença de um catalisador metálico, são os mais comumente empregados etileno glicol (EG) e o ácido tereftálico, ambos apresentam impactos ao meio ambiente durante as suas produções (Li *et al.*, 2022), fator deve ser considerado nas motivações para o desenvolvimento de métodos para a reciclagem dos polímeros (Sinha, Patel e Patel, 2010).

A produção de EG geralmente envolve dois principais processos.

O processo começa com a oxidação de etileno, que é um derivado do petróleo. O etileno reage com oxigênio na presença de um catalisador de prata para produzir óxido de etileno (EO), segundo a Eq. (1) (Martins e Cardoso, 2005).

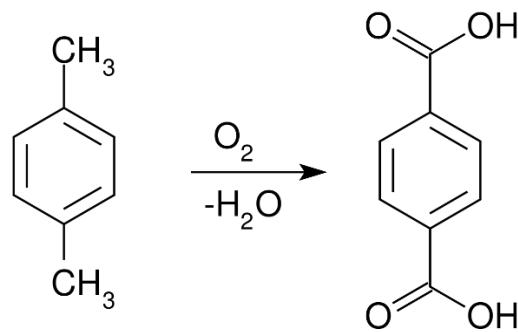


O óxido de etileno é então hidratado em presença de água para formar EG (SANTOS, 2017). Este processo pode ser realizado via hidratação direta (em uma única etapa) ou indireta (usando um ácido ou base como catalisador), como indicado na Eq. (2).



A produção de ácido tereftálico (PTA) envolve principalmente a oxidação de p-xileno. O processo é realizado em várias etapas:

- o p-xileno, derivado do petróleo, é oxidado, Figura 2.2, em presença de oxigênio (ar) e um catalisador, que geralmente é uma mistura de sais de cobalto e manganês com ácido acético

Figura 2.2- Oxidação do p-xileno

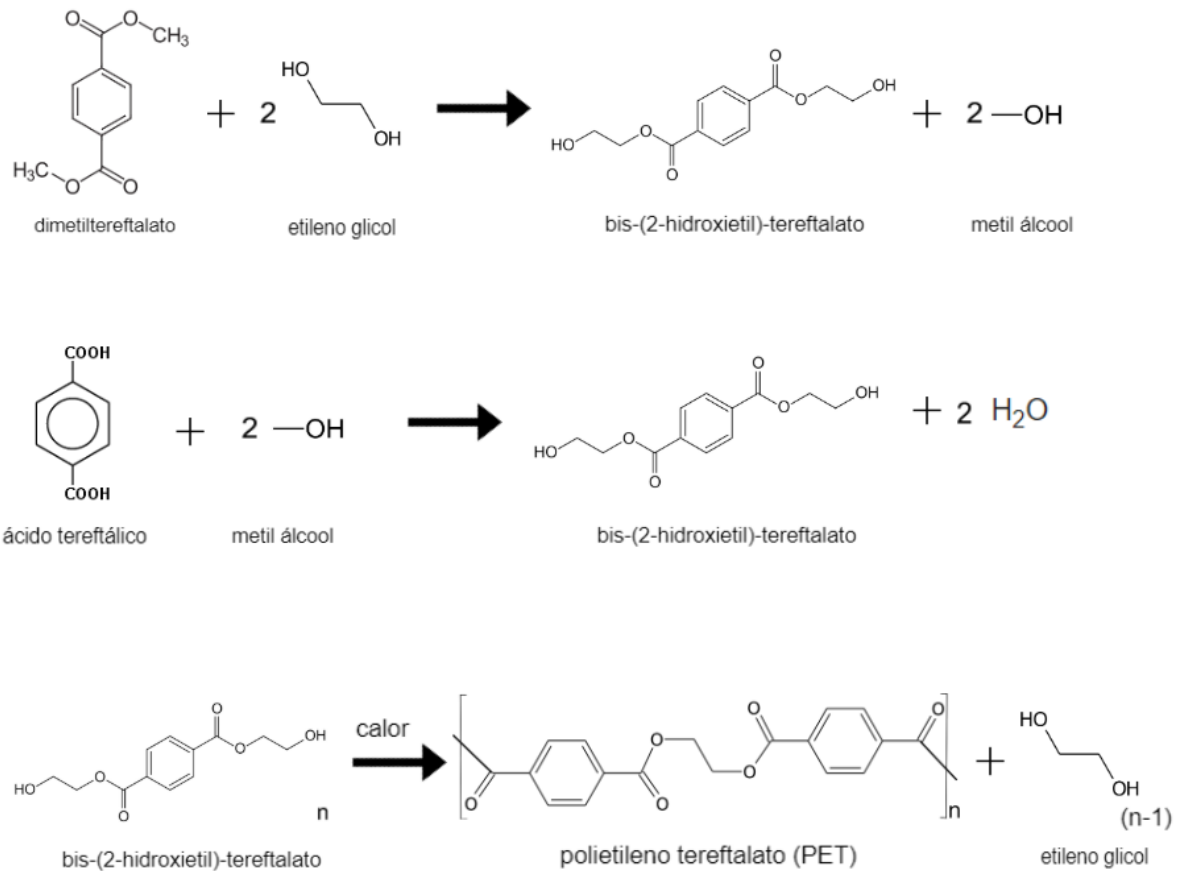
Fonte: (SIMON.KR, 2011)

A reação seguinte é aplicada a alguns processos de purificação do ácido tereftálico para obter produtos de maior qualidade:

- Cristalização: O ácido tereftálico bruto é cristalizado a partir da solução de reação;
- Lavagem e Filtração: Os cristais são lavados e filtrados para remover impurezas;
- Secagem: O produto final é seco para obter ácido tereftálico puro;

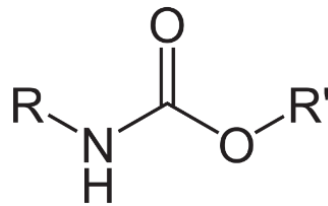
Como foi identificado durante as reações ambos os produtos são oriundos de fontes não renováveis, no caso o petróleo, isso agrega as motivações do projeto que visa diminuir os impactos desses produtos poliméricos (Zuo et al., 2010).

Com os precursores apresentados a etapa básica da polimerização é chamada de reação de condensação, na qual as moléculas reagem e formam subprodutos simples. Ocorre então uma segunda reação de polimerização na fase sólida, de maneira simples o material é formado por uma reação de polimerização entre ácidos e álcoois, na Figura 2.3 a seguir tem-se um esquema da reação (Canevarolo Jr, S, 2006).

Figura 2.3 - Reação de formação do PET

Fonte: (CGOMESLP, 2019)

O segundo polímero presente é o PU, ele pertence a uma família de polímeros que pode variar significativamente em propriedades físicas, dependendo da sua composição específica (segmentos rígidos e flexíveis) e do tipo (PU termoplástico ou PU elastomérico), isso promove uma variação do Ponto de fusão e Temperatura de Transição Vítrea (T_g) (Crespo et al., 2015), sua composição química consta na Fig 2.4.

Figura 2.4 - Formula química PU

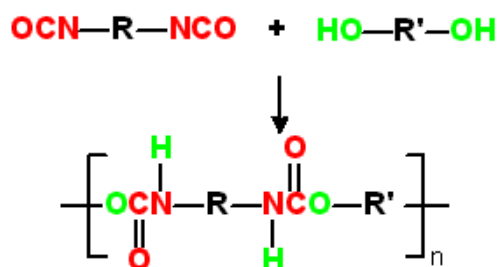
Fonte: (NEUROTIKER, 2008)

Para os poliuretanos termoplásticos (TPU), o ponto de fusão pode variar amplamente, geralmente situando-se na faixa de 150°C a 220°C. A exata temperatura depende da estrutura do polímero, especialmente do tipo e da proporção de segmentos rígidos (cristalinos) presentes (TROMBETTA, 2007).

Já a temperatura de transição vítrea dos poliuretanos também é variável, podendo estar em uma ampla faixa de -50°C a 100°C, dependendo da composição específica do PU. Poliuretanos com mais segmentos flexíveis terão T_g mais baixas, enquanto aqueles com mais segmentos rígidos terão T_g mais altas (TROMBETTA, 2007).

Sua produção ocorre por meio de uma reação de polimerização entre um polioliol e um diisocianato. Essa reação, Fig 2.5, ocorre entre os grupos isocianato presentes em um diisocianato, Figura 2.5, (como o difenilmetano diisocianato, MDI) e os grupos hidroxila presentes em um polioliol (como polietilenoglicol, polipropilenoglicol, etc.) (Fiorio, 2011).

Os diisocianatos são compostos químicos que contêm dois grupos isocianato (NCO) em sua estrutura molecular. O isocianato é um grupo funcional composto por um átomo de nitrogênio, um átomo de carbono e um átomo de oxigênio ligados por ligações duplas, sendo altamente reativo (Fiorio, 2011).

Figura 2.5 - Esquema reação de formação PU

Fonte: (POLIMEREK, 2006)

Dentre os materiais selecionados no projeto, há a presença da fibra de vidro com o intuito de agregar resistência ao material, seu processo de produção, como os já citados, também vai gerar um impacto no meio ambiente através de emissões de poluentes e em seu consumo energético, que é o foco do estudo.

O processo em específico é o da fiação do vidro, existem duas metodologias que podem ser aplicadas, o processo de fiação direta e o processo de fiação centrífuga, ambas se iniciam com o vidro fundido. No processo de fiação direta, o vidro fundido é extrudado através de uma bucha de platina, que possui várias pequenas aberturas com diâmetros micrométricos (Li, 2021). À medida que o vidro fundido passa pelos orifícios, ele é estirado em fios finíssimos que se solidificam rapidamente devido ao resfriamento.

O processo de fiação centrífuga, por outro lado, utiliza um rotor de alta velocidade. O vidro fundido é alimentado no rotor giratório, e a força centrífuga força o vidro através de pequenos orifícios na borda do rotor, formando fibras finas (Li, 2021). Essas fibras são rapidamente resfriadas e coletadas em um sistema de coleta, prontas para a próxima fase do processo (Gardiner, 2009).

Após a formação das fibras, elas passam por um tratamento com agentes de acoplamento e outros produtos químicos que melhoram suas propriedades físicas e químicas. Esses revestimentos, conhecidos como agentes de dimensionamento, protegem as fibras e facilitam o manuseio subsequente, químicos estes que também contribuem, para os impactos gerados pela utilização desse material (Li, 2021), assim aumenta a importância da sua reutilização.

Para o consumo energético, o estudo conduzido por GOMES e MORAES (2017) destaca que para a manufatura da fibra de vidro, o consumo varia com cada etapa do processo, os dados seguem na Tabela 1.

Tabela 1- Consumo energético da produção de fibra de vidro por etapa por autor

Etapa	Fibra de Vidro		
produção	(MJ/kg)		
Referências	Joshi (2003)	Worrel et al (2008)	Scalet et al (2013)

Matéria Prima	1,7	1,16	-
Mistura	1,0	-	-
Transporte	1,6	-	-
Fundição	21,5	5,91 - 11,08	6,35 – 16,33
Fiação	5,9	2,11 - 5,80	-
Produção de matérias	23,0	-	-
Total	54,7	8,02-16,88	6,35 – 16,33

Fonte: Elaborado pelo autor

2.3 Processamento de polímeros

Os métodos existentes para a produção de polímeros, que serão comparados do ponto de vista energético ao processo empregado neste trabalho, são os processos de injeção e termoformagem.

2.3.1 Processo de injeção

Para o método da moldagem por injeção o consumo de energia varia com o artefato que se está moldando e qual equipamento de moldagem foi utilizado, conforme apresentado na Fig. 2.6 (Elduque et al, 2015). Além destes, o consumo de energia varia com a força de fechamento (Clamping Force); valores altos para essa força o consumo de energia é maior (Cardeal, 2016), com isso pode-se afirmar que quanto mais complexo for o processo empregado aumenta-se o consumo energético.

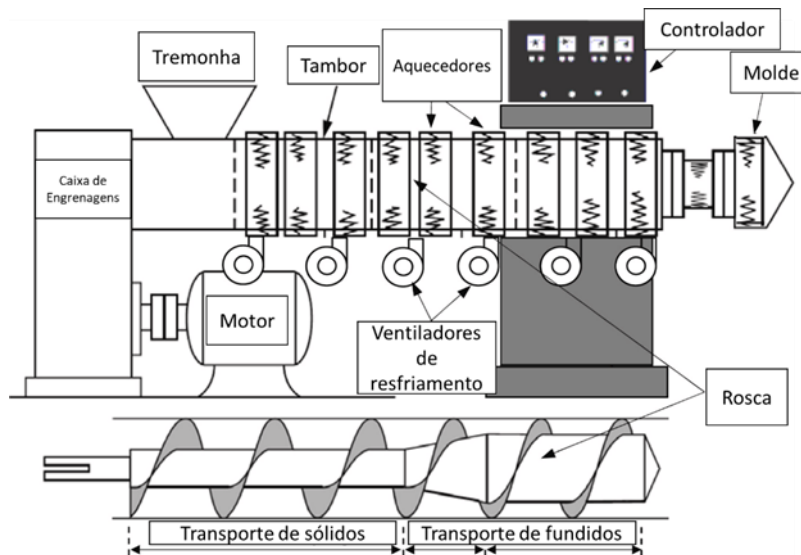
Um processo que confirma isso é de moldagem que pode abranger a extrusão de monofilamento, entre outros, em que cada um tem um gasto energético próprio (Khripko, Diana, et al. 2016).

Outro processo utilizado em larga escala é o da extrusão, ele consiste em forçar o material em uma série de etapas através de uma rosca, ao longo dela há aquecedores que

fornece energia para o derretimento do material junto com o calor gerado pelo atrito da rosca, ao final do processo o material fundido é injetado em um molde (Abeykoon, McMillan e Nguyen, 2021).

Conhecendo como ocorre o processo em uma extrusora e de outros equipamentos é possível quantificar o seu consumo energético, neste caso utiliza-se o SEC (*Specific Energy Consumption*) que seria a razão de energia utilizada pela quantidade de material obtido (Lawrence et al., 2019). Um estudo conduzido por Abeykoon (2014), concluiu que no processo de uma extrusora a SEC pode variar de 700 J/g a mais de 1900 J/g.

Figura 2.6 - Esquema extrusora



Fonte: Adaptado de Abeykoon (2022)

Mesmo com essas tecnologias e processos de reciclagem destes polímeros ainda podem gerar impactos, além daqueles causados pela extração de matéria-prima, como os gerados pelos processos de fabricação, pois estes consomem energia elétrica (Elduque et al., 2015).

2.3.2 Processo de termomoldagem

A termomoldagem, ou *thermomolding/thermoforming*, é uma técnica de processamento de polímeros que envolve o aquecimento de um material plástico até que ele se torne maleável e, em seguida, moldá-lo em uma forma específica usando um molde

(Canevarolo Jr, S, 2006). Este método é amplamente utilizado na produção de peças plásticas, embalagens, e componentes industriais devido à sua eficiência e versatilidade.

Na Fig 2.7 tem-se uma máquina de termomoldagem que utiliza polímeros como o PET em seus processos, para esse equipamento o consumo energético ocorre em múltiplas etapas, isso permite uma comparação com maiores detalhes com o método empregado neste trabalho.

Figura 2.7 - IC-RV 74d Máquina de alimentação automática por rolos



Fonte: (ILLIG, 2024)

Algumas das etapas da termoformagem são:

- Aquecimento do material;
- Pré-formação (acionamento elétrico ou pneumático, ar comprimido ou vácuo);
- Formação;
- Arrefecimento da peça formada (Controle de temperatura da ferramenta, arrefecimento direto do material com ar);
- Desmoldagem;
- Movimento, transporte do material na esteira;
- Pré-aquecimento da máquina;
- Controle preliminar da temperatura (Aquecendo ou resfriando a ferramenta utilizada);

O consumo não é distribuído igualmente para cada etapa, segundo os autores Schwarzmann, Illig (2019) a distribuição segue o seguinte padrão exposto na Tabela 2:

Tabela 2 - Distribuição do consumo energético por tipo de termomoldagem

Procedimento	Máquinas para formação de chapas (Moldagem a vácuo)	Máquinas alimentadas por rolos (Moldagem por pressão)
Aquecimento do material	70-90%	10-50%
Acionamentos eléctricos	2-10%	5-10%
Geração de ar comprimido	2-10%	40-70%
Arrefecimento, controle da temperatura	5-10%	5-10%

Fonte: Schwarzmam, Illig, 2019

Como existem diversos equipamento que se encaixam na categoria de “Máquina alimentadas por rolos”, os autores da Tabela 2 Schwarzmam, Illig, 2019, coletaram dados para diversos modelos, para então poder calcular a SEC de cada um deles, como visto na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 - SEC Termomoldagem

Máquina	Materi al	Bitola/Calibre	Parte finalizada	Tempo de ciclo	Taxa de produção	SEC	SEC
Tipo ILLIG	-	mm	g	s	Kg/h	kWh/Kg	MJ/Kg
RV 74c	APET	0.24	21g	60/35	176	0.32	1,152
RV 74c	APET	0.6	48g	60/31	334	0.21	0,756
RDK 80	APET	0.4	13.5g	60/50.4	326.6	0.36	1,296
RDM 54k + VHW	PP	1.7	10.86g	60/25	163	0.41	1,476
RDM 75k inline	PP	0.912	6.16g	60/26.3	320.7	0.37	1,332
RDML 70 + VHW	PP	0.8	8.2g	60/20	118.1	0.36	1,296
Médias			18,03g				1,22

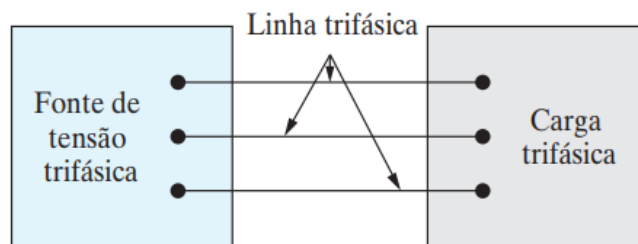
Fonte: Schwarzmam, Illig, 2019

Os autores também comentam que a utilização da SEC isoladamente pode gerar uma análise errônea, com isso para atingir uma maior precisão eles calculam a razão entre a taxa de produção e a SEC. Isso evita que para máquinas que demonstrarem uma menor SEC por terem uma produção em menor escala e que por consequência consumam menos energia apresentem uma SEC menor, o que poderia ser um resultado favorável, sejam comparadas com máquinas com uma alta taxa de produção que demandem um maior consumo energético.

2.4 Medição de potência em sistema trifásico para avaliação do consumo energético

A prensa hidráulica com aquecimento em seus platôs utilizada no projeto opera em um circuito trifásico, o entendimento desse circuito é fundamental para a medida de consumo de energia durante os processos na qual a prensa é empregada, na Figura 2.8 mostra um esquema de um circuito trifásico.

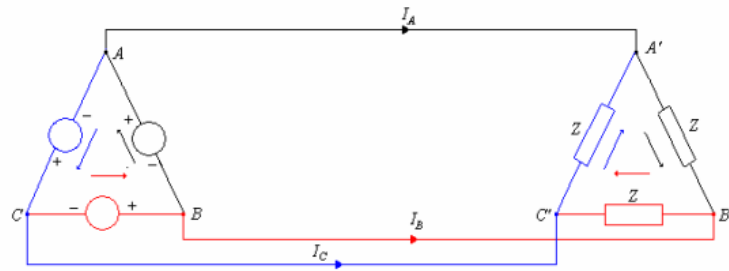
Figura 2.8 - Esquema Circuito Trifásico



Fonte: (James W. Nilsson, 2016)

Um circuito trifásico é um sistema elétrico no qual existem três fases (mais a fase neutra em alguns casos), pelas quais a eletricidade é transmitida de maneira equilibrada ou desequilibrada. Uma fase representa uma forma de onda senoidal defasada em relação às outras fases geralmente representadas como fase A, fase B e fase C (James W. Nilsson, 2016). Estes circuitos podem ser arranjados de duas maneiras para poder formar um sistema trifásico: uma configuração Y ou delta (Δ), Fig. 2.9.

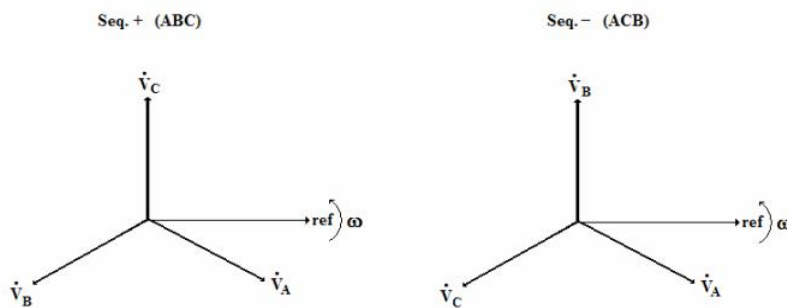
Figura 2.9 - Configuração Delta circuito trifásico.



Fonte: (MALANGE, 2018).

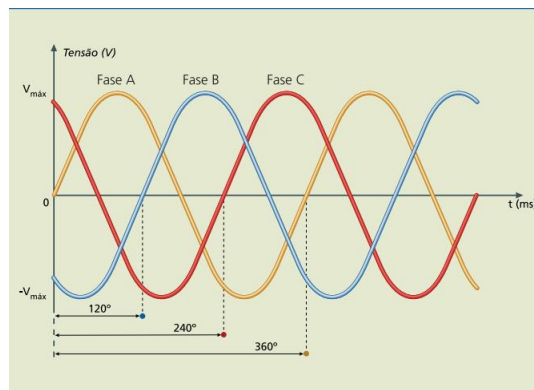
Estas três fases são chamadas comumente de Fase A, Fase B e a Fase C, neste tipo de sistema, tendo a Fase A como referência, a Fase B estará atrasada 120° em relação a Fase A e a Fase C adiantada 120° , essa configuração é chamada de seqüência de fase ABC (Positiva), o oposto é a seqüência de fase ACB (Negativa), Fig. 2.10 (OLIVEIRA, Carlos César Barioni, 1996)

Figura 2.10 - Tipos de seqüência em sistemas trifásicos.



Fonte: (MALANGE, 2018)

A defasagem de fase em um circuito trifásico refere-se à diferença angular entre as formas de onda das tensões ou correntes em cada uma das três fases. Em um sistema trifásico equilibrado, as três fases são deslocadas entre si por 120 graus elétricos (ou $2\pi/3$ radianos) (Alexander e Sadiku, 2013). Essa defasagem é importante para determinar a direção do fluxo de energia e a operação eficiente de dispositivos elétricos em sistemas trifásicos, como visto na Fig. 2.11 (MALANGE, 2018).

Figura 2.11 - Defasagem entre as fases.

Fonte: (Junior, 2020)

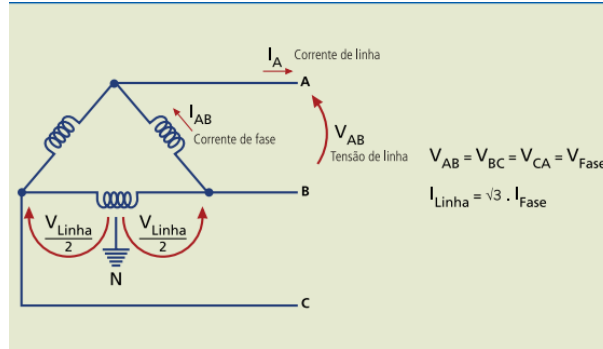
A sequência de fases é essencial para determinar o funcionamento do circuito e se ele é equilibrado ou não, no caso do equilibrado as tensões e correntes são as mesmas nas 3 fases e elas distam entre si 120° , estão defasadas (Alexander e Sadiku, 2013).

Outros conceitos importantes para o entendimento destes tipos de circuitos são:

- 1) Tensão de fase (VF): A tensão de fase é a tensão medida entre uma fase individual e o ponto de referência comum, que pode ser o ponto neutro (se existir) ou a terra;
- 2) Tensão de Linha (VL): A tensão de linha é a tensão medida entre duas fases diferentes em um circuito trifásico. A tensão de linha é maior que a tensão de fase;
- 3) Corrente de fase (IF): A corrente de fase é a corrente que flui através de cada fase individualmente em um circuito trifásico e é medido em amperes (A);
- 4) Corrente de Linha (IL): A corrente de linha é a corrente total que flui no circuito trifásico. Em um sistema trifásico equilibrado, a corrente de linha é igual à corrente de fase em magnitude.

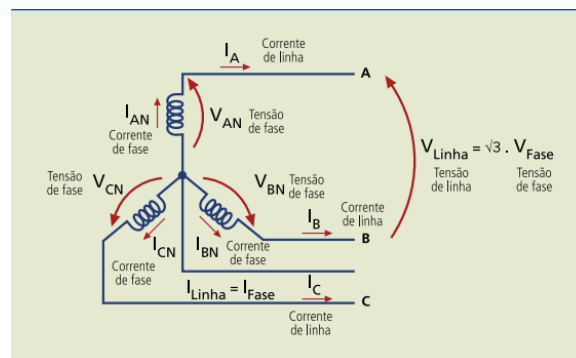
As relações entre as correntes e tensões de fase com as correntes e tensões de linha variam de acordo com a configuração do circuito, caso ele esteja em delta as tensões de linha serão as mesmas que as de fase, já as correntes diferem por um fator de $\sqrt{3}$, o oposto ocorre na configuração Y, como é possível ver nas Figs 2.12 e 2.13 (Boylestad, 2012)

Figura 2.12 - Circuito trifásico em Delta.



Fonte: (Junior, 2020)

Figura 2.13 - Circuito trifásico em Y



Fonte: (Junior, 2020)

2.4.1 Cálculo da potência em circuitos trifásicos

Para medir a potência do sistema é necessário conhecer as potências que podem ser medidas e o que cada uma delas significa. A potência ativa total é a quantidade total de energia elétrica que é efetivamente convertida em trabalho útil no sistema elétrico. Ela é medida em watts (W) e representa a parcela da potência aparente total que realiza trabalho útil, como aquecimento, iluminação, acionamento de motores, entre outros, seguindo a Lei de Ohm ($P = V * I$) (Boylestad, 2012).

Já a potência aparente total é a soma vetorial da potência ativa total e da potência reativa total em um sistema elétrico. Ela é medida em volt-ampere (VA) e representa a

quantidade total de energia que está sendo fornecida ou consumida pelo sistema, levando em consideração tanto a energia útil convertida em trabalho quanto a energia reativa necessária para o funcionamento dos dispositivos elétricos. Matematicamente, a potência aparente é calculada usando o produto da tensão e da corrente aparente ($S = V \cdot I$) (Alexander e Sadiku, 2013).

Com o conhecimento de como circuitos trifásicos operam e de como o circuito do equipamento está disposto, é possível fazer a medição da potência utilizada durante os processos, existem algumas metodologias para adquirir o valor da potência.

Em circuitos equilibrados nos quais a corrente de linha e tensão de linha aplicada são as mesmas, utiliza-se a Eq. (3) para o cálculo da potência real independente, tanto se o circuito estiver na configuração delta (Δ) quanto na configuração estrela (Y) (Boylestad, 2012)

$$P = VL \cdot IL \cdot \cos(\phi) \quad (3)$$

Na Eq. (3) o $\cos(\phi)$ é o fator de potência, ele varia de acordo com a carga e o ao longo do tempo de uso do equipamento e é obtido através da razão entre a potência ativa e a aparente Eq. (4) (Alexander e Sadiku, 2013).

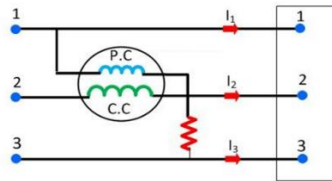
Outro fator que pode interferir é como o circuito está composto, ele pode ser indutivo (atrasado) ou capacitivo (adiantado), isso influenciará em seu valor e, portanto, na potência real final, com isso o valor para a potência não será o mesmo durante todo o processo (Alexander e Sadiku, 2013).

$$FP = \frac{kW}{kVA} = \frac{P}{S} \quad (4)$$

Existem diversas metodologias para se medir os valores de tensão de linha (VL) e de corrente de linha (IL) para poder calcular a potência, os métodos consolidados na literatura utilizam do equipamento wattímetro para as medições, o que difere entre as metodologias é a questão de o circuito ser equilibrado ou não e a presença ou acesso ao fio Neutro. Para o caso equilibrado com a presença do neutro, pode-se utilizar somente um wattímetro, caso o contrário ou sem a presença do Neutro aplica-se o método dos 2 wattímetros (Boylestad, 2012).

No sistema equilibrado o que se passa em uma fase se repetirá nas outras, assim necessitando de somente de um equipamento, Fig. 2.14, então a potência real desse sistema será o triplo do que for lido na medição do wattímetro, $P = 3 \cdot \{W\}$ (Boylestad, 2012).

Figura 2.14 - Método um wattímetro.

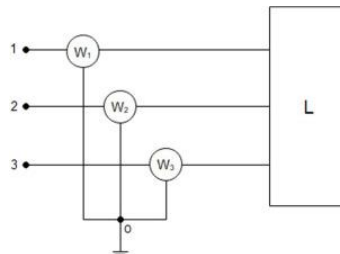


Fonte: Adaptado de CIRCUIT GLOBE (2025)

Já para sistema desequilibrado ou equilibrado sem presença da fase Neutra o método dos dois wattímetros consiste na conexão do wattímetro em uma fase (por exemplo, fase A) e o outro wattímetro é conectado em duas fases (por exemplo, fases B e C), como visto na Fig. 2.15, assim a potência total será a soma das leituras de ambos os wattímetros. Esse caso de medição é possível quando o sistema trifásico está equilibrado, ou seja, as potências nas três fases são simétricas, e as medições de cada wattímetro refletem a contribuição das fases no sistema (Boylestad, 2012).

Caso haja um neutro no sistema desequilibrado será necessário utilizar mais um wattímetro conectado a fase neutra.

Figura 2.15 - Método 3 Wattímetros.



Fonte: (Babuta et al., 2021)

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Serão abordados os procedimentos para obtenção da blenda polimérica e a forma de análise energética do processo de termoformagem. Em seguida, o método de obtenção das propriedades mecânicas em flexão será detalhado, assim como, a forma de análise de resultados.

3.1 Caracterização do material

Os resíduos utilizados no projeto são misturas de pelo menos dois tipos de polímeros citados anteriormente: poliuretana termofixa (PU) e polietileno tereftalato (PET), além de dois tipos possíveis de fibras: fibra de vidro e fibra de celulose, indicados na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificação do material

Material	Forma	Sigla
PU	independente	PU
PET – tecido fino	independente	PET 1
PET 2 – tecido espesso	independente	PET 2
(PU+PET+vidro) 1	prensado	PR 1
Fibra de vidro	independente	FV
Fibra de celulose	independente	FC

Fonte: Elaborado pelo autor

Primeiramente, para a análise destes materiais, foi feita a sua gramatura (gsm) (g/mm^2), a qual determinará a massa específica da blenda polimérica que será desenvolvida, para isso utiliza-se a Eq. (5), em que t_m é a espessura do molde a ser utilizado na consolidação do material e os índices k , l , m e n representam a quantidade de camadas do material. Os subscritos são as iniciais dos materiais e o subscrito PR1 é o conjunto de materiais por fibra, PU e PET, o Prensado, que é como o material é empregado na indústria prévio ao seu descarte.

$$\rho = \frac{k \cdot gsm_{PU} + l \cdot gsm_{PET1} + m \cdot gsm_{PET2} + n \cdot gsm_{PR1}}{t_m} \quad (5)$$

Para isso foi necessário calcular a gramatura do material, o cálculo necessita que o material seja cortado no formato de um quadrado. O corte foi feito para cada um dos

componentes presentes separadamente e um do material prensado (PR1 ou PR2), que é um conjunto do PU, PET e FV, para todos foi utilizada uma medida aproximada de 60 mm de aresta, em um formato quadrado para se calcular a gramatura.

Em seguida a área de cada um deles foi calculada e a massa foi medida em uma balança de precisão, com os dados foi possível calcular a massa específica teórica utilizando a Eq. (5) e estabelecer a configuração e a quantidade de cada uma das camadas dos componentes, os resultados constam na Tabela 5, nela a massa do PU é considerada no prensado, pois não foi possível destaca-lo sem haver perda do formato, algo que impactaria na consolidação final desejada.

Tabela 5 - Gramaturas dos materiais

Material	Massa(g)
PET Branco/Fino	16,20
PET Cinza/Espesso	87,39
Prensado	103,00
Total	206,59

Fonte: Elaborado pelo autor

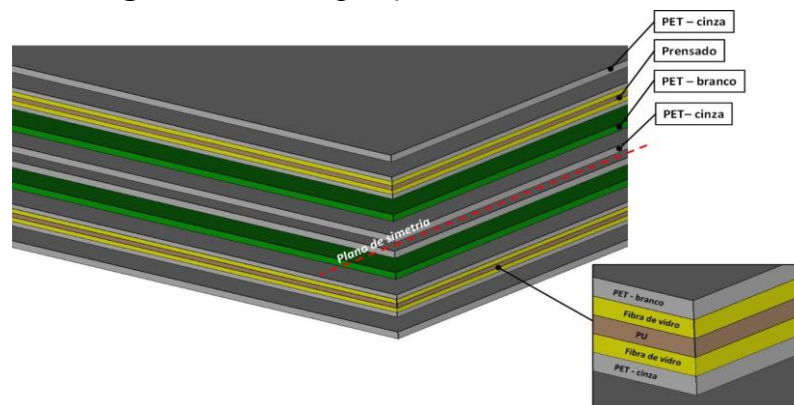
O espaçador no qual foi montado o molde tem uma espessura de 3 mm e aresta de 250mm de comprimento, com esses valores é possível calcular a densidade teórica da configuração montada.

Esta configuração ideal é levada para a prensa hidráulica com aquecimento que irá consolidar os polímeros em forma de um compósito da blenda, com novas características físicas e a gramatura calculada anteriormente.

A configuração estabelecida, que foi baseada nas iterações passadas da metodologia, pelas características físico-químicas dos materiais e após o cálculo da densidade é apresentada na Figura 3.1, que é possível verificar a ordem na qual os materiais foram dispostos. Essa disposição afetará como será a consolidação final do material e como será o seu comportamento mecânico.

Na configuração tem-se se 4 camadas de fibra de vidro, 4 camadas de poliéster cinza, 4 camadas de poliéster branco, 2 camadas de PU.

Figura 3.1 - Configuração do material no molde.



Fonte: Elaborado pelo autor

Tendo em vista como as aparas seriam utilizadas no método proposto, primeiramente é necessário preparar esse material para que ele possa ser utilizado no processo, pois a indústria o descarta de forma agregada por conta dos processos de moldagem, em sequência na Figura 3.2.

Então, o primeiro passo foi separar os materiais de acordo com a necessidade, pois para compor o molde foi utilizado em maior quantidade o PET-Cinza, dado que este por ter maior volume e ser o material que funde durante o processo, que o prensado e o PET-Branco.

Figura 3.2 - Material descartado do processo fabril.



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a separação, foi necessário cortar os polímeros nas dimensões adequadas ao tamanho do molde de área 250 mm x 250 mm. Para isso as aparas foram recortadas em tiras retangulares, essas tiras então foram separadas para montagem no molde de forma empilhada.

Por fim também foi realizada a caracterização dos polímeros quanto ao seu comportamento térmico por meio da análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC), a qual forneceu dados das transições térmicas (temperatura de transição vítrea – T_g e temperatura de fusão – T_f) dos polímeros individualmente. Os dados auxiliaram na definição da arquitetura do polímero e nos parâmetros de processamento do material.

3.2 Caracterização e processamento

A pré-forma de polímeros foi consolidada por meio de uma prensa hidráulica com aquecimento, a qual possui platôs com aquecimento que operam com temperatura máxima de 400°C e pressão máxima de trabalho de 120 bar, condições suficientes para desenvolvimento do projeto.

Os polímeros foram dispostos em um molde em liga de alumínio aeronáutico com dimensões 250 mm X 250 mm, material que tem alta condutividade térmica reduzindo o tempo de aquecimento (Callister, 2013).

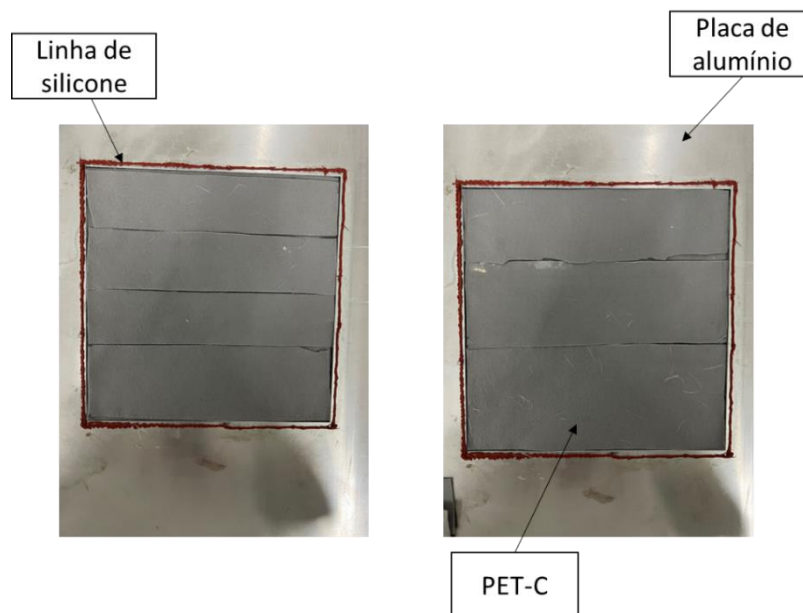
Para o material prensado (forma coesa dos três materiais) foi necessária a aplicação de aquecimento (50 °C) e pressão (50 bar) por 12 horas devido a não planicidade visto que foram

dobrados para armazenamento, o que os levou a uma forma arqueada dificultando a disposição no molde plano.

Antes de iniciar o processo foi necessário limpar as placas de alumínio, aplicar desmoldante nas mesmas para se, ao final do desenvolvimento, desmoldar o material com facilidade, e por fim aplicar uma região com silicone para impedir vazamento durante a etapa de fusão.

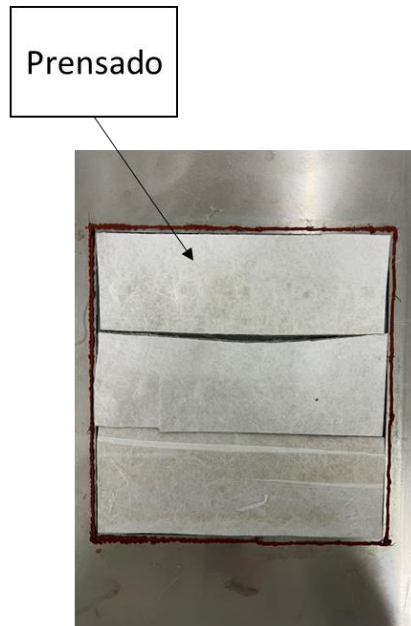
Com os materiais separados e cortados, a configuração definida e o molde preparado, a placa foi montada, começou-se pela camada de PET-C (C designa cinza), Fig. 3.3).

Figura 3.3 - Primeiras camadas.



Fonte: Elaborado pelo autor

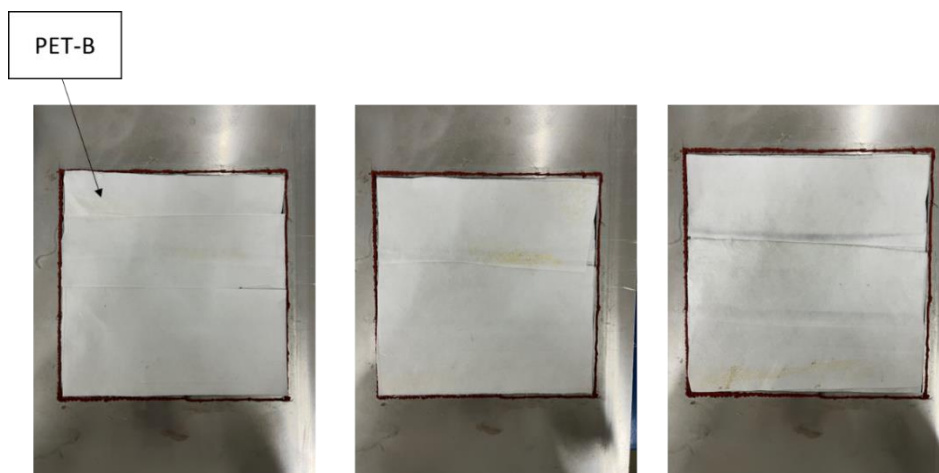
É necessário que não haja vazios de material ao longo das camadas para que não ocorra uma má formação da placa final e acarrete em uma menor homogeneidade. A próxima camada foi composta pelo prensado, que é a união das aparas utilizadas, é uma camada que adiciona maior rigidez à placa, Fig. 3.4.

Figura 3.4 – Prensado

Fonte: Elaborado pelo autor

O sentido na camada de prensado deve ser coincidente aos materiais adjacentes, ou seja, a região do prensado que apresenta o PET-C deve encostar na camada desse material, o mesmo é aplicado para os demais componentes.

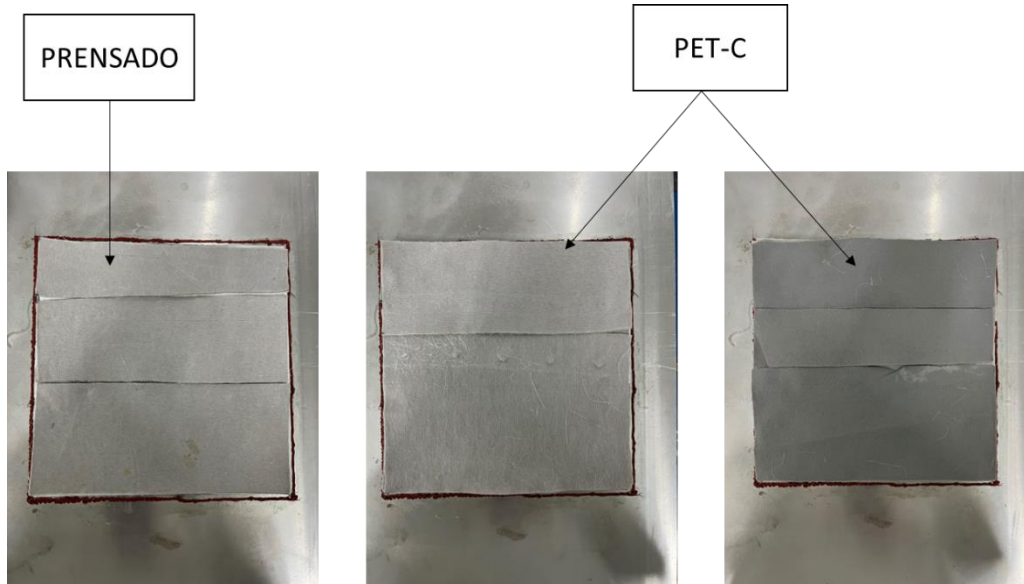
Segue-se com a camada de PET-Branco, esta camada está ao centro do molde, assim a partir dela os materiais foram dispostos de maneira espelhada.

Figura 3.5 - PET-Branco em forma de fibra.

Fonte: Elaborado pelo autor

O segmento espelhado do molde parte do material prensado e é finalizado com o PET-Cinza, esta é a última etapa da montagem, Fig. 3.6.

Figura 3.6 - Camadas finais de Prensado e PET-C.



Fonte: Elaborado pelo autor

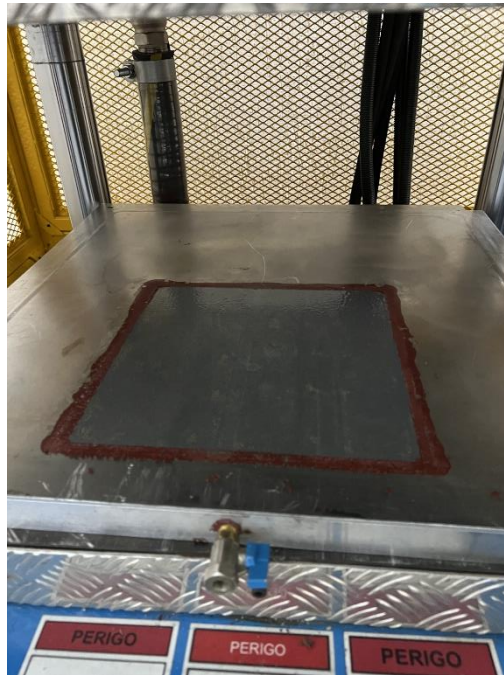
Completada a disposição das aparas, pode-se montar e inserir o molde com os platôs para o processo de aquecimento e aplicação de pressão, a metodologia utilizada foi de aquecer os platôs de maneira escalonada: cada um deles foi aquecido separadamente, partindo da temperatura ambiente com incrementos de 65°C até atingir temperatura próxima a 260°C, junto com um aumento de 10 bar após atingir a temperatura de ambas as placas, o intervalo de temperatura de 65°C foi escolhido para que cada platô tomasse 4 intervalos de aquecimento.

Iniciou-se pela placa superior até atingir-se 65 °C ou próximo, seguiu-se com o aquecimento da placa inferior até a mesma temperatura da superior, por fim adicionou-se a pressão de 10 bar a 12 bar iniciais.

Ao longo de todo o aquecimento a temperatura do molde foi verificada, pois este que deveria estar atingindo os intervalos desejados de temperatura para que os materiais possam se homogeneizar.

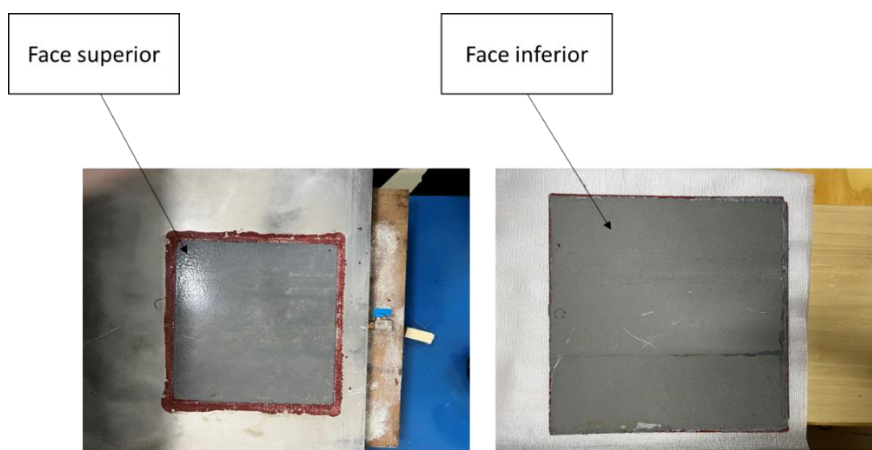
Foram necessários quatro ciclos para se atingir a temperatura de 277°C no molde e 60 bar de pressão, após isso o aquecimento foi desligado deixando somente a pressão aplicada, e assim, o molde ficou durante 24 horas antes de ser removido da prensa e desmoldado, Fig. 3.7 e 3.8.

Figura 3.7 - Disposição do molde com material dentro da prensa.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 3.8 - Aspecto da blenda ao final do processo.



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 Medição de energia

Para obter com precisão os valores de potência, correntes, tensões e outros dados relacionados a eletricidade, foi empregado o equipamento DMI P500R – Fig. 3.9, trata-se de um analisador de grandezas elétricas acompanhado de um software que calcula e registra os tipos de dados citados.

Figura 3.9 - Analisador de energia DMI P500R.



Fonte: Elaborado pelo autor

Ele possui 3 fios condutores que podem ser conectados em diversas fases de um circuito para maior precisão, conforme necessário para o cenário do projeto, dado que a prensa utilizada possui um circuito trifásico em sua composição, os fios podem ser vistos na Figura 3.10.

Figura 3.10 - Fios condutores conectados



Fonte: Elaborado pelo autor

Vide seu manual (ISSO DIGITAL, 2023) os erros presentes nas medidas são menores que 1%, precisão ideal para os cálculos e análises a serem comentadas na sequência do artigo.

Em adição o software que acompanha o medidor forneceu os dados em formato CSV, algo que permitiu diversas análises gráficas do comportamento de consumo elétrico da prensa.

3.4 Caracterização mecânica

A avaliação do material polimérico desenvolvido, quanto ao comportamento mecânico foi feita com carregamento em flexão em três pontos que visa levantar as propriedades de tensão de flexão e módulo de flexão. O ensaio foi conduzido em dispositivo de três pontos, conforme norma ASTM D790-17 (ASTM INTERNATIONAL, 2002) utilizando 15 corpos de provas, extraídos da chapa de material obtida do processo supracitado. O ensaio foi conduzido em conjunto com a fábrica parceira do projeto, utilizando o equipamento servo elétrico mecânico EMIC. O material foi preparado para o ensaio de flexão nas dimensões de 2 mm x 13 mm x 60 mm que atende a especificação da norma utilizada. O ensaio foi conduzido na máquina de ensaios disponível nas dependências da empresa que forneceu também os resíduos (será mantido sigilo a pedido da empresa). A velocidade do ensaio foi de aproximadamente 2 mm/min.

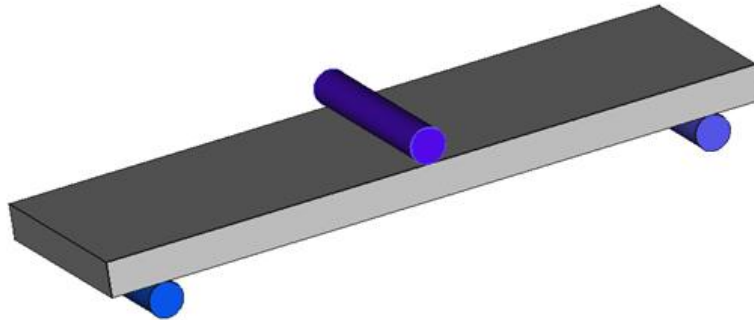
Os dados de deslocamento (mm) e de força aplicada (N) adquiridos na máquina de ensaio foram pós-processados para obtenção da resistência à flexão, calculado segundo a Eq. (6). Em que σ_f é a resistência à flexão, M o momento fletor máximo, $y_{max} = t/2$ a distância do plano neutro até a superfície da barra, e I o momento de inércia $\left(I = \frac{bt^3}{12}\right)$ sendo b a largura e t a espessura (t) do polímero.

$$\sigma_f = \frac{My}{I} \quad (6)$$

O momento máximo P é a força aplicada e L a distância entre os suportes, Fig.3.9, pode ser substituído da Eq. (6), o que leva a Eq. (7).

$$\sigma_f = \frac{3 PL}{2 bt^2} \quad (7)$$

Figura 3.11 - Set up para ensaio de flexão em três pontos.



Fonte: Elaborado pelo autor

O módulo de elasticidade foi obtido pelo método da tangente que leva em consideração o coeficiente angular (m) da curva de força versus deslocamento, de acordo com a Eq. (8).

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bt^3} \quad (8)$$

Para os testes foram selecionados 15 corpos de prova, que foram cortados do material consolidado utilizando uma cortadeira de avanço manual (Clipper modelo TR 202).

3.5 Análise do consumo energético

Além da análise de como o material se comportaria em flexão, foi feita a análise do consumo energético de todo processo para então responder ao objetivo da pesquisa, que é comparar o consumo de energia com métodos já consolidados na indústria.

Todo o consumo energético contemplou a avaliação do aumento da temperatura do molde, da potência empregada no motor que culminou na pressão aplicada pelos platôs, com foco em avaliar como trabalhos residuos foram convertidos a partir da eletricidade necessária para manusear a prensa.

Para apresentar maior precisão no consumo energético do processo foi calculado a energia total requerida para fusão do material em função do calor sensível, calor latente e tempo úteis para que os matérias se fundam e para que todo o molde atinja a temperatura alvo.

O calor latente calculado impacta exclusivamente o poliéster, pois ele é o único dos materiais que, nas condições de temperaturas empregas, submete-se a mudança de estado físico. Foi utilizada a Eq. (9) para o cálculo do calor latente.

$$Q_l = m \cdot c_p \quad (9)$$

Sendo “m” a massa de poliéster que compõe da placa dos materiais e “ c_p ” o calor específico do material a pressão constante, que possui o valor de 214,35 J/g, e consultando a Tabela 5, há 103,5 g de poliéster na placa (PET Cinza e PET Branco), que pode ser aplicado a Eq. (9), tem-se o valor da Eq. (10).

$$Q_l = 214,35 \cdot 103,59 = 22.204,52 \text{ J} \quad (10)$$

Em sequência tem-se o fluxo para o cálculo do calor sensível, nele foi considerado toda a massa do molde, pois todos os materiais presentes influenciam no aquecimento da placa, para isso utilizou-se a EQ (11)

$$Q_s = m \cdot c_s \cdot \Delta T \quad (11)$$

Novamente “m” é a massa presente, c_s são os calores específicos para cada material e Δt a variação da temperatura ambiente, que no momento do processo era de 25°C, até a desejada de no mínimo de 265°C.

Para o poliéster tem-se o calor específico de 1439,04 J/kg.K, a Fibra de Vidro 840 J/kg.K e o PU 1400 J/kg.K, inserindo estes valores junto as massas indicadas na Tabela 5 na equação para o calor sensível tem-se o valor indicado na Eq. (12)

$$Q_s = [(16,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1439,04) + (87,39 \cdot 1439,04 \cdot 10^{-3}) + (18,44 \cdot 840 \cdot 10^{-3}) + (84,56 \cdot 1400 \cdot 10^{-3})] \cdot [(265 - 25) + 273,25] = 145.220,88 \text{ J} \quad (12)$$

Com ambos os calores se infere o calor total para aquecer o material e trocar o estado do poliéster, indicado na Eq. (13)

$$Q_t = Q_s + Q_l = 145.220,88 + 22.204,52 J = 167.425,4 J \quad (13)$$

Na sequência foi calculado o coeficiente global de transferência de calor “U” para os materiais empregados, tal coeficiente baseia-se na condutividade térmica presente e espessura dos compostos presentes.

Adota-se as seguintes condutividades térmicas dadas em W/m.K:

- i. Poliéster: 0,15 (polietileno tereftalato)
- ii. Fibra de vidro: 0,040
- iii. PU: 0,017 (espuma rígida de PU)
- iv. Inox: 15,9

E matérias de espessuras:

- i. Fibra de vidro: 0,55 mm
- ii. Poliéster cinza: 1,55 mm
- iii. Poliéster branco: 0,60 mm
- iv. PU: 2 mm
- v. Inox: 2 mm

Para o cálculo do U, foi utilizada a Eq. (14):

$$\frac{1}{U} = \frac{H_1}{K_1} + \frac{H_2}{K_2} + \dots + \frac{H_N}{K_N} \quad (14)$$

Assim, para a placa montada que possui 4 camadas de fibra de vidro, 4 camadas de poliéster cinza, 4 camadas de poliéster branco, 2 camadas de PU envolto por uma chapa de alumínio tem-se o resultado na Eq. (15) do coeficiente de transferência de calor:

$$\frac{1}{U} = 4 \cdot \frac{0,55 \cdot 10^{-3}}{0,040} + 4 \cdot \frac{1,55 \cdot 10^{-3}}{0,15} + 4 \cdot \frac{0,60 \cdot 10^{-3}}{0,15} + 2 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-3}}{0,017} + 1 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-3}}{15,9} \quad (15)$$

Invertendo a razão tem se o $U = 2,8757 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, este valor foi utilizado para obter o fluxo de calor, descrito na Eq. (16):

$$\frac{\dot{Q}}{A} = U * \Delta T \quad (16)$$

O ΔT é o mesmo que o utilizado previamente, A a área em que o molde foi montado, que possui formato quadrado de lado 250 mm x 250 mm, o que implica uma área de 0,0625 m². Tais dados resultam no seguinte fluxo de calor, apresentado na Eq. (17)

$$\frac{\dot{Q}}{0,0625} = 2,8757 * (240 + 273,25K) = 92,247W \quad (17)$$

Por fim, com todos os valores previamente calculados quantificou-se o tempo necessários para que toda a placa atinja a temperatura final de 265°C, através da Eq. (18).

$$\dot{Q} = \frac{Q_T}{\Delta t} \rightarrow 92,247J/s = \frac{167.425,4J}{\Delta t} \quad (18)$$

Pela equação foi calculado o tempo de 1814,9 segundos, que se traduz em 30,24 minutos para que toda a placa esteja homogeneamente aquecida. Esse resultado será contabilizado no consumo total do processo.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Características mecânicas

Com os resultados obtidos a partir do teste de flexão para carga máxima suportada e flexão dos corpos de prova foi possível determinar a tensão de flexão utilizando a Equação (3), como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados do teste de Flexão em três pontos

Corpo de prova	Força Max (N)	Flexão (mm)	Largura (mm)	Tensão de Flexão (MPa)
CP 1	36,72	5,51	12,9	22,77
CP 2	38,5	6,47	13,6	22,64
CP 3	35,82	5,79	13,1	21,87
CP 4	34,44	5,65	13	21,19
CP 5	35,47	6,57	12,9	21,00
CP 6	37,31	6,19	12,1	24,67
CP 7	50,14	5,61	14,1	28,44
CP 8	38,12	5,89	12,8	23,825
CP 9	38,24	4,66	12,2	25,075
CP 10	43,21	5,29	12,9	26,79
CP 11	34,63	4,58	12,2	22,70
CP 12	38,06	5,76	13	23,42
CP 13	35,27	5,11	12	23,51
CP 14	30,47	6,36	13	18,75
CP 15	28,27	4,48	14	16,15

Fonte: Elaborado pelo autor

Baseado nos resultados, foi calculado a média e o desvio padrão da tensão de máxima de flexão (f): a média foi $\sigma_f=22,92$ MPa e o desvio padrão $D_{pf}=2,96$ MPa, para a carga máxima $P_{max} = 36,97$ N e $D_{pp}= 5,03$.

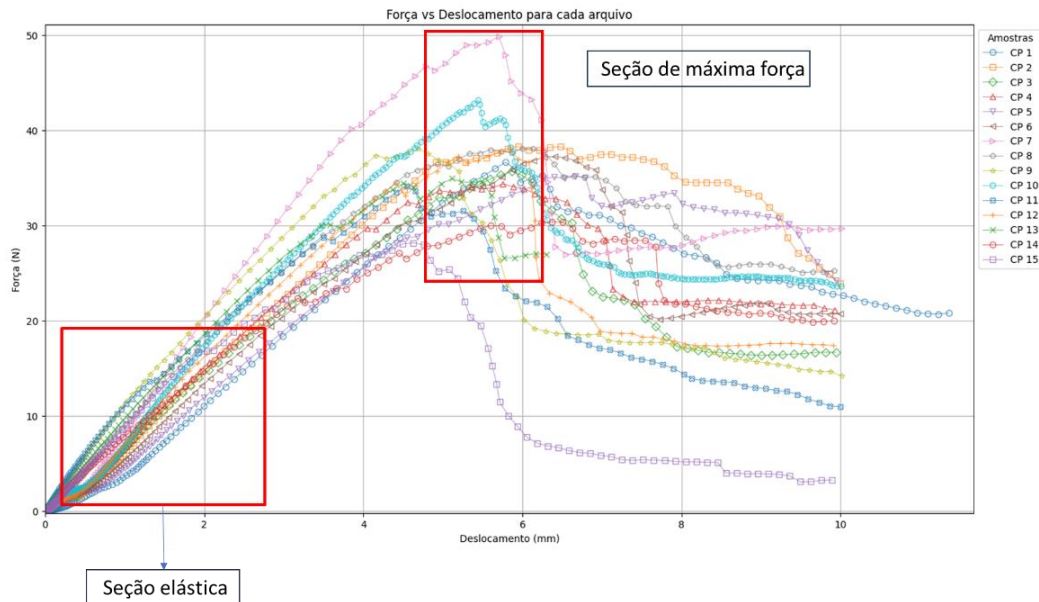
Em complemento a tabela foi plotado o gráfico abrangendo todos os instantes do teste de flexão, para os 15 Corpos de prova:

No Gráfico 1 é possível identificar a força máxima que o material resistiu e o deslocamento até sua ruptura, comportamento esse alinhado com a literatura em polímeros virgens, diferencia-se somente nos módulos dos valores que apresentados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7- Dados da literatura para a resistência à flexão

Autores	PET Virgem (MPa)
MESQUITA, Beatriz et al. (2022)	67,7 ($\pm 4,3$)
CALDEIRA, Caren Barbosa (2011)	87,3 ($\pm 0,5$)
Ahmad Saidi (2020)	98,8 (± 5)
Autores (2025)	22,92 ($\pm 2,96$)
GONÇALVES, A. P. B. et al.(2013)	62,31

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 1 – Força (N) vs Deslocamento(mm)

Fonte: Elaborado pelo autor

Estes resultados indicam que o material apresentado é homogêneo visto o baixo desvio padrão para a tensão de flexão (MPa) e o comportamento do Gráfico 1, mas mesmo com esse comportamento pode-se observar na Figura 3.8 que a parte inferior do molde destoa da superior, indicando que houve uma discrepância na consolidação do material, um motivo para isso é a diferença das temperaturas aplicadas nos platôs.

Em adição a análise do Gráfico 1, foi possível extrair o ângulo da reta tangente presente na seção elástica do gráfico, característico do comportamento linear. Este ângulo é utilizado no cálculo do módulo de elasticidade do material, o qual leva em conta a largura dos corpos de prova, indicados na Tabela 6, a distância entre os apoios do teste, 48 mm, e pôr fim à altura do corpo de prova. Utilizando os dados citados e com a inclinação média de 7,42 N/mm foi estimado o valor de 1767 Mpa.

Na tabela 8 nota-se que o valor apresentado para o material desenvolvido é menor que o de amostra de PET virgem. Dependendo das condições de processamento, há uma redução de 35% considerando o valor de 2760 MPa e de 12% considerando o dado consultado de Stuart (2002), portanto há perdas menores para o módulo elástico em flexão.

Tabela 8 - Dados da literatura para o Módulo de Elasticidade

Autores	Módulo PET Virgem MPa
GONÇALVES, A. P. B. et al.(2013)	2331
Stuart (2002)	2000
Callister, W. D. 2001)	2760

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Características energéticas

Seguindo o estudo sobre o material desenvolvido parte-se para a análise do consumo energético que o equipamento utilizado consome, visando realizar uma comparação com a literatura e processos industriais.

O processo de termoformagem foi analisado no equipamento DMI P500R 3 vezes, suas leituras forneceram dados relativos a consumo, como potências, corrente, defasagem, entre outros.

Para o estudo, foram utilizados os dados de potenciais ativa e potência aparente, pois estes permitem uma análise direta do rendimento que é atingido, como o analisado no trabalho e tratam-se do padrão de consumo energético avaliado na indústria também.

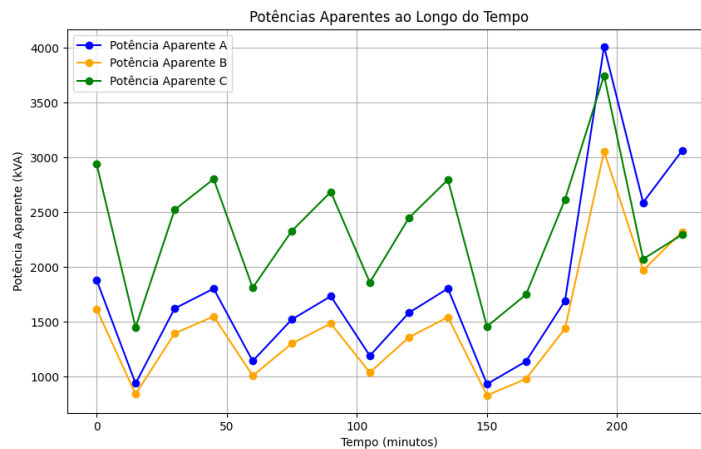
Como indicado, foram coletados dados simulando ciclos de processamento em três categorias de produção do material, todos com diferentes tempos de duração que variaram de acordo com a retirada e reposição do material, em condições análogas a um processo produtivo. De acordo com a Tabela 9, o segundo ciclo teve maior duração, mas não foi o que apresentou a maior energia dentre as categorias, como será visto adiante no cálculo do consumo em kWh (ou kJ).

Tabela 9 - Consolidado potencias nos três Ciclos

Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
Δt (Min)	P. Ativa Fund+Harm (W)	Δt (Min)	P. Ativa Fund+Harm (W)	Δt (Min)	P. Ativa Fund+Harm (W)
0	-16,94	0	6.047,39	0	2.125,31
15	1.060,87	15	2.952,06	15	8.913,44
30	5.443,56	30	5.085,41	30	9.152,30
45	9.167,65	45	5.720,46	45	9.507,41
60	11.032,41	60	3.697,11	60	11.135,19
75	6.030,23	75	4.700,40	75	5.953,77
90	12.076,19	90	5.519,16	90	2.616,88
105	7.413,25	105	3.814,49	105	8.584,72
120	6.819,24	120	4.997,77	120	2.434,91
135	6.898,95	135	5.760,03	135	2.629,86
		150	3.001,30	150	8.663,62
		165	3.557,89	165	10.472,75
		180	5.369,39		
		195	10.627,22		
		210	6.458,36		
		225	7.542,73		

Fonte: Elaborado pelo autor

Em análise da potência aparente, que abrange o trabalho útil, tem-se o Gráfico 2. Nele é possível identificar os intervalos em que a pressão foi aplicada na placa e quando a temperatura nos platôs foi ajustada.

Gráfico 2 - Potências aparentes ao longo do tempo

Fonte: Elaborado pelo autor

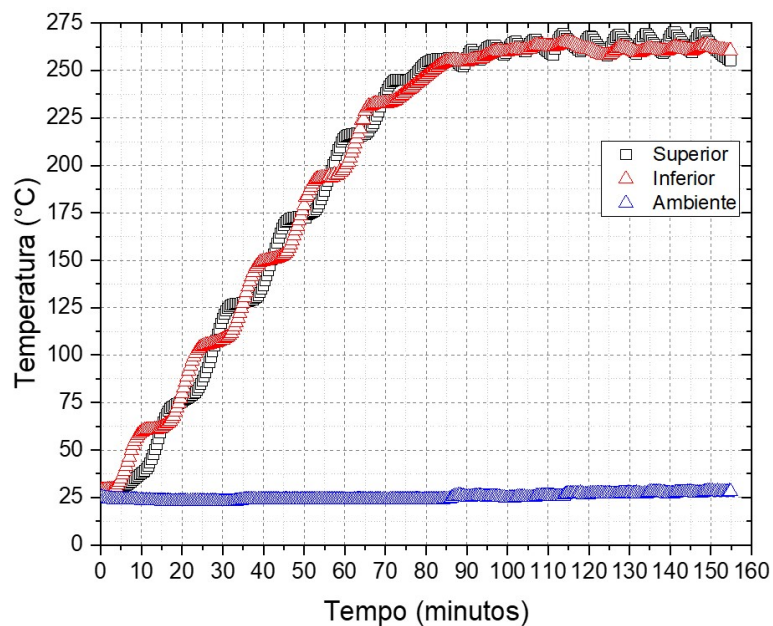
Para poder compreender em detalhes o impactado do ajuste da temperatura no consumo foi feito um teste de abertura e fechamento da prensa visando identificar a variação da temperatura e aplicar no consumo total.

O estudo está relacionado as categorias de cada ciclo que contemplou a abertura e fechamento dos platôs após a elevação da sua temperatura ao patamar ideal de 260°C, em um ambiente com a temperatura a 25 °C, seguindo um incremento de $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ individualmente para cada platô até atingir-se o valor final.

A partir deste ponto os platôs foram abertos e fechados em 10 intervalos, os 4 primeiros mantendo-os abertos por 2 minutos e a partir do 5º seguiu-se com um intervalo de 4 minutos de abertura, considerando os intervalos como o tempo necessário para reposição do material na prensa.

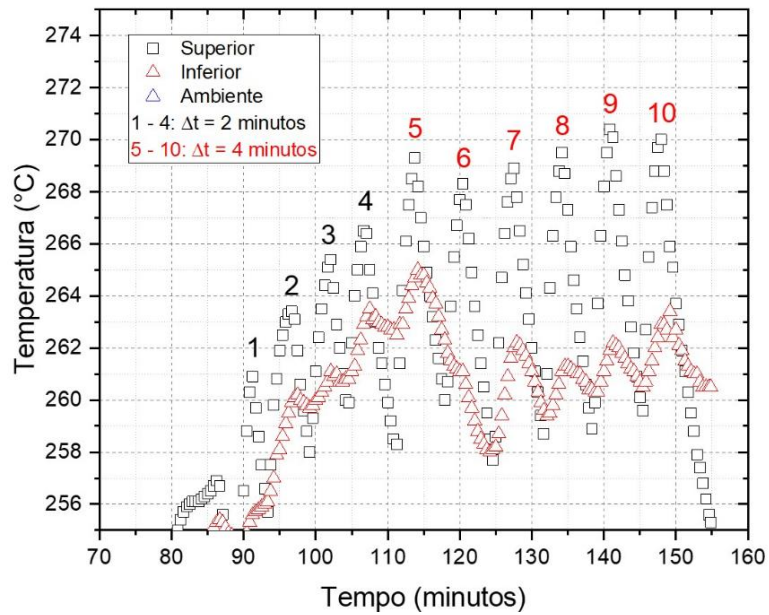
No Gráfico 3 tem-se a variação da temperatura durante todo o processo e no Gráfico 4 é ampliado para identificar estes momentos e como a temperatura variou.

Gráfico 3 - Evolução da temperatura ao longo do tempo



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 4: Teste abertura e fechamento platôs durante aquecimento

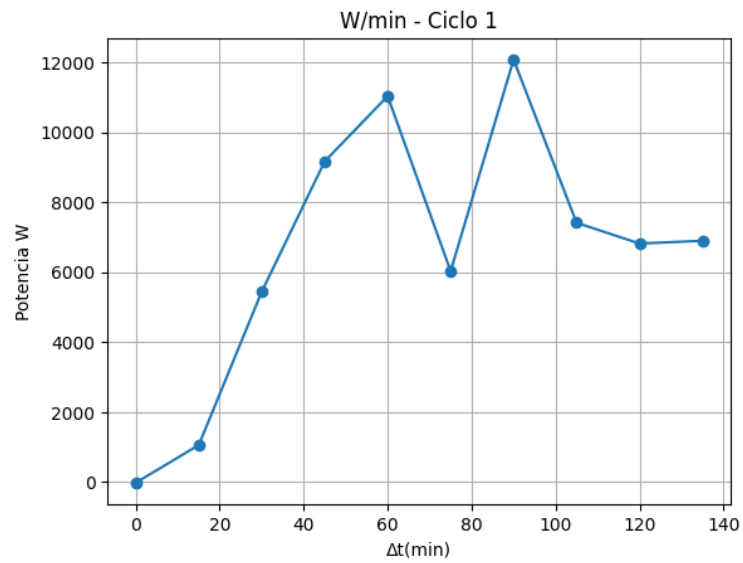


Fonte: Elaborado pelo autor

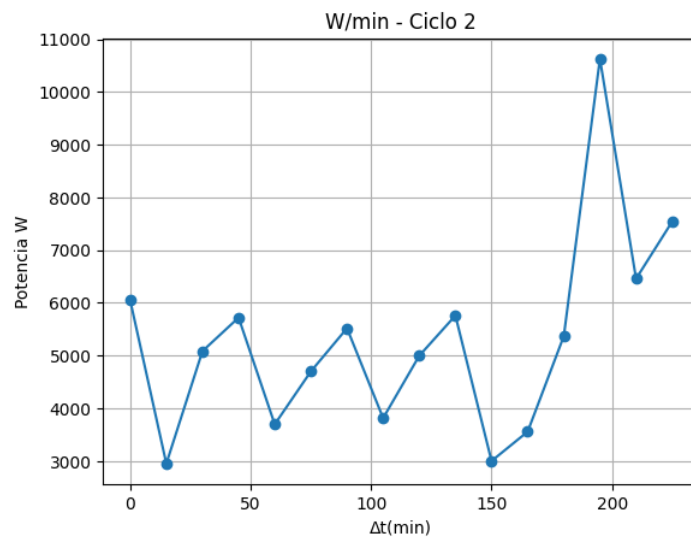
É possível identificar que o platô superior teve a maior variação de temperatura de 5°C,

O consumo energético foi calculado a partir de dois métodos, o primeiro por meio das áreas dos gráficos da potência em Watts pelo tempo em minutos, em que a prensa foi utilizada, e o segundo pela utilização do DMI P500R, equipamento empregado na coleta dos dados de potência.

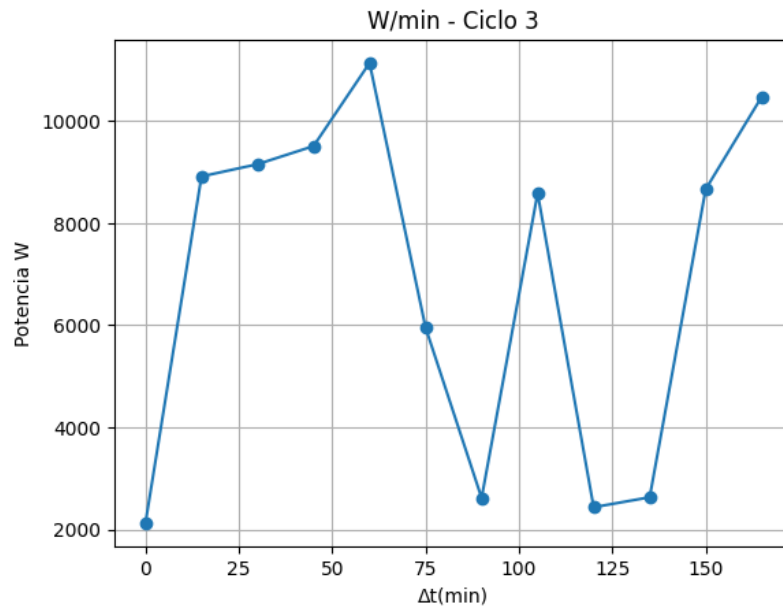
Foram utilizadas as três categorias de ciclos da máquina para a plotagem dos Gráficos 5, 6 e 7, em que foi calculado o consumo em kWh para cada ciclo baseado na área sob a curva, cujos valores são apresentados na Tabela 9, comentado anteriormente:

Gráfico 5 - Consumo energético ciclo 1

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 6 - consumo energético ciclo 2

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 7 - consumo energético ciclo 3

Fonte: Elaborado pelo autor

Nos dados apresentados nota-se que os valores estão em linha com o tempo de duração de cada ciclo, sendo o segundo ciclo o de maior duração é o que apresenta o maior valor para o consumo energético, segundo apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores obtidos a partir das áreas

Ciclo	Potência (KW/min)	Energia (kWh)
1	937,266075	15,62
2	1.170,84165	19,51
3	1.138,36695	18,97
Média	1.082,158225	18,03

Fonte: Elaborado pelo autor

Já o segundo método aplicado para obter o valor em kWh foi através do software do DMI P500R, mais especificamente uma função que retorna o consumo total de um período indicado. No caso, para o momento que abrange o último Ciclo indicado, foi apontado pelo software o valor de 18,63 kWh

Valor este que se alinha com os obtidos via cálculo gráfico, com isso será utilizada uma média ponderada entre os quatro valores, almejando alcançar um valor mais abrangente da metodologia empregada.

Com os quatro valores chega-se à média de 18,19 kWh para um ciclo de trabalho para gerar o material.

Baseando nesses resultados, foi possível calcular a propriedade específica que é a propriedade mecânica do material pela SEC. Para isso os valores em kWh foram convertidos em MJ, e a massa de gramas para Kg, visando uma equiparação com dados extraídos da literatura como apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - SEC e resistência por energia

Razão	Resultado
SEC	314,193 MJ/Kg
Tensão de flexão/SEC	$7,3 \cdot 10^{-2}$ Pa/J.Kg
Módulo de flexão/SEC	5,62 Pa/J.Kg

Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados indicados na Tabela 11 foram consolidados na Tabela 12 juntamente com os valores obtidos na literatura:

Tabela 12 - Dados consolidados das propriedades

SEC (MJ/kg)	Resistência a flexão (MPa)	Módulo de Flexão (MPa)	Fonte
314,19	22,92	1767	Autores
1,22	-	-	Schwarzmann, Illig, (2019)
-	62,31	2331	GONÇALVES, A. P. B. et al.(2013)
-	-	2000	Stuart (2002)
-	-	2760	Callister, W. D. (2001)
-	67,7 (\pm 4,3)	-	MESQUITA, Beatriz et al. (2022)
-	87,3 (\pm 0,5)	-	CALDEIRA, Caren Barbosa (2011)

-

98,8 (± 5)

-

Ahmad Saidi (2020)

Fonte: Elaborado pelo autor

Com os dados consolidados é possível identificar que os valores referentes aos processos industriais de materiais antes de serem reciclados apresentam resultados superiores aos obtidos na pesquisa.

A maior diferença sendo o consumo energético, indicado pela SEC, tem-se uma razão de 260 vezes o consumo para um ciclo de tratamento dos materiais, dado esse que indica a necessidade de se buscar alterações na metodologia ou de escalabilidade visando mitigar a diferença atual.

Já os valores das propriedades mecânicas mesmo também sendo inferiores aos do PET virgem, não apresentam diferenças na mesma proporção da SEC, sendo um indicador de que sua consolidação foi eficiente e que este material pode apresentar empregabilidade em situações em que os materiais não reciclados seriam descartados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Baseado nos valores indicados para os dados de consumo energético, características mecânicas do material e o fluxo para a reprodução do método discorrido no artigo chega-se nas seguintes considerações:

- O método para a reciclagem dos polímeros sob a ótica das características de resistência do material final atingiu valores inferiores aos de polímeros virgens, explicado pelas perdas de características dos materiais de forma individual, mas sob o viés ambiental, da retirada desses materiais de aterros sanitários, faz com que os resultados sejam satisfatórios e em linha com o objetivo da pesquisa.

- Existem caminhos nos quais podem ocorrer modificações nas configurações dos materiais empregados, visando atingir valores superiores de resistência, tais mudanças seriam acompanhadas de um estudo mais aprofundado de como o material se consolida ao longo do aquecimento e ao se aproximar do ponto de fusão do PET e das interações entre si

- Para o consumo energético do processo, nota-se que este foi o ponto negativo da metodologia empregada quando comparado com a literatura. Os processos empregados discorridos utilizam equipamentos industriais, entretanto a preocupação com o consumo é crucial e necessária a de ser reavaliada em futuras interações, pois o gasto energético tem um impacto direto ao meio ambiente;

- Em adição da análise do ponto de vista energético, entende-se que os processos automatizados da indústria têm uma eficiência maior no aquecimento do material;

- O tempo de emprego dos equipamentos, em uma fábrica, segue um fluxo de trabalho de 8 horas o que acarreta em uma maior produção de material, já para o cenário da pesquisa, todo o processo foi aplicado de forma manual, como a seleção dos melhores materiais, sua alocação no equipamento, manuseio da prensa, tempo de aquecimento individualizado, entre outros;

- Isso é indicativo de que o menor rendimento do processo empregado na pesquisa não é justificado por conta da técnica, mas sim da sua escalabilidade, afetando em seus resultados finais.

Em suma conclui-se que o método desenvolvido e descrito no projeto obteve resultados satisfatórios, do ponto de vista de propriedades mecânicas e de seu objetivo de reduzir impactos ambientais oriundos do descarte de quantidades expressivas de polímeros.

Considerando as análises energéticas mostrou-se menos eficaz que processos consolidados na literatura, algo que direciona futuras análises da metodologia e equipamentos utilizados para que nas próximas iterações atinja-se resultados superiores e com isso diminuindo impactos ambientais tanto no descarte quanto no consumo energético.

REFERÊNCIAS

- ABEYKOON, C.; MCMILLAN, A.; NGUYEN, B. K. Energy efficiency in extrusion-related polymer processing: A review of state of the art and potential efficiency improvements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 147, n. December 2019, p. 111219, 2021.
- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. *Fundamentos de Circuitos Elétricos - 5a Edição*. [s.l: s.n.]. v. Único
- ARJUN SIVA RATHAN, R. T.; V, A. S.; V, S. Mechanical and structural performance evaluation of pervious interlocking paver blocks. *Construction and Building Materials*, v. 292, p. 123438, 2021.
- ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. D790* Annual Book of ASTM Standards, 2002.
- BABUTA, A. et al. Power and energy measurement devices: A review, comparison, discussion, and the future of research. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 172, n. November 2020, p. 108961, 2021.
- BISIO, A.; XANTHOS, M. *How to manage plastics waste: technology and market opportunities*. Munich: Hanser, 1995.
- BOOK, Gold. *Compendium of chemical terminology*. International Union of Pure and Applied Chemistry, v. 528, 2014.
- BOYLESTAD, R. L. *Introdução à Análise de Circuitos*. [s.l: s.n.].
- CANEVAROLO JR, S, V. *Ciência dos polimeros*. Artiiber Editora Ltda., v. 1, p. 277, 2006.

CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CIÊNCIA E TECNOLOGIA, C. Ficha técnica ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. *Fundamentos de Circuitos Elétricos - 5a Edição*. [s.l.: s.n.]. v. Único

CRESPO, J. S. et al. Mechanical and Thermal Properties and Morphology of Thermoplastic Polyurethane (TPU)/Clay Composites. *Scientia cum Industria*, v. 3, n. 2, p. 50–54, 2015.

ELDUQUE, A. et al. Environmental impact analysis of the injection molding process: Analysis of the processing of high-density polyethylene parts. *Journal of Cleaner Production*, v. 108, p. 80–89, 2015.

FERNANDES, Sthefania. *Transformação Y-Delta (Estrela-Triângulo)*. 2022. Disponível em: <https://embarcados.com.br/transformacao-y-delta-estrela-triangulo/>. Acesso em: 14 ago. 2024

FIORIO, R. Síntese E Caracterização De Poliuretano Termoplástico Contendo Poss Via Extrusão Reativa. *Acta Botanica Brasilica*, p. 1–115, 2011.

GARDINER, G. The making of glass fiber. *Composites Technology*, v. 15, n. 2, 2009.

GONÇALVES, A. P. B. et al. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE BLENDA DE PET RECICLADO/PEAD. *CEP*, v. 41650, p. 010, 2013.

HARPER, C. A.; PETRIE, E. M. *Plastics Materials and Processes*. [s.l.: s.n.].

ILLIG. IC-RV 74d. Disponível em: <https://www.illig.de/en-de/solutions/IC-RV-74d>. Acesso em: 23 ago. 2024

ISSO DIGITAL (Venâncio Aires - Rs). *Analizador de energia DMI P500R*. 2023.

Disponível

em: <https://isso.digital/produto/139/1?srsltid=AfmBOop9EYZPDp3PLXigahaQV-Wby2EAdQP1miLr0f-fGZGAhtPO0MkR>. Acesso em: 20 fev. 2025.

JAMES W. NILSSON, S. A. R. Circuitos elétricos. 10. ed. 10. ed. [s.l.] Pearson Education do Brasil Ltda., 2016.

KHRIPKO, Diana et al. Energy demand and efficiency measures in polymer processing: comparison between temperate and Mediterranean operating plants. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, v. 7, n. 2, p. 225-233, 2016.

LAWRENCE, A. et al. Specific energy consumption/use (SEC) in energy management for improving energy efficiency in industry: Meaning, usage and differences. *Energies*, v. 12, n. 2, 2019.

LI, H. *Fiberglass science and technology: Chemistry, characterization, processing, modeling, application, and sustainability*. [s.l: s.n.].

LIN, T. A.; LIN, J. H.; BAO, L. A study of reusability assessment and thermal behaviors for thermoplastic composite materials after melting process: Polypropylene/ thermoplastic polyurethane blends. *Journal of Cleaner Production*, v. 279, p. 123473, 2021.

MADAN, J. et al. Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: injection molding case study. *Journal of Cleaner Production*, v. 105, p. 157–170, out. 2015.

MALANGE, Francisco C. V.. *ELETROTÉCNICA - Material das Aulas Teóricas - Capítulo 3 - Circuitos Trifásicos*. 2018. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/#!/eletrotecnica>. Acesso em: 14 ago. 2024.

MANUFATURA Aditiva para Metais e Polímeros. [S. l.], 12 abr. 2021. Disponível em: <https://c2lab.com.br/blog-manufatura-aditiva-metais-e-polimeros/>. Acesso em: 15 mar. 2022.

MARCZAK, H. Energy Inputs on the Production of Plastic Products. *Journal of Ecological Engineering*, v. 23, n. 9, p. 146–156, 2022.

MARTINS, L.; CARDOSO, D. Produção de etilenoglicóis e derivados por reações catalíticas do óxido de eteno. *Química Nova*, v. 28, n. 2, p. 264–273, 2005.

NEUROTIKER. Poliuretano. 2008. Disponível em:

<https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Carbamate2.svg>. Acesso em: 20 nov. 2024

NUNO ALFREDO CARDEAL, G.; MANUEL DOS SANTOS OLIVEIRA BAPTISTA, R. Energy Consumption Modelling in the Injection Moulding Industry Mechanical Engineering Examination Committee. n. November, 2016.

OLIVEIRA, Carlos César Barioni de et al. Introdução a sistemas elétricos de potência: componentes simétricas. . São Paulo: Edgard Blucher. . Acesso em: 22 abr. 2025. , 1996

PESSEY, D. et al. Polymer composites for the automotive industry: Characterisation of the recycling effect on the strain rate sensitivity. *International Journal of Crashworthiness*, v. 13, n. 4, p. 411–424, 2008.

POLYMER Database. [S. l.], 10 jan. 2022. Disponível em:

<https://polymerdatabase.com/polymer%20index/home.html>. Acesso em: 17 out. 2022

RIBEIRO JÚNIOR, Prof. Dr. Seba Stião. Instalações Elétricas Prediais e Industriais I – Aula 2 - Circuitos Trifásicos(TE344). 2020. Disponível em:

https://www.eletrica.ufpr.br/sebastiao/wa_files/te344%20aula%2002%20-%20circuitos%20trifasicos.pdf. Acesso em: 19 ago. 2024

RUDOLPH, N.; KIESEL, R.; AUMNATE, C. Understanding Plastics Recycling. [s.l: s.n.].

SANTOS, J. H. D. S. PRODUÇÃO DE ETILENO GLICOL POR HIDROGENAÇÃO DOS ÁCIDOS OXÁLICO E GLICÓLICO UTILIZANDO CATALISADORES SUPOSTADOS A BASE DE RUTÊNIO. p. 1–23, 2017.

SILVA, D. F. DA et al. Blendas Poliméricas : Conceitos , Obtenção E Aplicações. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 8, n. 1, p. 58–77, 2016.

SIMON.KR. Oxidation p xylene. 2011. Disponível em:

https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Oxidation_p_xylene.svg. Acesso em: 20 nov. 2024.

STUART, Barbara H. Polymer Analysis. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

SUNTER, D. A. et al. The manufacturing energy intensity of carbon fiber reinforced polymer composites and its effect on life cycle energy use for vehicle door lightweighting. ICCM International Conferences on Composite Materials, v. 2015-July, n. July, 2015.

TROMBETTA, F. Elastômeros Termoplásticos. 2007.

TURLA, P. et al. Processing and Flexural Strength of Carbon Fiber and Glass Fiber Reinforced Epoxy-Matrix Hybrid Composite. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), v. 3, n. 4, p. 394–398, 2014

WEN, J.-S. et al. Study of Energy Consumption in the Injection Molding Process. Journal of Macromolecular Science, Part B, v. 56, n. 8, p. 553–567, 3 ago. 2017.

ZUO, X. et al. Liquid phase oxidation of p-xylene to terephthalic acid at medium-high temperatures: Multiple benefits of CO₂-expanded liquids. Green Chemistry, v. 12, n. 2, p. 260–26, 2010.

ZUO, X. et al. Liquid phase oxidation of p-xylene to terephthalic acid at medium-high temperatures: Multiple benefits of CO₂-expanded liquids. Green Chemistry, v. 12, n. 2, p. 260–26, 2010