



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

THAÍS ANGELO DE FARIAS

**ESTUDO DE RECICLADOS PLÁSTICOS E COMPÓSITOS
DE MATRIZ POLIMÉRICA RECICLADA: ANÁLISE DE
PROPRIEDADES E CUSTOS**

Recife
2024

THAÍS ANGELO DE FARIAS

**ESTUDO DE RECICLADOS PLÁSTICOS E COMPÓSITOS
DE MATRIZ POLIMÉRICA RECICLADA: ANÁLISE DE
PROPRIEDADES E CUSTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof^a. Dra. Carolina Lipparelli Morelli

Recife

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Farias, Thaís Angelo de.

Estudo de reciclados plásticos e compósitos de matriz polimérica reciclada:
análise de propriedades e custos / Thaís Angelo de Farias. - Recife, 2024.
95 p. : il., tab.

Orientador(a): Carolina Lipparelli Morelli

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Materiais -
Bacharelado, 2024.

Inclui referências, anexos.

1. Reciclagem. 2. Polipropileno. 3. Carbonato de cálcio. 4. Embalagens. 5.
Ráfia sintética. I. Morelli, Carolina Lipparelli. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

THAÍS ANGELO DE FARIAS

ESTUDO DE RECICLADOS PLÁSTICOS E COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA RECICLADA: ANÁLISE DE PROPRIEDADES E CUSTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em: 21/03/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dra. Carolina Lipparelli Morelli (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^ª. Dra. Dayanne Diniz de Souza (Examinadora)
Universidade Federal de Pernambuco

M.Sc. Rafael Gleymir Casanova da Silva (Examinador)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho a minha família, por ser fonte de amor e dedicação. Em especial, dedico à minha avó paterna, que apesar de não estar mais conosco, sempre estará presente nas minhas melhores lembranças.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre ouvir minhas preces, me oferecer conforto, estar sempre presente e jamais me abandonar, principalmente nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, Heron Farias e Rosilda Souza; ao meu irmão, Hallan Farias; e ao meu namorado Paulo Henrique, por cuidarem de mim nos mínimos detalhes, por dedicarem seu tempo, por doarem sua paciência e seu amor. Pelo constante esforço em me dar a melhor educação, os melhores exemplos e os maiores conselhos.

À Universidade Federal de Pernambuco por disponibilizar uma educação pública, federal, gratuita, de qualidade, fundamental para que eu pudesse me tornar a profissional que sou hoje.

A minha orientadora Prof. Dr^a Carolina Morelli por sua disponibilidade em me guiar neste trabalho, em dividir seus conhecimentos, e contribuir diretamente com o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus professores do curso de Engenharia de Materiais, em especial a professora Dr^a Magda Vieira e Dr^o Edval Araújo que me apoiaram em toda a graduação, me prepararam para os desafios acadêmicos e profissionais, e junto ao Eng.^o Thiago Varela confiaram na minha capacidade. Ao professor Dr^o Armando Shinohara e a professora Dr^a Dayanne Souza, pelo apoio durante o curso e TCC.

Às instituições e empresas que forneceram recursos técnicos, matérias-primas e infraestrutura, para que a pesquisa fosse realizada com sucesso. E aos técnicos de laboratório e atendentes comerciais, que me auxiliaram nas análises e na troca conhecimento científico.

Aos meus amigos pessoais: Adrielly Frazão, Amanda dos Santos, Clara Vitória Silva, Emerson Silva, Gisele Alves, Ítalo Aquino, Mauro César, Paloma Farias, Pamela Farias, Pamela Silva, Ramon Aquino e Vanilly Soares.

Aos meus amigos da universidade, em especial a Hugo Cavalcanti e a Mycael Dias, que partilharam comigo diversos momentos de emoção, e também pelo constante apoio, cumplicidade, incentivo e até mesmo os longos dias e noites de estudo compartilhado, muito obrigada por percorrerem esse caminho comigo.

Aos meus amigos e colegas de trabalho: Adalberto Ramos, Daniel Gondim, Fabio Almeida, Filipe Carneiro, Giovanna Menezes, Jonathan Buarque, Kaline Souza, Renan Silva, Romero Batista e Yasmim Damasceno, que sempre me apoiaram e

acreditaram em mim. Ao Eng.º Deividi Colvara, por se dedicar tanto ao meu aprendizado profissional, por me abrir tantas portas, me entregar desafios e acreditar constantemente na minha capacidade de superá-los.

A professora Dr^a Giovanna Machado que me orientou durante a graduação, e me ensinou tanto sobre educação, resiliência e autoconfiança. Assim como a Téc. Isabella Santos, M.Sc Jeice Marques, Ph.D Larissa Santa Cruz, M.Sc Letícia Bazante, M.Sc Paloma Barreto e M.Sc Rhauane Galvão, obrigada por fazerem parte dessa história, assim como os demais colegas e amigos que fiz no CETENE.

Que este agradecimento expresse minha profunda gratidão a todos os que estiveram ao meu lado nessa jornada acadêmica. Que esta conquista seja apenas o começo de muitos outros desafios e realizações que estão por vir. Meu muito obrigada a todos vocês!

Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações (BRASIL, 1988).

RESUMO

Os plásticos são resistentes, leves e versáteis, podendo ser utilizados em diversas aplicações industriais como: instrumentos cirúrgicos, dispositivos eletrônicos, peças automotivas, móveis, utilidades domésticas e embalagens. Contudo, sua utilização enfrenta desafios socioambientais, devido ao consumo excessivo e descarte inadequado, provocando a poluição urbana, hídrica e atmosférica. O uso de plásticos reciclados pós-consumo (PCRs) surge como uma alternativa acessível, que promove uma gestão sustentável de resíduos, gera uma menor pegada de carbono, reduz o consumo de recursos naturais e é economicamente viável para mitigar esses problemas. A partir disto, este estudo avaliou o desempenho e características de um PCR de polipropileno de embalagens, advindas de resíduos sólidos urbanos, e de um PCR de embalagens de rafia sintética aplicadas à agricultura. Ambos foram comparados a um polipropileno (PP) virgem, e a compósitos obtidos a partir da incorporação do carbonato de cálcio aos PCRs. Para realizar a caracterização das amostras foram utilizadas técnicas morfológicas, químicas, térmicas, físicas e reológicas. O estudo revelou que a incorporação do composto de carbonato de cálcio tende a aumentar a cristalinidade dos PCRs, corroborando com o comportamento de um agente nucleante. Os reciclados apresentaram uma maior resistência térmica em relação ao *grade* de PP virgem avaliado. O índice de fluidez se manteve relativamente estável com adição do carbonato de cálcio, o que ajuda a manter os parâmetros de processamento da moldagem por injeção. Os PCRs apresentaram uma resistência à flexão semelhante à do PP virgem, e ganhos em rigidez entre 2,3% e 22,72% foram observados nos compósitos. Para estes houve uma redução em suas resistências à tração em relação aos PCRs sem carga, variando entre 5,72% e 14,54%. Foi observada uma redução de custo acima de 20% ao substituir o PP virgem pelos PCRs. A adição de carga promoveu uma nova redução variando entre 24,40% e 27,26% em relação ao PP virgem. Diante disto, nas condições avaliadas, os PCRs apresentaram propriedades satisfatórias para a substituição do PP virgem em diversos tipos de aplicações, se apresentando como uma alternativa viável para o meio ambiente, sociedade e empresas.

Palavras-chaves: Reciclagem; Polipropileno; Carbonato de cálcio; Embalagens; Rafia sintética.

ABSTRACT

Plastics are resistant, light and versatile, and can be used in various industrial applications such as surgical instruments, electronic devices, automotive parts, furniture, household appliances and packaging. However, their use faces socio-environmental challenges due to excessive consumption and improper disposal, causing urban, water and air pollution. The use of post-consumer recycled plastics (PCRs) has emerged as an affordable alternative that promotes sustainable waste management, generates a lower carbon footprint, reduces the consumption of natural resources and is economically viable for mitigating these problems. Therefore, this study evaluated the performance and characteristics of a PCR made from polypropylene packaging from solid urban waste and a PCR made from synthetic raffia packaging applied to agriculture. Both were compared to virgin polypropylene (PP) and to composites obtained by incorporating calcium carbonate into the PCRs. Morphological, chemical, thermal, physical and rheological techniques were used to characterize the samples. The study revealed that the incorporation of the calcium carbonate compound tended to increase the crystallinity of the PCRs, corroborating the behavior of a nucleating agent. The recycled materials showed greater thermal resistance than the virgin PP grade evaluated. The flow index remained relatively stable with the addition of calcium carbonate, which helps to maintain the processing parameters for injection molding. The PCRs showed similar flexural strength to virgin PP, and stiffness gains of between 2.3% and 22.72% were observed in the composites. For these, there was a reduction in their tensile strength compared to the unloaded PCRs, ranging from 5.72% to 14.54%. A cost reduction of over 20% was observed when replacing virgin PP with PCRs. The addition of filler led to a further reduction of between 24.40% and 27.26% compared to virgin PP. Therefore, under the conditions evaluated, the PCRs showed satisfactory properties for replacing virgin PP in various types of applications, presenting themselves as a viable alternative for the environment, society and companies.

Keywords: Recycling; Polypropylene; Calcium carbonate; Packaging; Synthetic raffia.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de regiões cristalinas e amorfas dos polímeros.	25
Figura 2 - Principais resinas plásticas consumidas no Brasil em 2022 (%).	26
Figura 3 - Estrutura do polipropileno.	27
Figura 4 - Taticidade do polipropileno.	28
Figura 5 - Exemplo de estrutura de um esferulito.	28
Figura 6 - Ilustração das fases de um compósito.	29
Figura 7 - Polimorfismo do carbonato de cálcio.	31
Figura 8 - Histórico do índice de reciclagem de plásticos pós-consumo.	33
Figura 9 - Origem do resíduo plástico utilizada na reciclagem em 2020.	33
Figura 10 - Geração de resíduo urbano por região em 2022.	34
Figura 11 - Tipos de reciclagens.	35
Figura 12 - Fluxograma da reciclagem de resíduos sólidos.	36
Figura 13 - Processos produtivos utilizados para fabricar transformados plásticos em 2020.	37
Figura 14 - Curva característica de decomposição térmica de única etapa.	40
Figura 15 - Pellets da resina virgem H301.	44
Figura 16 - Resíduos sólidos pós-consumo coletados.	45
Figura 17 - Pellets dos PCRs.	46
Figura 18 - Composto de carbonato de cálcio.	46
Figura 19 - Dimensões do corpo de prova.	49
Figura 20 - Metalizador SC7620 da Quorum.	51
Figura 21 - EDS acoplado ao MEV.	51
Figura 22 - Amostras posicionadas no suporte para amostras “stub” do MEV.	52
Figura 23 - Micrografias do PP e dos PCRs sem adição de carga, ampliados em 2000x e 5000x.	55
Figura 24 - Fotomicrografias dos PCRs com adição de carga, ampliados em 2000x e 5000x.	57
Figura 25 - Fotomicrografias dos PCRs com adição de carga, ampliados em 10000x e 20000x.	58
Figura 26 - Micrografias dos PCRs com adição de carga, ampliados em 20000x e 50000x.	60

Figura 27 – Espectros de FTIR das amostras entre 4000 cm^{-1} e 650 cm^{-1}	61
Figura 28 - Espectros no infravermelho com identificação dos picos na região de varredura de 4000 a 2500 cm^{-1}	63
Figura 29 - Espectros no infravermelho com identificação dos picos na região de varredura de 2000 a 650 cm^{-1}	63
Figura 30 - Teor de sólidos teórico e nominal após a calcinação.	64
Figura 31 - Curvas de TG e DTG das amostras entre 30°C e 600°C.....	68
Figura 32 - Curva de TG e DTG para o PCR1-20CN e PCR2-20CN.	69
Figura 33 – Dados obtidos a partir do ensaio de resistência à flexão.	71
Figura 34 – Dados obtidos a partir do ensaio de resistência à tração.	72
Figura 35 – Simulação de custo (R\$) da matéria-prima utilizada em um ano.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Identificações e composições utilizadas nas análises.	43
Tabela 2 - Propriedades obtidas da folha de dados do H301.	44
Tabela 3 - Resumo dos reciclados selecionados no mercado.	45
Tabela 4 - Intervalos de corte de filamento.	47
Tabela 5 - Parâmetros de controle de injeção das amostras.	49
Tabela 6 - Composição química do PCR1 e PCR2 obtida por EDS.	56
Tabela 7 - Composição química do PCR1-10CN, PCR1-20CN, PCR2-10CN e PCR2-20CN obtida por EDS.	59
Tabela 8 - Números de onda e ligações correspondentes ao CaCO_3 pela análise de FTIR.	61
Tabela 9 - Números de onda e ligações correspondentes ao polipropileno, polietileno e hidroxila pela análise de FTIR.	62
Tabela 10 - Temperaturas e entalpias de fusão para o primeiro aquecimento.	65
Tabela 11 - Temperaturas e entalpias de fusão para o segundo aquecimento.	65
Tabela 12 - Teor de polietileno nas amostras no segundo aquecimento.	66
Tabela 13 - Temperaturas de cristalização (T_c) e grau de cristalinidade da fase etileno (X_{c1}) e da fase propileno (X_{c2}) das amostras.	67
Tabela 14 - Dados obtidos a partir dos gráficos de TG e DTG entre 30°C e 600°C	69
Tabela 15 - Dados obtidos para a degradação térmica da carga mineral entre 30°C e 900°C	69
Tabela 16 - Dados obtidos por meio da medida de índice de fluidez.	70
Tabela 17 - Redução de custo em relação ao uso de 100% de resina virgem a partir de dados de 2024.	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%Wt	Porcentagem em peso
Abiplast	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ASTM	American Society for Testing and Materials
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DTG	Termogravimetria derivada
EDS	Espectroscopia de Dispersão de Energia
EPS	Poliestireno expansível
FTIR-ATR	Espectroscopia de Absorção no Infravermelho com Transformada de Fourier por Reflexão Total Atenuada
IF	Índice de Fluidez
I-Litpeg	Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia
INTM	Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais
Kg	Quilo
LAC	Laboratório de Combustíveis
LO	Comprimento
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PCR	Reciclados pós-consumo
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEBDL	Polietileno de Baixa Densidade Linear
PET	Politereftalato de Etileno
PIR	Pós-industrial
PP	Polipropileno homopolímero
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinila
RSU	Resíduos sólidos urbanos
T _{endset}	Temperatura final da degradação térmica
T _f	Temperaturas de fusão
T _{f1}	Temperatura de fusão do primeiro aquecimento

T _{f2}	Temperatura de fusão do segundo aquecimento
TG	Termogravimetria
T	Espessura
T _{onset}	Temperatura de início da degradação térmica
UD	Utilidades Domésticas
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UNEP	United Nations Environment Programme
W	Largura
W _p	Fração em peso do polímero
X _c	Índice de cristalinidade do polímero em %
ΔH _{PE}	Entalpia de fusão do Polietileno
ΔH _{100%}	Entalpia de fusão teórica do polímero hipoteticamente 100% cristalino
ΔH _f	Entalpia de fusão da amostra sob análise
ΔH _{f1}	Entalpia de fusão do primeiro aquecimento
ΔH _{f2}	Entalpia de fusão do segundo aquecimento
ΔH _{total}	Entalpia de fusão total do material

LISTA DE SÍMBOLOS

β	Beta
Δ	Delta
λ	Lambda
μ	Mi
R\$	Real brasileiro

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	21
2.	OBJETIVOS	23
2.1.	OBJETIVO GERAL	23
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
3.1.	POLÍMEROS	25
3.1.1.	Polipropileno	27
3.2.	COMPÓSITOS	29
3.2.1.	Carbonato de cálcio	30
3.3.	RECICLAGEM DE TERMOPLÁSTICOS E PANORAMA DO POLIPROPILENO	31
3.4.	TIPOS DE RECICLAGEM	35
3.5.	PROCESSAMENTO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	37
3.6.	ANÁLISE E CONTROLE DE QUALIDADE.....	38
3.6.1.	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e termogravimetria (TG)	39
3.6.2.	Espectroscopia de infravermelho (FTIR)	40
3.6.3.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS)	41
3.6.4.	Resistência à tração e à flexão	41
3.6.5.	Índice de fluidez, umidade e teor de sólidos	42
4.	METODOLOGIA	43
4.1.	MATERIAIS	43
4.1.1.	Polipropileno	44
4.1.2.	Reciclados	45
4.1.3.	Carbonato de Cálcio	46
4.2.	MÉTODOS.....	47

4.2.1. Índice de Fluidez (IF)	47
4.2.2. Teor de sólidos e Teor de umidade.....	48
4.2.3. Processamento da resina virgem e compósitos.....	48
4.2.4. Ensaio de resistência à tração e à flexão	49
4.2.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com EDS.....	50
4.2.6. Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)..	52
4.2.7. Termogravimetria (TG)	52
4.2.8. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	53
4.2.9. Análise de custo	53
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA POR ENERGIA DISPERSIVA (EDS)	55
5.2. ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	60
5.3. TEOR DE SÓLIDOS	64
5.4. CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC).....	64
5.5. TERMOGRAVIMETRIA (TG).....	68
5.6. ÍNDICES DE FLUIDEZ ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	70
5.7. ANÁLISE DE CUSTO	73
6. CONCLUSÃO.....	75
REFERÊNCIAS	77
ANEXO A - VALORES DE FLEXÃO E TRAÇÃO DO PP	86
ANEXO B - VALORES DE FLEXÃO E TRAÇÃO DO PCR1.....	87
ANEXO C - VALORES DE FLEXÃO E TRAÇÃO DO PCR2.....	88
ANEXO D - VALORES DE FLEXÃO E TRAÇÃO DO PCR1-10CN	89
ANEXO E - VALORES DE FLEXÃO E TRAÇÃO DO PCR1-20CN	90
ANEXO F - VALORES DE FLEXÃO E TRAÇÃO DO PCR2-10CN.....	91
ANEXO G - VALORES DE FLEXÃO E TRAÇÃO DO PCR2-20CN	92

ANEXO H – GRÁFICOS OBTIDOS NO ENSAIO DE DSC PARA O PP E RECICLADOS.....	93
ANEXO I – GRÁFICOS OBTIDOS NO ENSAIO DE DSC PARA O PCR1 COM ADIÇÃO DE CARGA MINERAL.....	94
ANEXO J – GRÁFICOS OBTIDOS NO ENSAIO DE DSC PARA O PCR2 COM ADIÇÃO DE CARGA MINERAL.....	95

1. INTRODUÇÃO

O plástico é um material presente em todos os aspectos da vida social, sendo uma alternativa resistente, leve, inerte, versátil, prática, reciclável e de menor custo, em relação a outros materiais tais como os metais. Atualmente o plástico é largamente utilizado nas indústrias automotivas, de embalagens, de alimentos e de instrumentos cirúrgicos, por exemplo, oferecendo muitos benefícios para a sociedade e para as empresas (VALGROUPECO, 2022).

A versatilidade de propriedades e aplicações dos plásticos reflete no seu consumo elevado. Foi calculado que no ano de 2019 a produção de plástico virgem atingiu 460 milhões de toneladas, e é previsto que até 2060, a produção oriunda de combustíveis fósseis, atinja 1,2 bilhão de toneladas (OECD, 2022a; OECD, 2022b). Contudo, o descarte indevido aliado ao grande consumo de embalagens de curto tempo de vida útil se tornou um grande problema. Segundo o relatório Plastic Waste Makers Index, a população mundial gerou 139 milhões de toneladas de resíduos plásticos de uso único só em 2021 (MINDEROO FOUNDATION, 2023).

Em 2022, a United Nations Environment Programme (UNEP) estabeleceu o primeiro projeto de resolução global para combater a poluição plástica, com a participação de 175 estados membros, incluindo o Brasil (UNEP, 2022). Esse estímulo para a redução do uso do plástico se alia à reciclagem e a reutilização, temas relevantes globalmente e que proporcionam inúmeras vantagens tanto para as empresas quanto para a sociedade.

A reciclagem do plástico propicia a sustentabilidade e tem o potencial de reduzir custos de processos industriais, além de contribuir para uma imagem corporativa positiva perante consumidores e instituições preocupadas com a preservação ambiental. No Brasil, em 2020, a reciclagem gerou cerca de 13.180 empregos distribuídos em 1.119 empresas, produzindo aproximadamente 884,4 mil toneladas de resina pós-consumo, gerando um faturamento de cerca de 3,1 bilhões de reais. Além disso, o plástico reciclado contribui para a preservação de recursos naturais ao reduzir a demanda por matérias-primas à base de petróleo e a energia necessária para sua extração e refino (ABIPLAST, 2021).

Contudo, a reciclagem avança a passos lentos. O alto volume de produção de resina virgem aumenta significativamente o risco de descarte inadequado em aterros, rios e oceanos, como apontado pela MINDEROO FOUNDATION (2023). Conforme

relatório da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) (2019), apenas 9% dos 353 milhões de toneladas de resíduos plásticos gerados globalmente foram reciclados. Ao passo que 50% foram levados a aterros controlados, e 22% foram incinerados ou lançados em aterros ilegais.

As empresas que trabalham produzindo itens plásticos, consomem um alto volume de resina virgem mensalmente. Se esta for substituída em sua grande parte por resina reciclada, poderá ser evitado um maior consumo de matérias-primas não-renováveis (IKEA SWITZERLAND, 2017). Associado a isso, os reciclados podem apresentar um bom desempenho em propriedades mecânicas e aspectos visuais, podendo substituir em até 100% a resina virgem, a depender do tipo de aplicação.

A incorporação de cargas minerais ao reciclado, gera um compósito que pode até mesmo superar as propriedades encontradas em resinas virgens, apresentando-se assim, como uma alternativa em aplicações que exigem uma maior resistência mecânica com menor custo. Uma das cargas mais utilizadas é o carbonato de cálcio, devido ao seu baixo custo e funcionalidade, sendo o estudo de sua aplicação aos materiais poliméricos, de grande importância para a expansão do uso dos reciclados.

Portanto, fica evidente a responsabilidade social e ambiental em promover a reciclagem e incentivar o consumo de resinas recicladas. Para tanto, o presente trabalho apresenta os resultados do estudo de reciclados de polipropileno e de seus compósitos, produzidos a partir de um composto de carbonato de cálcio, a fim de caracterizá-los (a partir de análises térmicas, morfológicas, químicas, físicas e reológicas) e compará-los com um polipropileno virgem.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Realizar uma análise comparativa entre reciclados de polipropileno com e sem incorporação de carga mineral, em relação a uma resina virgem. Além de investigar a viabilidade de aprimorar as propriedades mecânicas dos reciclados de embalagens pós- consumo urbanas e de embalagens de rafia sintética do meio agrícola, por meio da adição de cargas reforçantes, como forma de incentivo à ampliação do uso de matérias-primas mais sustentáveis.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

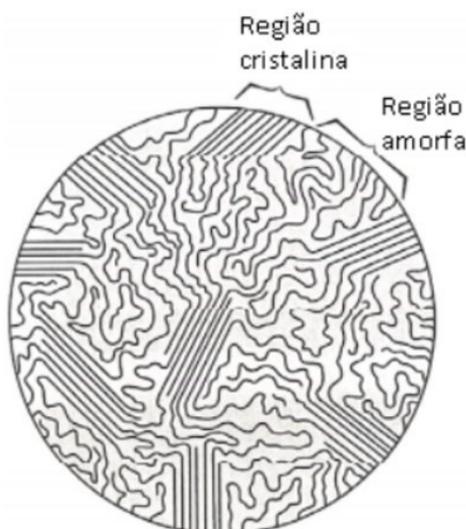
- Formular compósitos com materiais reciclados e carga mineral em diferentes proporções;
- Avaliar o impacto da adição de carga reforçante aos reciclados, visando a melhoria de suas propriedades mecânicas;
- Realizar caracterizações e comparar as amostras entre si, em relação às propriedades físicas, termoanalíticas, estruturais e mecânicas;
- Fornecer perspectivas sobre a viabilidade de uso dos compósitos de matriz reciclada em relação às resinas virgens, com foco no desempenho, custo e sustentabilidade.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. POLÍMEROS

Os polímeros são materiais constituídos por longas moléculas formadas por unidades de repetição denominadas de meros, unidas entre si por ligações covalentes. Podem ser amorfos ou semicristalinos, sendo, neste último caso, formados por cristalitos de cadeias ordenadas, dispersos em regiões amorfas (Figura 1), de cadeias desordenadas. A reação de síntese dos polímeros utiliza como ponto de partida os “monômeros”, isto é, moléculas com uma única unidade de repetição (mono). O tipo de ligação, o número médio de meros por cadeia, o tipo do monômero e as propriedades mecânicas, permitem classificar os polímeros de várias formas, dentre elas em: elastômeros, fibras e plásticos (Canevarolo, 2006).

Figura 1 - Exemplo de regiões cristalinas e amorfas dos polímeros.



Fonte: Callister (2002).

Os elastômeros são polímeros que podem ser deformados até pelo menos duas vezes o seu comprimento original, voltando à dimensão inicial após a retirada da tensão. Plásticos são materiais poliméricos subdivididos em termofixos e termoplásticos. Os termoplásticos possuem a capacidade de amolecer e fluir dado um aumento de pressão e temperatura. Após a retirada da alta temperatura e pressão, o termoplástico solidifica-se e pode, posteriormente, ser novamente amolecido com a aplicação das condições anteriores. Termofixos, ao contrário, uma vez constituídos a partir de ligações covalentes intermoleculares, não recuperam suas capacidades de fluir. Fibras, por sua vez, são termoplásticos com as cadeias em orientação

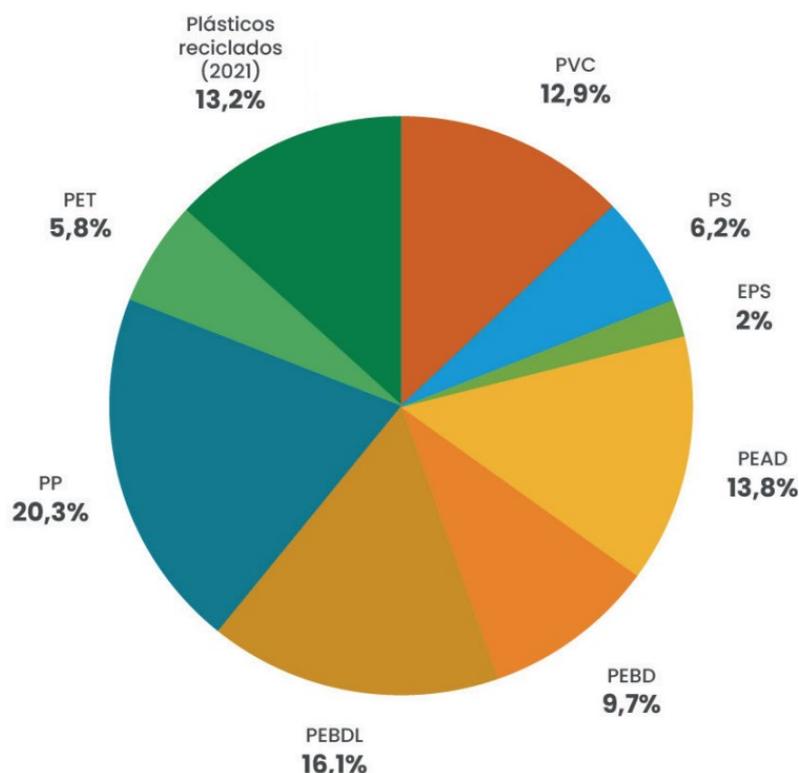
longitudinal e uma relação entre comprimento e diâmetro (razão de aspecto) de, pelo menos, 100 vezes (Canevarolo, 2006).

A Figura 2 apresenta a relação de resinas termoplásticas mais consumidas em 2022, chamando atenção para o Polietileno (PE), correspondendo a 39,6% do total, muito utilizado em garrafas, filmes e recipientes em geral; o Policloreto de Vinila, correspondendo a 12,9% do total, aplicado em recipientes de produtos químicos, espumas e vedações; e para os plásticos diversos reciclados, que corresponderam a 13,2% do total. Já o Polipropileno (PP), que correspondeu a 20,3% do total de resinas plásticas consumidas, é utilizado principalmente em itens moldados por injeção, extrusão e sopro para uso em embalagens, móveis plásticos, cuidados pessoais e alimentação (Biron, 2013).

Considerando o alto consumo do polipropileno, o presente trabalho visou estudar o reaproveitamento de reciclados desse material.

Figura 2 - Principais resinas plásticas consumidas no Brasil em 2022 (%).

PEBD: Polietileno de Baixa Densidade; PEBDL: Polietileno de Baixa Densidade Linear; PEAD: Polietileno de Alta Densidade; PP: Polipropileno; PS: Poliestireno; EPS: Poliestireno Expansível; PVC: Policloreto de Vinila; PET: Politereftalato de Etileno.

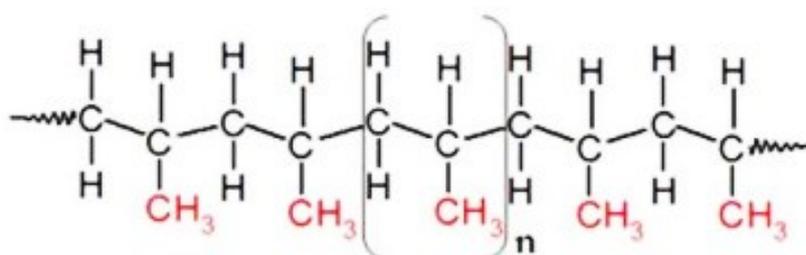


Fonte: ABIPLAST (2023).

3.1.1. Polipropileno

O Polipropileno (PP) é um termoplástico formado pela polimerização do monômero propileno. Esta poliolefina é obtida a partir do nafta do petróleo, uma fonte fóssil não renovável. A reação de síntese é do tipo poliadição, em que calor, radiação e um iniciador são adicionados para combinar os monômeros. O resultado são longas cadeias de polipropileno, cuja estrutura pode ser encontrada na Figura 3, a seguir (Maddah, 2016).

Figura 3 - Estrutura do polipropileno.



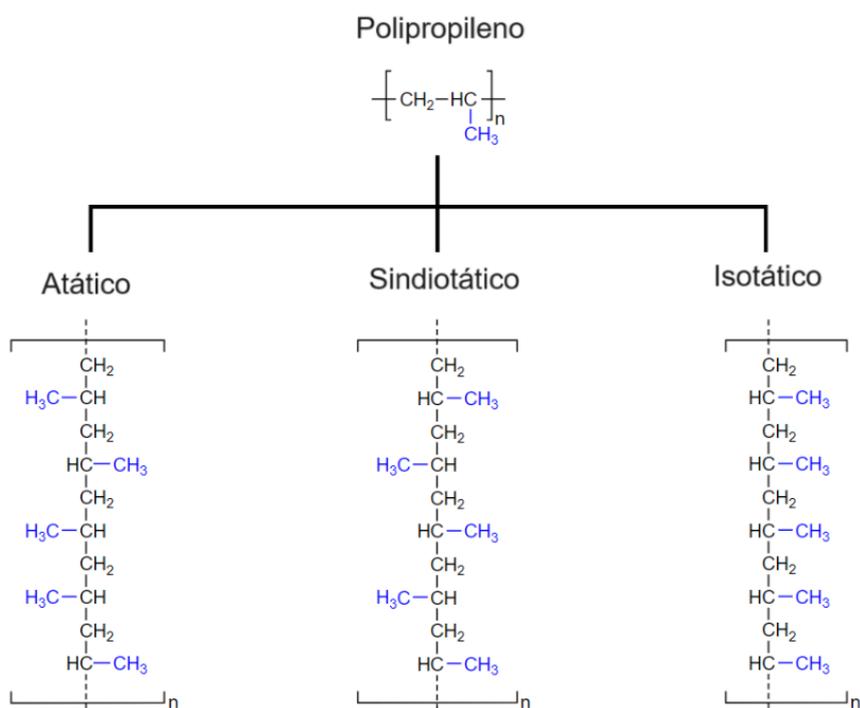
Fonte: Maddah (2016).

Com relação à disposição de seu grupo lateral -CH₃, os PPs podem ser atáticos, sindiotáticos e isotáticos (Figura 4), o que afeta diretamente suas propriedades físicas, aumentando ou diminuindo sua cristalinidade. A configuração isotática é a mais comercializada, sendo a mais cristalina e a mais resistente mecanicamente (Macedo, 2021).

Um maior grau de cristalinidade confere ao polipropileno maior estabilidade dimensional, resistência química, densidade e uma maior rigidez (Manrich, 2005). A estrutura associada à cristalização mais comum é o esferulito (Figura 5), formado por agregados de lamelas (cadeias poliméricas dobradas entre si) ligadas por cadeias amorfas, que crescem ao redor de um ponto central, chamado de sítio de nucleação (Callister, 2016).

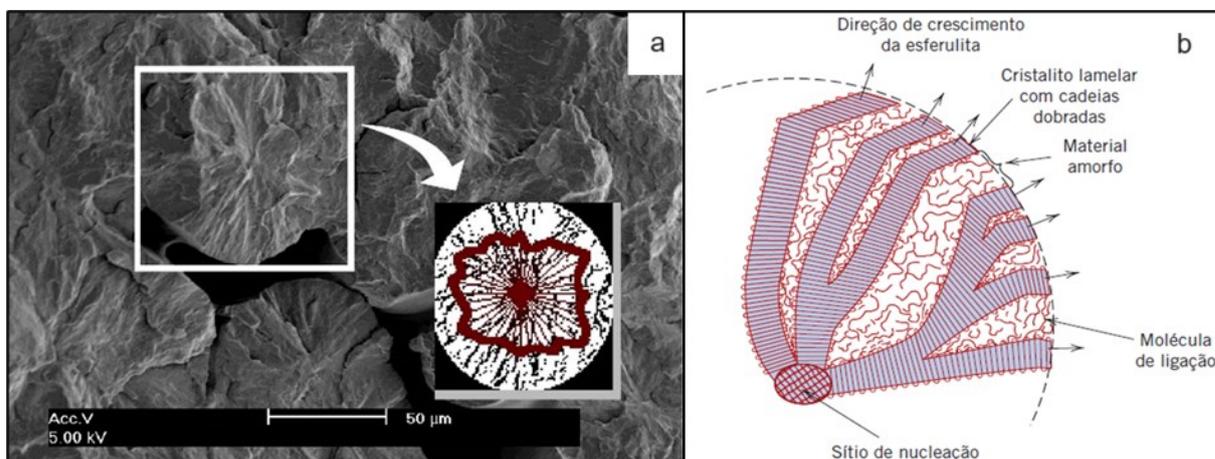
O polipropileno possui características relevantes, sendo utilizado como matéria-prima nos mais variados artigos plásticos, como por exemplo: embalagens, produtos automotivos, produtos eletrônicos, móveis plásticos, tubos e conexões (BRASKEM, 2023). Sua alta aplicação se deve às suas propriedades: resistência química, resistência ao impacto, fácil processamento e pigmentação, bom isolamento térmico e elétrico, além de ser leve, atóxico e reciclável (Macedo, 2021).

Figura 4 - Taticidade do polipropileno.



Fonte: Adaptado de Tripathi (2002).

Figura 5 - Exemplo de estrutura de um esferulito.



Fonte: (A) Machado *et al.* (2011) e (B) Callister (2006).

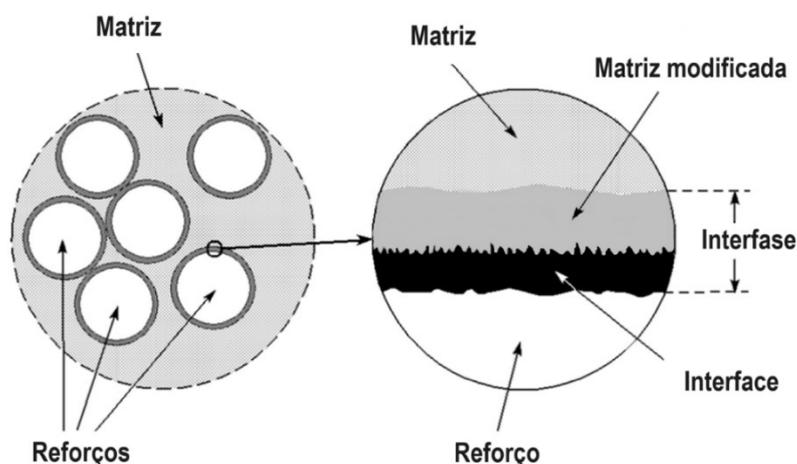
Este polímero é um dos mais utilizados dentre as poliolefinas, seu valor de mercado global em 2022 foi avaliado em US\$ 123,46 bilhões, pouco mais de 48% acima do valor calculado em 2021 (GRAND VIEW RESEARCH, 2022; GRAND VIEW RESEARCH, 2023). Segundo estimativas do Relatório de Análise de Mercado do Grand View Research de 2023, empresa de consultoria e pesquisa de mercado, o consumo de PP continuará crescendo ainda mais nos próximos anos.

Uma das formas de melhorar as propriedades mecânicas ou térmicas do polipropileno, ou simplesmente reduzir o custo de produtos confeccionados com esse material, é através da incorporação de cargas ou reforços, constituindo materiais compósitos.

3.2. COMPÓSITOS

Segundo Clyne e Hull (2019), os materiais compósitos são formados pela combinação insolúvel de dois ou mais macro-componentes. Estes componentes podem possuir diferentes morfologias, composições, estruturas e propriedades, gerando um aprimoramento das características do compósito em relação aos constituintes individuais. Estes materiais multifásicos são em geral, formados por uma matriz (fase contínua) e um reforço (fase dispersa) separados por uma interfase, formada pela interação química entre as duas fases (Figura 6).

Figura 6 - Ilustração das fases de um compósito.



Fonte: Adaptado de Cech, Palesch e Lukes (2013).

Segundo Callister (2002), a matriz é responsável por gerar a coesão, garantir a proteção e transmitir os esforços mecânicos para o reforço. Pode ser classificada como: matriz metálica, matriz cerâmica ou matriz polimérica. A fase dispersa é responsável pelas propriedades mecânicas conferidas ao compósito. Que podem ser classificados em: particulados, fibras descontínuas ou fibras contínuas, podendo formar estruturas laminadas ou em sanduíche com a matriz.

Frequentemente é útil modificar algumas propriedades dos polímeros para melhorar a qualidade do produto. É o caso do polipropileno, que pode receber cargas, que surgem como materiais sólidos, não solúveis, promovendo redução de custos e/ou alterando as propriedades físicas do material (Melo, 2021).

As cargas ativas, ou reforçantes, promovem um alto grau de reforço, melhorando algumas propriedades dos polímeros, como a resistência à tração, resistência à flexão e resistência ao impacto. Podem ser usadas pela: disponibilidade, modificação/melhoramento de propriedades, facilitação do processamento, compatibilidade com os plásticos, redução de custos, dentre outras características (Rabello e Paoli, 2013). O carbonato de cálcio é uma das cargas mais utilizadas em compósitos poliméricos, conforme comentado a seguir.

3.2.1. Carbonato de cálcio

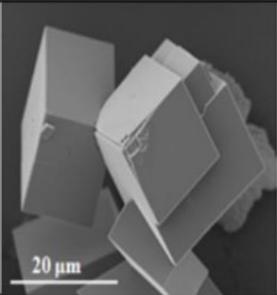
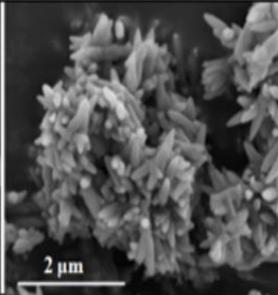
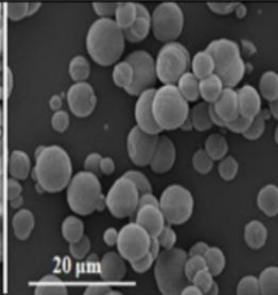
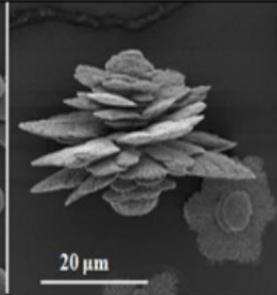
De acordo com Sampaio (2021) e Maria (2019) dentre os reforços particulados, o carbonato de cálcio (CaCO_3) é amplamente utilizado como uma carga mineral incorporada às matrizes poliméricas, tendo potencial de gerar um aumento significativo das propriedades mecânicas do polímero (ex.: aumento da rigidez/módulo de flexão), além da contribuição financeira devido ao seu baixo custo, sua fácil aplicação, sua não abrasividade, sua atoxicidade e sua facilidade de ser pigmentado.

O carbonato de cálcio é encontrado na natureza sob a forma de aragonita (ortorrômbica), calcita (romboédrica ou trigonal) e vaterita (hexagonal) conforme a Figura 7. A calcita, o calcário e o mármore que dão origem a esse material, podem ser constituídos apenas por calcita (CaCO_3) ou pela mistura entre calcita e dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), podendo conter ferro (Fe), fósforo (P), enxofre (S), óxidos de alumínio (Al_2O_3) e sílica (SiO_2) (Maria, 2019).

A fase cristalina calcita é a mais encontrada e mais estável em temperatura e pressão ambiente. Contudo a formação da aragonita está relacionada com condições físico-químicas específicas devido ao seu rápido crescimento de cristais, quando comparado a calcita, sendo frequentemente encontrada em calcários resultantes de águas termais. Os diversos fatores que levam a obtenção da aragonita e vaterita, dependem do pH, da atmosfera, da temperatura, da pressão e da supersaturação durante sua precipitação. Em altas pressões e baixas temperaturas, é preferível

termodinamicamente a formação da aragonita, enquanto em condições de superfície a formação da calcita é preferível (Han, 2005; Bessler e Rodrigues, 2008).

Figura 7 - Polimorfismo do carbonato de cálcio.

	Cúbica	Vara	Esfera	Flor
Formas do CaCO ₃				
A	2-20 µm	2,1- 3 µm	0,2 - 5 µm	20-100 µm
B	Calcita (β -CaCO ₃)	Aragonita (λ -CaCO ₃)	Vaterita (μ -CaCO ₃)	Vaterita (μ -CaCO ₃)
C	Romboédrica	Ortorrômbica	Hexagonal	Hexagonal

Obs.: A: diâmetro médio, B: fase cristalina e C: sistema cristalino.

Fonte: Adaptado de Souza *et al.* (2020).

3.3. RECICLAGEM DE TERMOPLÁSTICOS E PANORAMA DO POLIPROPILENO

Os plásticos convencionais levam entre 20 e 500 anos para se decompor na natureza, variando conforme a estrutura física dos resíduos e dos fatores ambientais aos quais estão expostos (Hughes, 2022). Tal característica aliada ao consumo de petróleo para sua produção, um recurso fóssil e não renovável, contribui com os desafios ambientais já existentes.

A reciclagem, que é um método de reprocessamento e reutilização de produtos que outrora foram descartados no meio ambiente por serem considerados inutilizáveis (Lomasso *et al.*, 2015), surge como um dos métodos de gerenciar resíduos e evitar o consumo desenfreado dos recursos naturais, apoiando a redução dos impactos ambientais.

Como forma de promover o uso de reciclados pós-consumo (PCR, Post-Consumer Recycled) e incentivar a reciclagem, muitos trabalhos científicos surgiram nos últimos anos, apresentando novas aplicações, novas técnicas de reciclagem, ou aprimoramento das já existentes para os reciclados termoplásticos.

Martins, Suarez e Mano (1999) pesquisaram sobre poliolefinas recicladas com desempenhos superiores aos materiais virgens de origem, analisando as

propriedades mecânicas do IMAWOOD e IMACAR obtidas de resíduos sólidos urbanos (sacos e sacolas plásticas) e para-choques de carros. Fernandes e Domingues (2007) produziram um trabalho de caracterização do polipropileno reciclado advindos de para-choques com aplicação na indústria automotiva. Seu trabalho obteve resultados promissores para o uso de até 30% de reciclado.

Em 2003, Guedes estudou o desenvolvimento de um processo de reciclagem para o poliuretano, promovendo a utilização destes resíduos industriais em pisos de academias de ginástica e pistas de atletismo. Mrozinski, Steffen e Meurer (2017), analisaram o uso de PET reciclado na indústria têxtil, identificando uma adesão significativa das empresas em práticas ligadas a questões socioambientais.

O incentivo ao uso também parte da indústria. Em 2020 a empresa Natura Cosméticos S.A. lançou o produto KAIK Oceano, que utiliza até 50% de plástico reciclado em sua embalagem (NATURA, c2024). A Microsoft Corporation em parceria com a Saudi Basic Industries Corp. (SABIC) lançou em 2022, o *Microsoft Ocean Plastic Mouse*, produzido com 20% de plástico reciclado, em uma embalagem 100% reciclável feita de fibras de madeira e cana-de-açúcar (Alcântara, 2022).

Desde 2012, a Ford Motor Company adicionou em seus carros SUV, carpetes e tapetes de PET (Politereftalato de etileno) reciclado, no qual cada EcoSport vendido no Brasil utiliza 470 garrafas plásticas (REDAÇÃO AB, 2019). A Tramontina S.A. além de utilizar reciclados termoplásticos em seus produtos, como móveis plásticos e utilidades domésticas (UD) (TRAMONTINA, c2024); também utiliza embalagens celulósicas recicladas, e sacarias com 90% de PCR advinda do programa de logística reversa em parceria com a Plastiweber (REDAÇÃO, 2023).

Contudo, um dos motivos para essa ação socioambiental não ser mais difundida, é por conta da viabilidade econômica. Em 2005, a reciclagem ainda não representava um alto retorno financeiro, sendo necessário reduzir a tributação, como forma de incentivo à atividade (Spinacé e Paoli, 2005). Apenas recentemente foi criada a Lei de Incentivo à Reciclagem (n° 14.246/21) estabelecendo incentivos fiscais e benefícios para que catadores, cooperativas e indústrias pudessem seguir trabalhando com a reciclagem.

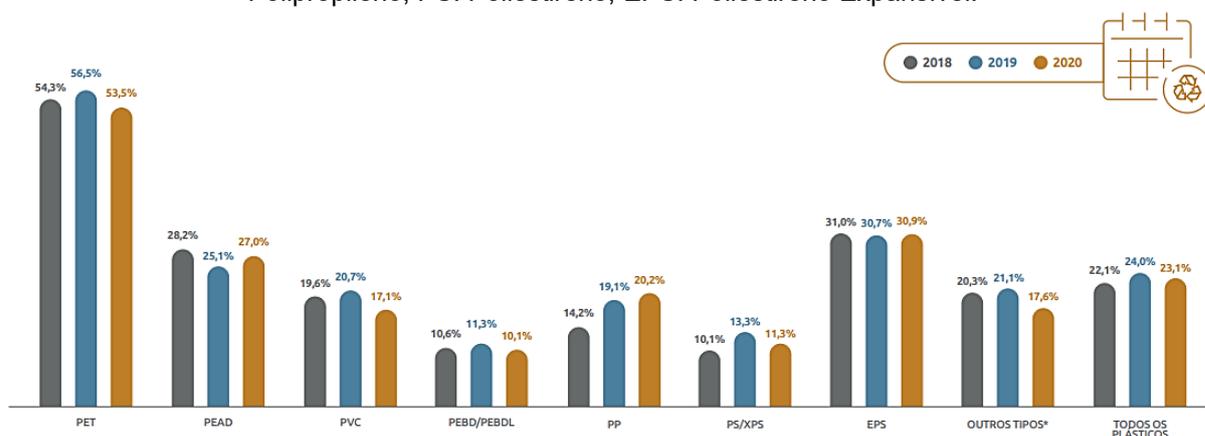
Também como forma de incentivo, foi criado o Decreto n° 10.936/2022, que regulamenta a Lei n° 12.305/2010, estabelecendo a responsabilidade para a correta destinação e processamento de resíduos sólidos entre indústrias, sociedade e governo. Além disso, o decreto n° 11.043/2022, foi criado para aprovar o Plano

Nacional de Resíduos Sólidos que estabelece diretrizes para os resíduos sólidos no Brasil (BRASIL, 2010; BRASIL, 2022a; BRASIL, 2022b).

Apesar dos esforços, o polipropileno ainda apresenta uma taxa de reciclagem insatisfatória. No Brasil, por exemplo, apenas o PET atinge valores de reciclagem acima de 50%. Em 2020, apenas 20,2% de PP pós-consumo foi reciclado, como mostra a Figura 8. Além disso, os plásticos são frequentemente utilizados em aplicações de vida curta/uso único, como na produção de embalagens, gerando em pouco tempo, um alto nível de resíduo (Figura 9).

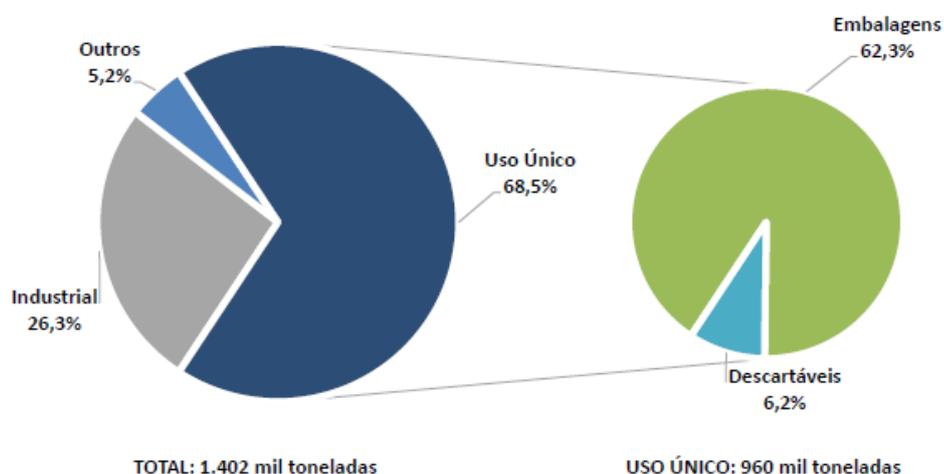
Figura 8 - Histórico do índice de reciclagem de plásticos pós-consumo.

PET: Politereftalato de Etileno; PEAD: Polietileno de Alta Densidade; PVC: Policloreto de Vinila; PEBD: Polietileno de Baixa Densidade; PEBDL: Polietileno de Baixa Densidade Linear; PP: Polipropileno; PS: Poliestireno; EPS: Poliestireno Expansível.



Fonte: ABIPLAST (2021).

Figura 9 - Origem do resíduo plástico utilizada na reciclagem em 2020.

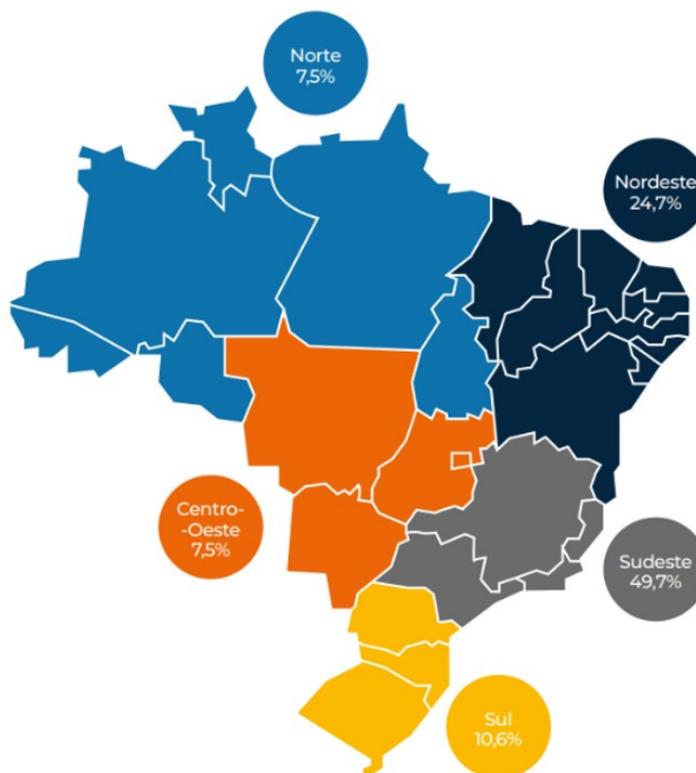


Fonte: Maxiquim (2021).

Segundo a Agência Brasil, a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) só tende a crescer, e a estimativa é que o Brasil atingirá 100 milhões de toneladas/ano

de RSU até 2030. Em 2018, 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos foram gerados, e em 2022, esse valor subiu para mais de 81,81 milhões de toneladas. O Nordeste detém a segunda posição na geração de RSU (Figura 10), além de ficar em penúltimo quando se trata de iniciativas em coleta seletiva (ABRELPE, 2022).

Figura 10 - Geração de resíduo urbano por região em 2022.



Fonte: Abrelpe (2022).

Com o aumento dos índices de poluição, as frequentes crises ambientais e a escassez dos recursos naturais, torna-se cada vez mais necessária a conscientização da sociedade sobre a preservação do meio ambiente, especialmente no que diz respeito ao lixo. A reciclagem se tornou uma solução para transformar os resíduos, agregar valor e evitar a utilização de matérias-primas de origem fóssil, realimentando a cadeia produtiva de forma mais consciente (Donato, 2015).

Infelizmente a prática de utilizar matéria-prima reciclada ainda não é amplamente adotada pelas indústrias brasileiras, mesmo aquelas que dependem em grande parte de resina polimérica. No entanto, ao incentivar a reciclagem, a indústria pode reduzir seus custos e contribuir para redução de consumo de matéria-virgem de origem não renovável, além de reduzir o volume de resíduos gerados e contribuir para

a preservação ambiental e fortalecimento da cadeia de reciclagem (catadores e recicladores) (Morgan, 2015; ABRELPE, 2022).

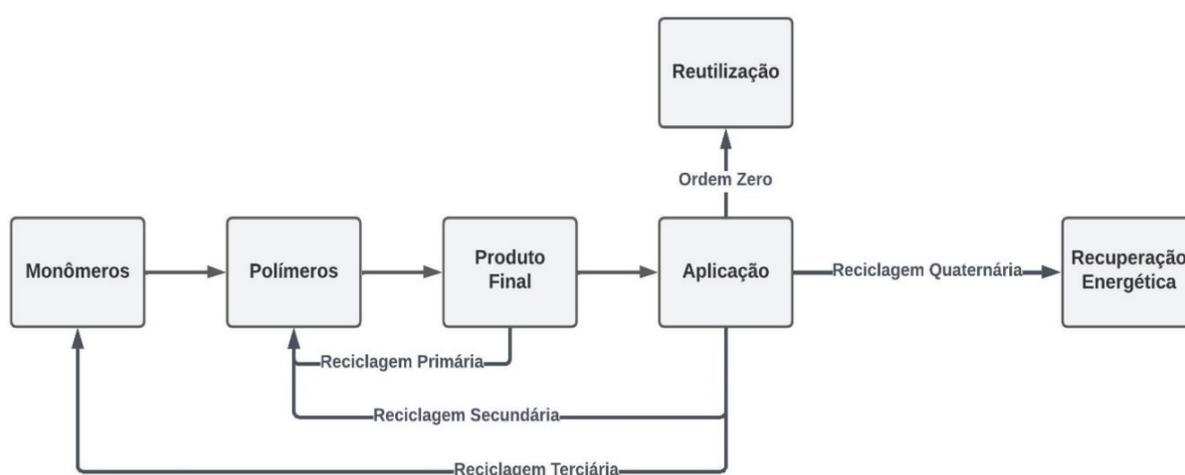
3.4. TIPOS DE RECICLAGEM

Os resíduos plásticos podem ser divididos em pós-industrial (PIR, Post-Industrial Recycled), que são resíduos provenientes do processo industrial, que nunca chegaram a ser utilizados por um consumidor final, como por exemplo, aparas e refugos; e o resíduo pós-consumo (PCR, Post-Consumer Recycled), gerado após o descarte de um consumidor final (Admin, 2022).

Segundo a Sociedade Americana de Ensaio de Materiais (ASTM) a reciclagem pode ser classificada em: reciclagem primária, secundária, terciária e quaternária, conforme esquematizado na Figura 11.

A reciclagem primária produz o reciclado pós-industrial (PIR, Post-Industrial Resin), na qual os refugos e aparas obtidos no processo produtivo são reprocessados para se tornarem matéria-prima no processo. A reciclagem secundária é responsável por produzir o reciclado pós-consumo (PCR, Post-Consumer Recycled), que retornam como produtos que já foram utilizados pelo consumidor e se encontram no fim do seu ciclo de vida útil (Fraga, 2014).

Figura 11 - Tipos de reciclagens.



Fonte: Adaptado de Pessoa (2018).

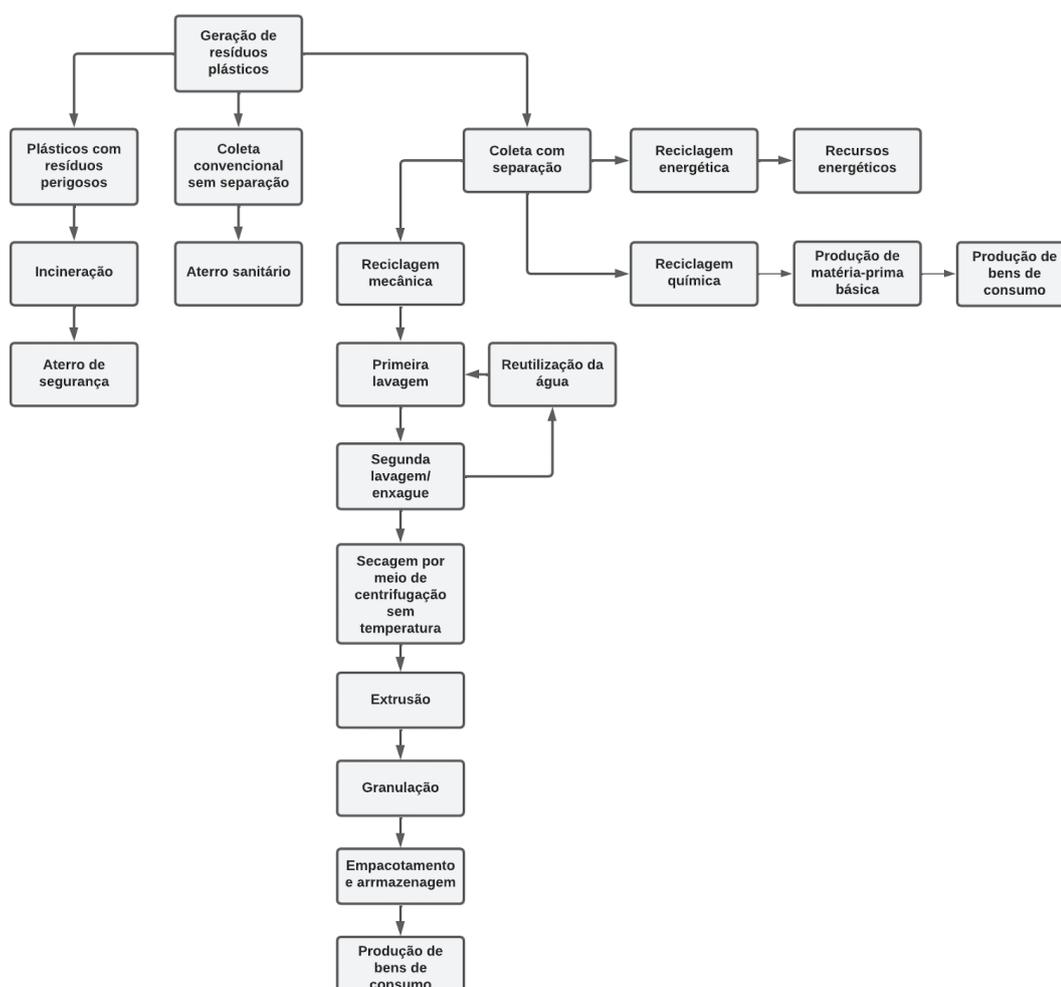
A reciclagem também pode ser classificada em: mecânica, química (reciclagem terciária) e energética (reciclagem quaternária). A reciclagem energética é o processamento do polímero por incineração controlada, com o objetivo de gerar

energia (Spinacé e Paoli, 2005). Enquanto a reciclagem química envolve a alteração química do polímero, que será despolimerizado, e em seguida repolimerizado.

A reciclagem mecânica é a forma de reprocessamento que não altera a estrutura química do resíduo, e inclui a reciclagem primária e secundária. Este tipo de reciclagem é formado pelas etapas de: coleta, separação/triagem (por tipo de material e separação magnética), trituração/moagem, ciclos de lavagem e enxágue, secagem e extrusão (peletização) (Zanin *et al.*, 2021). A Figura 12, apresenta um exemplo de fluxo de reciclagem de plástico pós-consumo.

A fim de proceder com o devido controle do processo de reciclagem, é de interesse compreender como o processamento das resinas se dá e, conseqüentemente, como vai influenciar a matéria-prima.

Figura 12 - Fluxograma da reciclagem de resíduos sólidos.

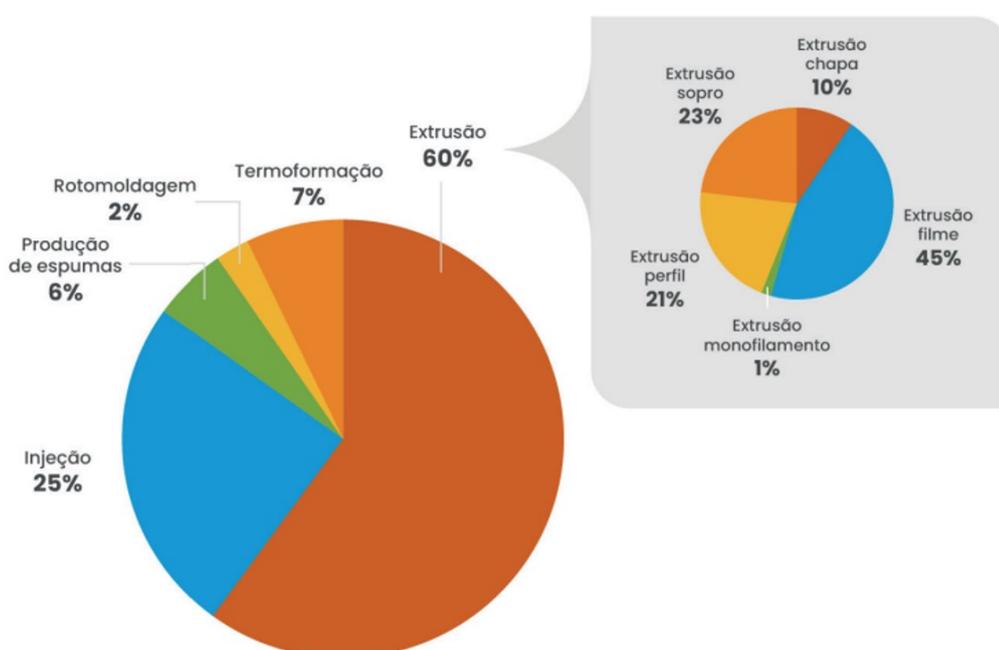


Fonte: Adaptado de Zanin e Mancini (2021).

3.5. PROCESSAMENTO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Os polímeros passam pela etapa de processamento para serem moldados e atingir o formato final de um produto. Essa fase pode ser realizada de diversas maneiras, como por exemplo, através da extrusão e da moldagem por injeção. Segundo a Abiplast (2023) em 2020, a moldagem por extrusão representou 60% dos processos para fabricar transformados plásticos, enquanto a moldagem por injeção se encontrou em segundo lugar com 25% de representatividade (Figura 13).

Figura 13 - Processos produtivos utilizados para fabricar transformados plásticos em 2020.



Fonte: Abiplast (2023).

A extrusão se caracteriza por mover uma massa de polímero em um cilindro com rosca, sofrendo tensões de cisalhamento, além de ser homogeneizado e plastificado. O material então passa por uma matriz que define seu formato. O extrudado pode formar filmes, ao passar por rolos e cilindros, pode ser cortado em peças de dimensões especificadas, ou ser cortado em pequenos grânulos por meio do uso de uma faca rotativa acoplada a extrusora (Fagundes, 2018; Manrich, 2005). Além de ser empregado na conformação de produtos finais, esse método também pode servir como uma etapa intermediária para misturas ou como etapa da reciclagem mecânica. Os grânulos formados podem então ser moldados por outro processo, como a moldagem por injeção.

Em 2022, a moldagem por injeção foi o principal setor da indústria de polipropileno no mundo, representando mais de 48% do mercado em termos de participação, enquanto a moldagem por sopro ficou em segundo lugar. Indústrias automotivas, biomédicas, de embalagens e de móveis são exemplos de setores de bens de consumo que injetam seus produtos (GRAND VIEW RESEARCH, 2023).

A moldagem por injeção é semelhante ao processo de extrusão por utilizar uma rosca para movimentar e homogeneizar a massa polimérica (Souza, 2020). No entanto, ao final do processo de homogeneização, o material é injetado em um molde, onde é resfriado para conformação da peça plástica (Manrich, 2005).

A vantagem econômica do processamento de resíduos plásticos depende do custo da matéria-prima em relação ao material virgem e aos materiais que lhe deram origem, além do custo em realizar a reciclagem (Canevarolo, 2014). Segundo Ribeiro *et al.* (2018), a AGS Technology, empresa de produtos moldados por injeção, utiliza resina virgem e reciclada para gerar seus produtos, tornando a utilização viável e bem-sucedida. Quando o material precisa ser moído e extrudado, seu custo pode ou não ser maior em relação à resina virgem.

Para monitorar todas essas possíveis variações no processo, é necessário realizar o controle de qualidade da matéria-prima, que responderá pela estabilidade da produção.

3.6. ANÁLISE E CONTROLE DE QUALIDADE

O controle de qualidade é realizado para analisar e verificar a qualidade da matéria-prima, ou seja, se esta atende aos requisitos técnicos. Para este controle, atividades sistemáticas são realizadas, a fim de agregar confiança em relação a qualidade de um produto (Portilho *et al.*, 2021). Para matérias-primas poliméricas podem ser realizados ensaios mecânicos, térmicos, físicos ou morfológicos, a fim de verificar se o polímero atende às especificações estabelecidas (Maciel Jr., 2017).

As resinas poliméricas podem ser utilizadas como matéria-prima em diversos tipos de produtos, para uma ampla variedade de aplicações antes de se tornarem reciclados pós-consumo. Ao longo da vida útil do produto, e durante seu reprocessamento, o plástico que o constitui é exposto a fatores como temperatura, umidade e radiação solar, que geram um histórico térmico, afetando suas

propriedades mecânicas, químicas e térmicas, em função do tempo de exposição (Bahr Júnior, 2016).

A reciclagem mecânica da resina é feita pelo processo de extrusão. No qual o material é aquecido acima do seu ponto de amolecimento, para que atinja um estado térmico homogêneo, sendo posteriormente resfriado a temperatura ambiente e granulado para posterior conformação em outros processos (Santos *et al.*, 2003).

Assim, o polímero passa por uma longa jornada térmica até que o processo seja concluído, considerando o fato de já ter sido exposto à ação de radiações, calor e oxigênio antes mesmo de ser extrudado. Estes fatores causam uma degradação termooxidativa no plástico, que pode romper ligações químicas e modificar a estrutura química do material. O polipropileno é vulnerável a essas modificações devido aos seus carbonos terciários, que quando atacados por radicais livres têm suas ligações rompidas, gerando grupos carbonila e hidroxila, produzindo hidroperóxidos (produtos instáveis) que acarretam a degradação da cadeia polimérica (Romano, 2017).

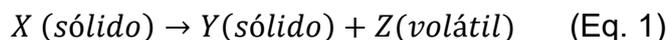
Dessa forma, a análise e o controle de qualidade são fundamentais para entender a condição dos reciclados e a influência que cargas minerais podem causar em suas propriedades. Para isso, algumas técnicas de caracterização são realizadas, como: Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), termogravimetria, espectroscopia de infravermelho, ensaios de resistência à tração e à flexão, determinação de índice de fluidez, umidade e teor de sólidos. A seguir será apresentado um detalhamento sobre cada uma dessas técnicas.

3.6.1. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e termogravimetria (TG)

A calorimetria exploratória diferencial (DSC) é uma técnica analítica que mede a diferença de calor absorvido ou liberado por uma amostra em relação a uma referência. Ambas as amostras são submetidas a aquecimentos e/ou resfriamentos controlados, a fim de medir a quantidade de calor que é absorvida ou liberada, que depende da capacidade calorífica do material. A partir disto, um gráfico em função da temperatura é gerado e nele é possível identificar a temperatura na qual as mudanças de fase ocorrem, como temperaturas de transição vítrea, fusão e cristalização, assim como a entalpia associada (Koshy *et al.*, 2017).

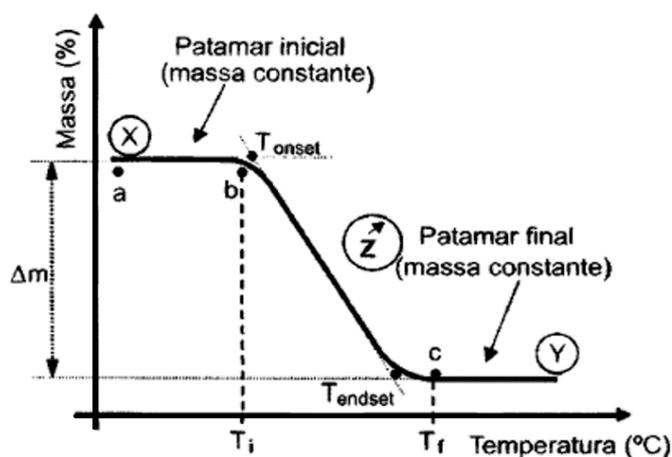
A termogravimetria (TG) também é uma técnica em função da temperatura ou em função do tempo, que diferente do DSC, mede a variação de massa de uma

amostra em relação a uma referência. A amostra é inserida em um porta-amostra e é aquecida em atmosfera de gás controlada. Uma balança de alta precisão mede a variação de massa da amostra devido a liberação dos compostos voláteis (Equação 1), enquanto um forno controla a temperatura da amostra.



A partir desta técnica é possível determinar o intervalo de temperatura na qual ocorrem mudanças de massa (T_{onset} e T_{endset}), assim como a quantidade de material perdido ou eventualmente adquirido durante o processo (Afinko, 2020), sendo possível observar as temperaturas de degradação do material (Figura 14). A termogravimetria derivada (DTG) representa a curva obtida a partir da derivada primeira da curva de TG. Essa curva facilita o entendimento quanto à degradação do material.

Figura 14 - Curva característica de decomposição térmica de única etapa.



Fonte: Canevarolo (2014)

3.6.2. Espectroscopia de infravermelho (FTIR)

A espectroscopia de infravermelho é uma técnica de caracterização que utiliza radiação infravermelha para identificar grupos funcionais, ligações químicas e outras características moleculares dos polímeros, tornando possível avaliar a estrutura molecular da amostra (Stuart, 2007).

Na análise de polímeros, a espectroscopia de infravermelho pode ser utilizada para identificar diferentes tipos de polímeros e seus aditivos, bem como para monitorar

mudanças na estrutura molecular durante a síntese ou processamento. Assim, é uma técnica importante para entender o comportamento dos materiais poliméricos em diferentes condições de uso e para projetar polímeros mais resistentes e duráveis (Stuart, 2007).

3.6.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica analítica utilizada no estudo da morfologia de materiais a nível microscópico. O MEV faz uso de feixes de elétrons que varrem a superfície da amostra, gerando sinais (elétrons retroespalhados, secundários e raios X característicos), que são detectados e utilizados para criar imagens de alta resolução da superfície da amostra, revelando detalhes morfológicos em escala microscópica (Dedavid, Gomes e Machado, 2007).

A Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) em conjunto com o MEV, permite a análise da composição química das amostras e uma avaliação semi-quantitativa dos elementos que compõem a imagem (Duarte *et al.*, 2003).

3.6.4. Resistência à tração e à flexão

Os ensaios de tração e flexão são realizados em uma máquina universal de ensaios. Nessas análises, uma carga é aplicada ao corpo de prova, que pode ser uma amostra de um produto ou um corpo de prova moldado por injeção com medidas especificadas em norma. A partir disso uma curva de tensão *versus* deformação é gerada, e analisando-a é possível gerar muitas informações sobre as propriedades do material, como por exemplo: módulo de elasticidade, deformação, tensão no escoamento e tensão na ruptura (Miguel, 2010).

No ensaio de resistência à tração, a amostra é submetida a uma carga axial com força crescente até que se rompa. No ensaio de flexão, por sua vez, a amostra é submetida a uma carga transversal, com força aplicada em três ou quatro pontos, a depender do método (Afinko, 2019; Afinko, 2021).

3.6.5. Índice de fluidez, umidade e teor de sólidos

O índice de fluidez (IF) é expresso em g/10min, e indica a facilidade de um material em escoar durante sua passagem por um capilar. Essa medida é importante porque indica a capacidade de processamento do polímero em diferentes condições, como em moldagem por injeção ou extrusão. O IF é determinado medindo-se a massa de polímero que flui através de um orifício de dimensões definidas em um determinado período, sob uma carga e temperatura especificadas (Miguel, 2010).

Para materiais reciclados, é importante avaliar o índice de fluidez devido às diversas composições de *grades* de polipropileno que podem estar presentes, além do impacto da degradação na fluidez do material, originando variações nessa característica. Além disso, é importante manter a uniformidade entre os lotes e verificar se há necessidade de ajustar os parâmetros no processo de moldagem.

A medição de umidade em resinas poliméricas é importante para garantir a qualidade e estabilidade do produto final. A umidade pode afetar significativamente as propriedades físicas e químicas das resinas poliméricas, como a viscosidade, a adesão, a resistência mecânica e a estabilidade dimensional. Uma das técnicas mais comuns para medir a umidade em resinas poliméricas é a análise gravimétrica. Nesse método, uma amostra da resina é pesada antes e depois de ser submetida à temperatura e umidade controladas. A diferença de peso entre as duas medições é usada para calcular a umidade da amostra.

A determinação do teor de sólidos também pode ser realizada por gravimetria semelhante ao processo anterior, no qual a diferença de massa é medida após a calcinação da amostra (Splabor, 2018).

4. METODOLOGIA

As amostras de polipropileno virgem, reciclados e carga mineral foram obtidas por meio de doação, por uma empresa do ramo de móveis plásticos do estado de Pernambuco. Os ensaios de caracterização e testes associados ao presente trabalho foram desenvolvidos nos laboratórios acadêmicos da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE): Laboratório de Combustíveis (LAC), situado no Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia (I-Litpeg), Laboratório de microscopia situado no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM) e o laboratório da empresa Avient Corporation (São Paulo/Brasil); a fim de analisar as propriedades dos reciclados e seus compósitos.

4.1. MATERIAIS

Neste trabalho foram utilizadas sete amostras para a realização dos testes, conforme descrição e siglas apresentadas na Tabela 1. Outras informações como as propriedades e a fonte dos materiais utilizados em cada composição, foram descritos nos tópicos que seguem.

Tabela 1 - Identificações e composições utilizadas nas análises.

Identificação	Descrição da composição
PP	Polipropileno homopolímero.
PCR1	Polipropileno reciclado de sacos de rafia.
PCR2	Polipropileno reciclado de embalagens plásticas.
PCR1-10CN	Reciclado de sacos de rafia com adição de 10% de composto mineral natural.
PCR1-20CN	Reciclado de sacos de rafia com adição de 20% de composto mineral natural.
PCR2-10CN	Polipropileno reciclado de embalagens plásticas com adição de 10% de composto mineral natural.
PCR2-20CN	Polipropileno reciclado de embalagens plásticas com adição de 20% de composto mineral natural.

Fonte: A autora, 2022.

4.1.1. Polipropileno

Para o estudo foi utilizado o polipropileno homopolímero H301 da Braskem (Figura 15), como o polipropileno (PP) virgem. Este PP tem como aplicações sugeridas: utilidades domésticas (UD), tampas com lacre, tampas flip-top, tampas injetadas de uso geral, filamentos contínuos para fios de costura, móveis, eletrodomésticos (ventiladores, filtros de água, chuveiros elétricos, máquinas de lavar), dentre outras. Além disso, é um *grade* utilizado em processos de moldagem por injeção e moldagem por extrusão (BRASKEM, 2015; BRASKEM, 2018).

As propriedades obtidas da folha de dados desse polímero, fornecido pela Braskem, estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades obtidas da folha de dados do H301.

Parâmetros	Método	Unidade	Valor
Densidade	D 792	g/cm ³	0,905
Índice de fluidez (230°C/2,16kg)	D 1238	g/10 min	10
Módulo de Flexão Secante a 1%	D 790	MPa	1350
Resistência à Tração no Escoamento	D 638	MPa	35,39

Fonte: BRASKEM, 2018.

Figura 15 - Pellets da resina virgem H301.



Fonte: A autora, 2023.

4.1.2. Reciclados

Dois tipos de reciclados pós-consumo, comercializados no mercado brasileiro, foram utilizados neste trabalho, a Figura 16 apresenta os resíduos sólidos recolhidos. Os PCRs possuem diferentes origens e são de diferentes empresas recicladoras. A Tabela 3 apresenta um resumo sobre os materiais e suas fontes.

Figura 16 - Resíduos sólidos pós-consumo coletados.



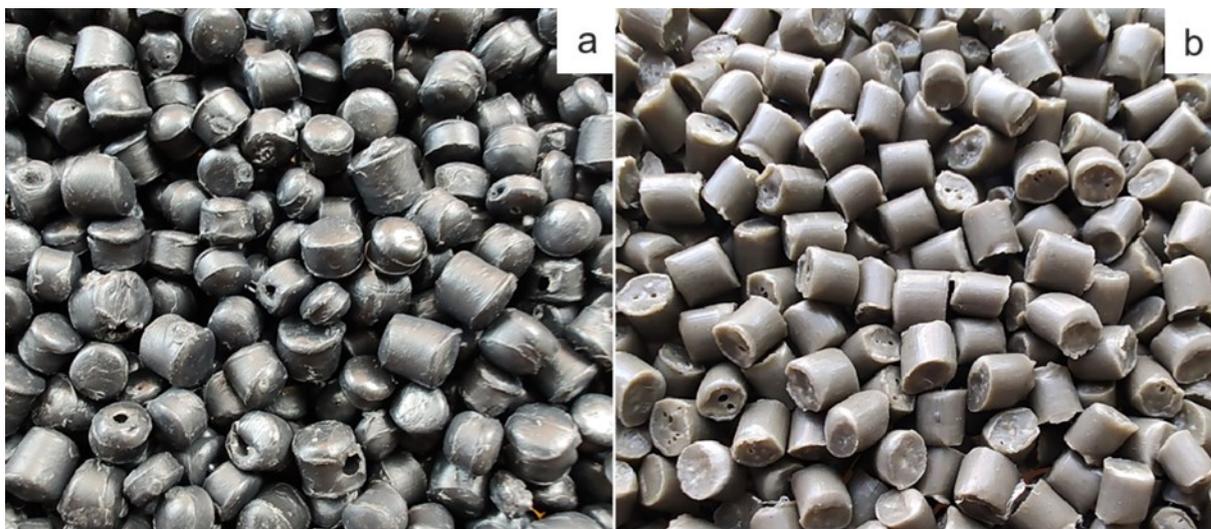
Fonte: A autora, 2023.

Tabela 3 - Resumo dos reciclados selecionados no mercado.

Identificação	Tipo do material	Descrição
PCR1	PCR de Polipropileno homopolímero	A resina é obtida após o processamento de embalagens de rafia sintética pós consumo, advindas do meio agrícola (Figura 17A).
PCR2	PCR de Polipropileno homopolímero	Obtido a partir da logística reversa de embalagens pós-consumo coletadas em cooperativas de reciclagem. As embalagens são coletadas em cidades localizadas no nordeste, sudeste e sul do Brasil (Figura 17B).

Fonte: A autora, 2023.

Figura 17 - Pellets dos PCRs.
a) PCR1, b) PCR2.

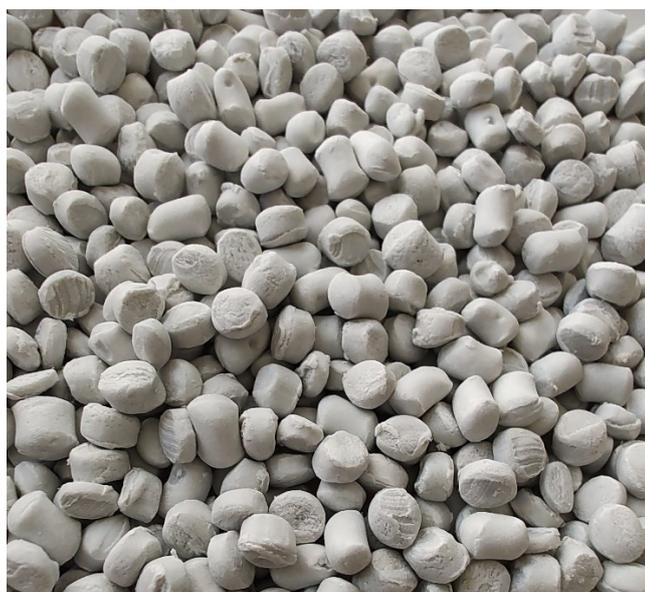


Fonte: A autora, 2023.

4.1.3. Carbonato de Cálcio

A carga inorgânica utilizada foi um composto, sem adição de pigmentação, de carbonato de cálcio (CaCO_3) com resina de polipropileno homopolímero, de *grade* não especificado pela empresa produtora (Figura 18). O composto contém entre 70 e 80% de CaCO_3 conforme medição realizada por meio da ISO 3451; com teor de umidade máximo de 0,12 (norma ME 004), conforme laudo técnico fornecido.

Figura 18 - Composto de carbonato de cálcio.



Fonte: A autora, 2023.

4.2. MÉTODOS

Nesta seção, foi fornecida a metodologia detalhada empregada neste trabalho, destacando os equipamentos e parâmetros de teste e análise de cada ensaio.

4.2.1. Índice de Fluidez (IF)

O índice de fluidez (IF) foi medido com base na norma ASTM D 1238. O plastômetro Tinius Olsen MP1200 foi ajustado a uma temperatura de $230 \pm 4^\circ\text{C}$ para as amostras em estudo, por se tratar de polipropileno. Após atingir a temperatura, foram aguardados seis minutos para a estabilização, e foi adicionado o pistão com carga, enquanto o cilindro do equipamento aquecia por 10 minutos. Foram pesadas 5 gramas de cada amostra utilizando uma balança analítica.

Após a pesagem, o pistão foi retirado para que a amostra fosse inserida no cilindro do equipamento e fosse empurrada sem força excessiva. Em seguida o pistão foi novamente adicionado à abertura junto com o peso. Com o início da saída do filamento de material compactado, e sem bolhas, este foi cortado em intervalos de tempo conforme a Tabela 4.

Os filamentos cortados foram então pesados, e o valor multiplicado pela constante correspondente na Tabela 4, resultando no valor do índice de fluidez. Após a medição, foi realizada a higienização do equipamento.

Tabela 4 - Intervalos de corte de filamento.

Índice de fluidez	Intervalo de tempo (s)	Constante
$0,15 \leq \text{IF} \leq 1,0$	360	1,66
$1,0 < \text{IF} \leq 3,5$	180	3,33
$3,5 < \text{IF} \leq 7,0$	60	10
$7,0 < \text{IF} \leq 15,0$	30	20
$15,0 < \text{IF} \leq 25,0$	20	30
$25,0 < \text{IF} \leq 35,0$	15	40
$\text{IF} > 35,0$	10	60

Fonte: Adaptado de ASTM D 1238-10 (2013).

4.2.2. Teor de sólidos e Teor de umidade

Para a análise do teor de sólidos, um cadinho foi pesado em uma balança analítica, seu peso foi registrado e a balança tarada. Em seguida, cada amostra de polipropileno virgem e reciclado foi pesada e os cadinhos foram levados separadamente ao forno mufla Quimis Q318M24, onde receberam a temperatura de $560 \pm 10^\circ\text{C}$ por 30 minutos. Os cadinhos foram retirados e resfriados à temperatura ambiente. Após resfriados, o resíduo de cada cadinho foi pesado, descontando o peso do recipiente. Em seguida, foi calculada a porcentagem de resíduo inorgânico contido nas amostras, em relação a amostra pesada inicialmente, conforme a Equação 2, abaixo.

$$(\% \text{ Teor de sólidos} = \frac{\text{Massa da amostra seca}}{\text{Massa total da amostra}} \times 100) \quad (\text{Eq. 2})$$

Para determinar a porcentagem de umidade, uma amostra de 30 gramas da carga mineral foi adicionada a um medidor de umidade (Ohaus MB27) à 110°C por 10 min, conforme a Norma ASTM D6980. Para valores obtidos acima de 0,12%, foi necessário realizar a desumidificação do material, em uma estufa de secagem com circulação de ar, por duas horas a 50°C .

4.2.3. Processamento da resina virgem e compósitos

As amostras de PP, PCR1 e PCR2 foram pesadas com o auxílio de uma balança de precisão Toledo 9094C15, sem adição de pigmentos, cargas e/ou aditivos, totalizando 2kg de material para cada amostra. A preparação das demais composições consistiu em realizar uma mistura mecânica das resinas recicladas com o composto de carga mineral. Para isso, o composto de carbonato de cálcio foi previamente seco, pois foi identificado um teor de umidade de 0,13%. Em seguida, para preparar as amostras de PCR1-10CN e PCR2-10CN foram realizadas duas pesagens de 0,2kg do composto de carbonato de cálcio para cada PCR, e de 1,8kg de cada reciclado. Para os PCR1-20CN e PCR2-20CN, foram realizadas duas pesagens de 0,4kg do composto mineral, e de 1,6kg de cada PCR. A mistura foi realizada manualmente utilizando luvas de látex.

Todas as sete amostras foram adicionadas individualmente ao funil de uma injetora de 110 toneladas Krauss Maffei, que foi ajustada aos parâmetros contidos na Tabela 5, a fim de produzir 15 corpos de prova, sendo dez para a realização de ensaios mecânicos e cinco como reserva substitutiva, caso algum corpo de prova destinado para o teste precisasse ser trocado.

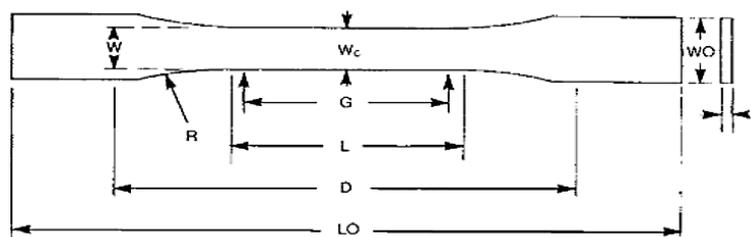
Os corpos de prova utilizados seguiram as dimensões estabelecidas para o corpo de prova tipo I da norma ASTM D 638 (Figura 19): 165 mm de comprimento (LO), 3,2 mm de espessura (T), 13 mm de largura (W), L = 57mm, WO = 19mm, G = 50mm, D = 115 mm e R = 76.

Tabela 5 - Parâmetros de controle de injeção das amostras.

Parâmetros	Unidade	Intervalos padrões	Valores médios (resina virgem e reciclada)	Valores médios (Compósitos)
Rotação	rpm	35 a 40	36,00	38,00
Máxima pressão hidráulica	bar	20 a 50,5	28,15	27,88
Pressão de recalque	bar	14 a 35,35	19,70	19,52
Tempo de injeção	s	2 a 3	2,56	2,43
Tempo de plastificação	s	17 a 19	17,31	17,00
Tempo de recalque	s	17 a 25	17,15	16,46

Fonte: Adaptado de ASTM D638 (2022).

Figura 19 - Dimensões do corpo de prova.



Fonte: Norma ASTM D638 (2022).

4.2.4. Ensaios de resistência à tração e à flexão

Para avaliação do desempenho mecânico das matérias primas foram utilizados os ensaios de tração (norma ASTM D-638) e flexão (norma ASTM D-790). Para isto foi utilizada uma máquina universal de ensaios EMIC modelo DL2000, com célula de

carga de 20kN, para coletar os resultados, e o software TESC EMIC ® versão 3.04 para o tratamento de dados, gerando gráficos de força (N) x deformação (mm).

Cinco corpos de prova foram utilizados para cada ensaio. Considerando as variações que podem ocorrer no momento de injeção, a largura e espessura de cada corpo de prova foram medidas, com o auxílio de um paquímetro, e as informações foram utilizadas como dados de entrada no software TESC. Neste software foi realizado o cálculo de tensão a partir da força máxima obtida do gráfico e da área medida do corpo de prova, conforme Equação 3, além da obtenção do módulo de elasticidade, para o ensaio de flexão. Os ensaios foram realizados dentro da temperatura estabelecida em norma e em umidade controlada.

$$(\text{Tensão máxima} = \frac{\text{Força máxima}}{\text{Área do corpo de prova}}) \quad (\text{Eq. 3})$$

4.2.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com EDS

Corpos de prova injetados foram criofaturados, através da ruptura frágil induzida pela presença de um entalhe e força aplicada após submersão por 2 min em nitrogênio líquido.

As amostras foram revestidas por pulverização catódica com o padrão ouro/paládio (Au/Pd), devido ao caráter não condutor das amostras. Para isso foi utilizado o metalizador SC7620 da Quorum (Figura 20), por 200 segundos a 10 mA.

A caracterização morfo-química foi realizada a partir da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS) (Figura 21 e 22). Foi utilizado o MEV-FEG modelo MIRA 3 da marca Tescan com o *software* Mira TC, e para a análise semi-qualitativa foi utilizado o espectômetro X-act 51-ADD007 da Oxford Instruments com o *software* AZtec.

Figura 20 - Metalizador SC7620 da Quorum.



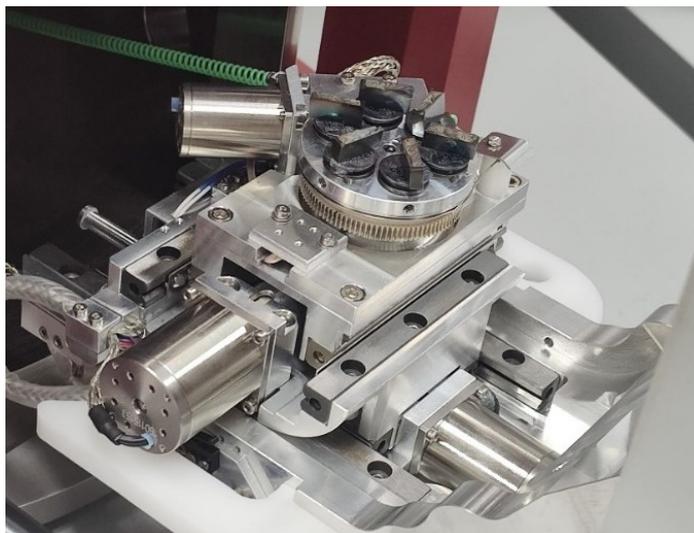
Fonte: A autora (2024).

Figura 21 - EDS acoplado ao MEV.



Fonte: A autora (2024).

Figura 22 - Amostras posicionadas no suporte para amostras “stub” do MEV.



Fonte: A autora (2024).

4.2.6. Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A Espectroscopia de Absorção no Infravermelho com Transformada de Fourier por Reflexão Total Atenuada (FTIR-ATR) foi realizada no espectrômetro Spectrum 400 da Perkin Elmer. Os espectros foram obtidos com transmitância na faixa de comprimento de onda entre 4000 cm^{-1} e 650 cm^{-1} , com 16 varreduras por amostra e resolução de 4 cm^{-1} . Os dados foram tratados no *software* OriginPro 2024, e a partir dele foram obtidas as curvas de FTIR.

4.2.7. Termogravimetria (TG)

As análises termogravimétricas das amostras foram realizadas por meio do equipamento TGA 1 Stare System da Mettler Toledo, com amostras de massa média em torno de 7 mg, que foram colocadas em cadinhos de alumina. Foi utilizada a taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, em atmosfera de nitrogênio com fluxo de $50\text{ mL}/\text{min}$, no intervalo de aquecimento de 30°C a 600°C para as amostras de PP, PCR1, PCR2, PCR1-10CN e PCR2-10CN, e de 30°C a 1000°C para as amostras de PCR1-20CN e PCR2-20CN, a fim de identificar o intervalo de temperatura de degradação térmica da carga mineral (esquema reacional, Equação 4). Os dados foram tratados no *software* OriginPro 2024, e a partir dele foram obtidas as curvas de primeira derivada do TG.



4.2.8. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Foram realizadas análises físico-químicas por meio da calorimetria exploratória diferencial (DSC), utilizando o equipamento Perkin Elmer 8500. Foram preparadas amostras de 2mg cada, e o método foi baseado na norma ASTM D3418, utilizando o programa de temperaturas e taxas de aquecimento e resfriamento abaixo:

- I. Isoterma por 2 minutos a -30°C ;
- II. Aquecimento de -30°C a 200°C , com taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$;
- III. Isoterma por 1 minuto a 200°C ;
- IV. Resfriamento de 200°C a -30°C , com taxa de resfriamento de $50^{\circ}\text{C}/\text{min}$;
- V. Isoterma por 1 minuto a -30°C ;
- VI. Aquecimento de -30°C a 200°C , com taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$;
- VII. Isoterma por 1 minuto a 200°C .

O grau de cristalinidade (X_c) foi determinado com base na Equação 5, considerando as entalpias de fusão do polipropileno e do polietileno 100% cristalinos como sendo de 209 J/g e 293 J/g, respectivamente (Marinch, 2005).

$$X_c = \left(\frac{\Delta H_f}{\Delta H_{100\%} \times W_p} \right) \times 100, \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

X_c : Índice de cristalinidade do polímero (%).

ΔH_f : Entalpia de fusão da amostra sob análise.

$\Delta H_{100\%}$: Entalpia de fusão teórica do polímero hipoteticamente 100% cristalino.

W_p : Fração em peso do polímero.

4.2.9. Análise de custo

A análise de custo se baseou nos valores em reais (R\$) do quilo das matérias-primas trabalhadas pelos fornecedores, para o primeiro semestre de 2024, sendo solicitado por eles a não divulgação direta dos valores. Dessa forma, considerando um produto de 2kg, foi analisada a diferença de custo entre utilizar uma resina virgem, reciclados e compósitos de matriz reciclada, com base nas amostras utilizadas neste trabalho, a fim de apresentar o impacto financeiro gerado para cada composição

estudada. Por exemplo, o PCR1-10CN, possui 90% de PCR1, equivalente a 1,8kg; e 10% do composto de carbonato de cálcio, equivalente a 0,2kg. Considerando-se o custo/kg de ambos, os valores foram multiplicados pelos pesos correspondentes e os resultados somados, para gerar o custo final do compósito.

Foram definidos custos anuais com matéria-prima virgem em: R\$50.000,00; R\$100.000,00; R\$200.000,00; R\$300.000,00; R\$400.000,00 e R\$500.000,00. E com base no custo para cada composição foram realizadas as comparações.

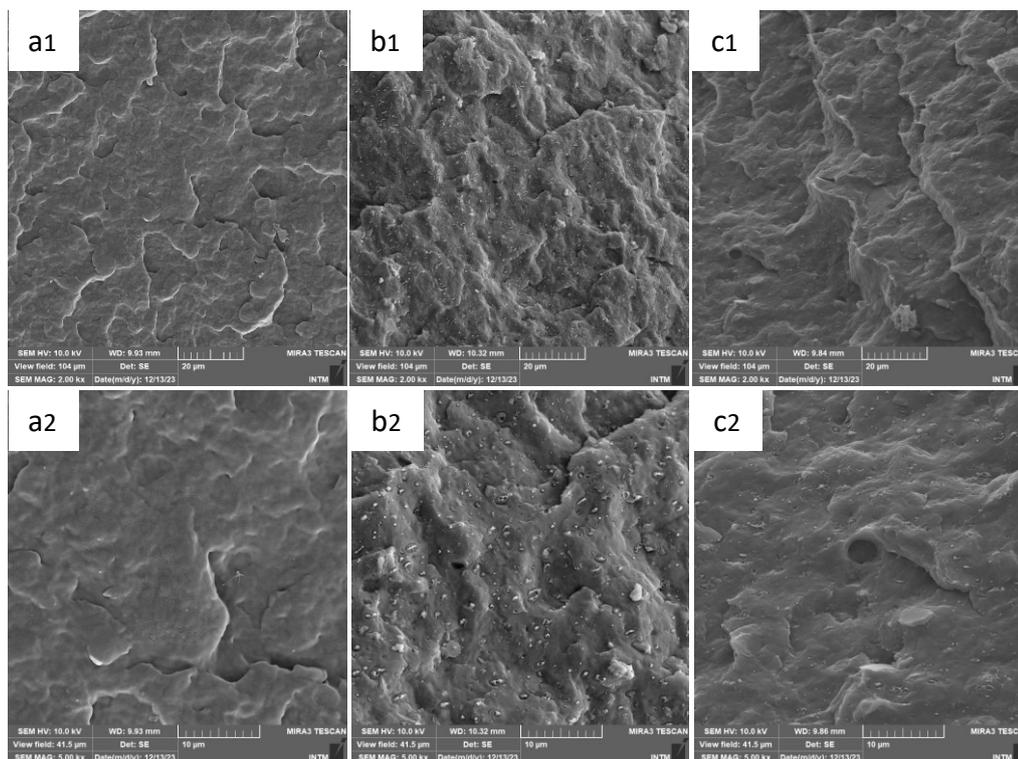
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA POR ENERGIA DISPERSIVA (EDS)

A sequência de imagens da Figura 23 apresenta a morfologia do PP e dos PCR's na fratura do corpo de prova (realizada por meio de nitrogênio), com ampliações de 2.000x e 5.000x, para a melhor observação. Nestas Figuras é possível comparar as micrografias, verificando superfícies semelhantes entre os PCR's e o PP virgem.

É observado para o PCR2 e principalmente o PCR1, a superfície cinza característica da matriz polimérica. Também foi possível observar a presença de alguns pontos claros (Figuras 23-b1, 23-b2, 23-c1 e 23-c2), indicando que os materiais reciclados já apresentam cargas minerais.

Figura 23 - Micrografias do PP e dos PCR's sem adição de carga, ampliados em 2000x e 5000x. a1) PP virgem 2000x, b1) PCR1 2000x, c1) PCR2 2000x, a2) PP virgem 5000x, b2) PCR1 5000x e c2) PCR2 5000x.



Fonte: A autora, 2023.

Conforme mostra o EDS (Tabela 6), para PCR2 foram identificados os elementos carbono (C), oxigênio (O) e cálcio (Ca), indicando a carga mineral se tratar

do CaCO_3 . Enquanto para o PCR1, além desses elementos, em maior porcentagem em peso (%Wt), foram encontrados o sódio (Na), magnésio (Mg), alumínio (Al) e silício (Si), indicando a possível presença de calcita com ou sem dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), e uma pequena quantidade de wollastonita (CaSiO_3) e/ou albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) advindas da carga mineral que o material já continha ou do contato com a terra, já que os sacos de rafia foram utilizados no meio agrícola.

Tabela 6 - Composição química do PCR1 e PCR2 obtida por EDS.

Elemento	Wt% PCR1	Wt% PCR2
C	62,16	73,62
O	28,69	24,47
Ca	7,25	1,92
Al	0,77	-
Si	0,60	-
Na	0,35	-
Mg	0,18	-

Fonte: A autora, 2023.

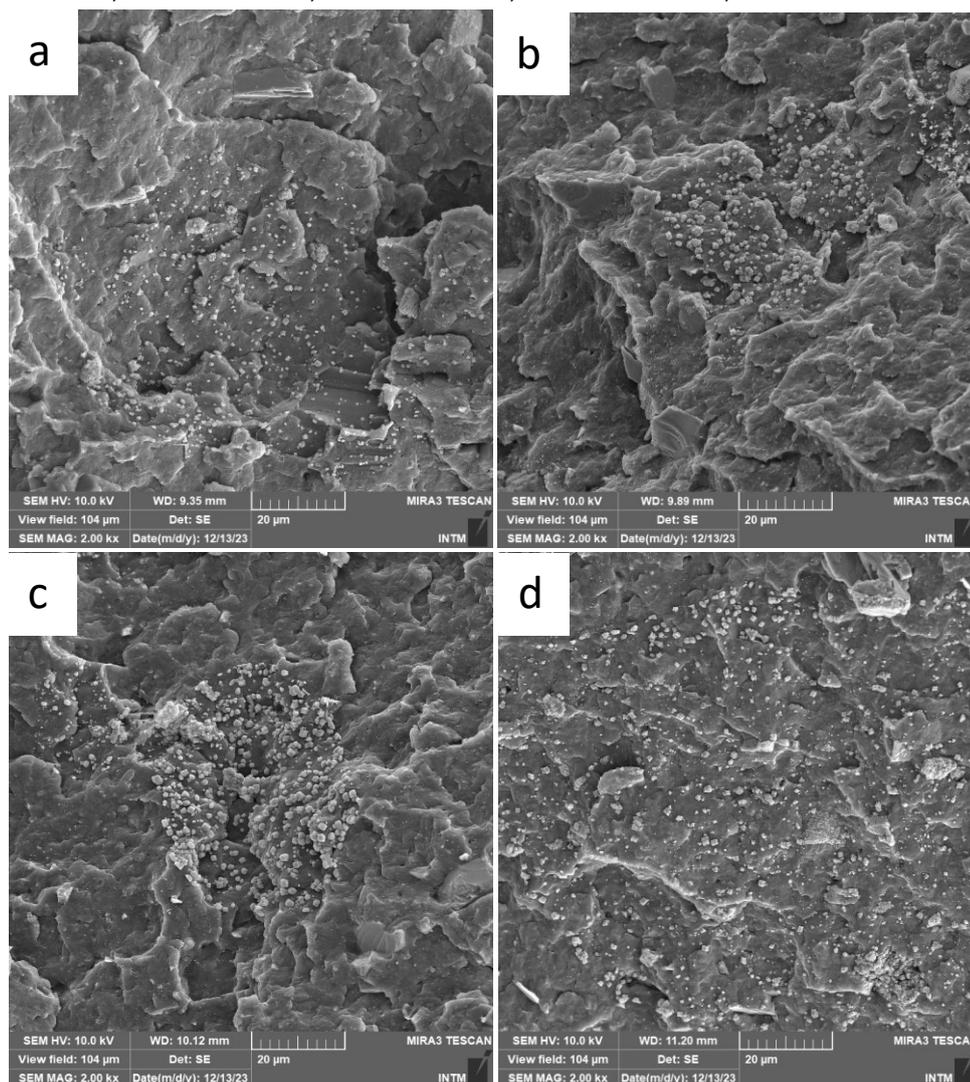
As Figuras 24 apresentam imagens de MEV em diferentes ampliações após a adição de carbonato de cálcio aos PCRs. É possível notar a presença de aglomerados de carga e sua distribuição não muito homogênea. Possivelmente uma nova extrusão prévia, antes da injeção, ajudaria a melhorar a dispersão e distribuição da carga na matriz polimérica. No entanto, isso significaria adicionar uma etapa a mais no processo produtivo.

Este estudo optou por adotar a abordagem de adicionar simultaneamente as resinas e a carga no funil de alimentação da injetora, sem a etapa preliminar de extrusão. Essa escolha foi motivada com a intenção de simular práticas comuns em fábricas de moldagem por injeção. Algumas empresas enfrentam desafios econômicos em comprar extrusoras, para conduzir uma etapa adicional na produção de compostos a partir de diferentes materiais, cada um com propriedades químicas, térmicas e mecânicas distintas.

Outro aspecto analisado é a possibilidade de adquirir misturas já extrudadas. Embora essa alternativa seja viável em cenários onde a composição dos produtos apresenta pouca variação, tornando-a uma opção interessante, a situação é diferente quando existe uma ampla diversidade nas composições, juntamente com diferentes

geometrias de produtos. Nesse caso, a compra de misturas prontas para cada variação, incluindo percentuais distintos de resinas de diferentes categorias, de partículas ou fibras de reforço, de aditivos e de pigmentos, resulta na acumulação de estoque e na redução da flexibilidade nas composições.

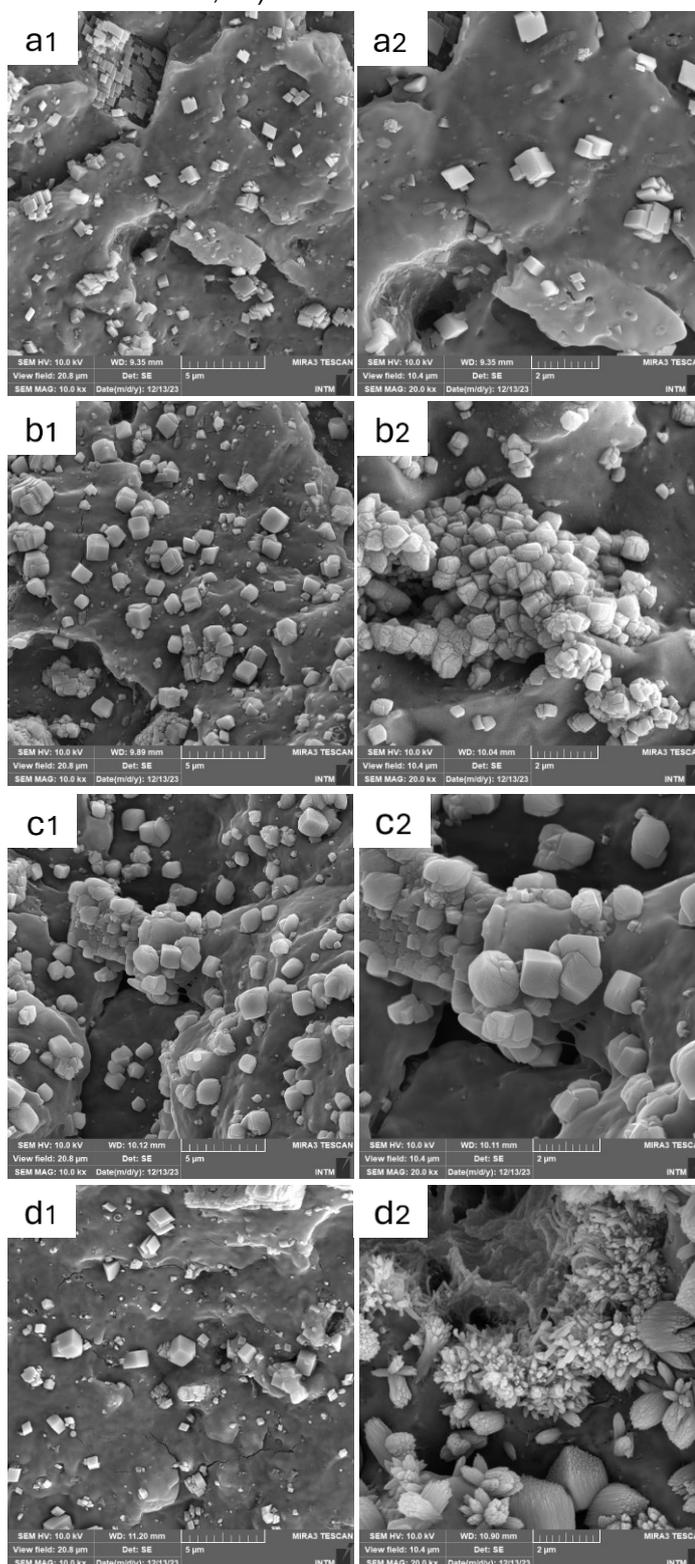
Figura 24 - Fotomicrografias dos PCRs com adição de carga, ampliados em 2000x e 5000x. A) PCR1-10CN, B) PCR1-20CN, C) PCR2-10CN e D) PCR2-20CN.



Fonte: A autora, 2023.

Segundo o fornecedor do composto de carga mineral, o carbonato de cálcio foi incorporado na resina para a produção do composto a partir de um dispositivo *Continuos Mixer* ou misturador contínuo, que promove uma mistura contínua de compostos com alta carga mineral (Farrel Pomini, 2013). Apesar disso, é possível observar ainda aglomerados (Figura 25).

Figura 25 - Fotomicrografias dos PCRs com adição de carga, ampliados em 10000x e 20000x. a1) PCR1-10CN em 10000x, a2) PCR1-10CN em 20000x, b1) PCR1-20CN em 10000x, b2) PCR1-20CN em 20000x c1) PCR2-10CN em 10000x, c2) PCR2-10CN em 20000x, d1) PCR2-20CN em 10000x, d2) PCR2-20CN em 20000x.



Fonte: A autora, 2023.

Segundo o estudo realizado por Junior (2017), a adição de ácido esteárico como tratamento superficial seria eficiente para promover uma maior adesão e dispersão da carga na matriz, dificultando a propagação de trincas.

Após a adição do composto de carbonato de cálcio, observou-se uma composição semelhante entre as amostras, variando conforme a região (Tabela 7).

Tabela 7 - Composição química do PCR1-10CN, PCR1-20CN, PCR2-10CN e PCR2-20CN obtida por EDS.

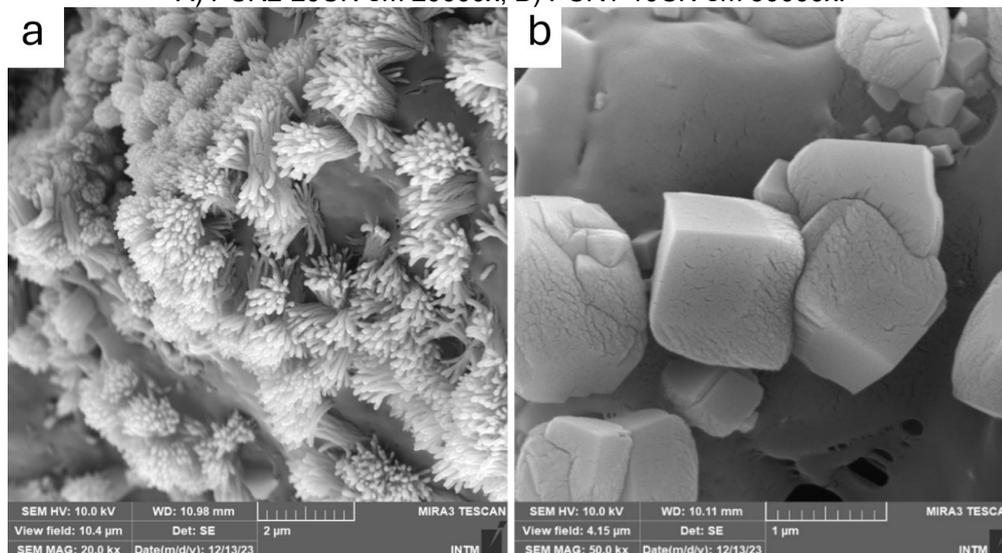
Elemento	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%
	PCR1-10CN	PCR1-20CN	PCR2-10CN	PCR2-20CN
C	65	60,11	49,13	36,55
O	26,24	28,51	31,24	25,46
Ca	8,2	11,06	19,18	36,74
Mg	0,56	0,3	0,45	0,66
Al	-	0,36	-	0,84
Si	-	-	-	0,36

Fonte: A autora, 2023.

O carbonato de cálcio é um mineral polimórfico, ou seja, que pode existir em diversas formas cristalinas (polimorfismos). Os três principais polimorfos do carbonato de cálcio são a calcita (β -CaCO₃), aragonita (λ -CaCO₃) e vaterita (μ -CaCO₃), cada um exibindo diferenças estruturais significativas. A calcita apresenta uma estrutura romboédrica, enquanto a aragonita possui uma estrutura ortorrômbica. A vaterita, por sua vez, possui uma estrutura hexagonal, semelhante a uma esfera ou uma flor. A Figura 26 a seguir ilustra visualmente essas diferenças estruturais, no qual a 26-A representa a aragonita e a 26-B, a calcita, conforme verificado no trabalho de De Paula (2006).

Em uma matriz de polipropileno, a escolha entre calcita e aragonita como reforço mecânico dependerá das propriedades desejadas do compósito final. Ambas as estruturas contribuem para aumentar a resistência mecânica, rigidez e outras propriedades, mas a eficácia dependerá da aderência, distribuição e orientação das partículas na matriz. Sendo assim, a calcita que representa a maior parte da estrutura identificada, possui uma maior estabilidade e possui maiores propriedades mecânicas. A aragonita que surgiu em menor quantidade, é metaestável, o que pode influenciar na eficácia do reforço (Miranda, 2019).

Figura 26 - Micrografias dos PCRs com adição de carga, ampliados em 20000x e 50000x. A) PCR2-20CN em 20000x, B) PCR1-10CN em 50000x.



Fonte: A autora, 2023.

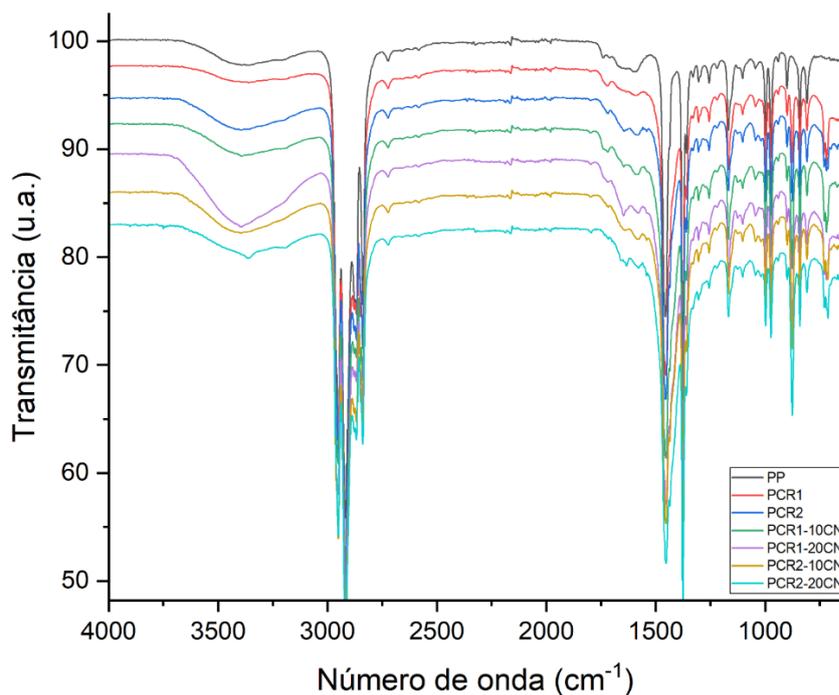
5.2. ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

O ensaio de FTIR foi realizado a fim de entender a composição química das amostras em estudo, por meio das ligações químicas presentes e dos picos característicos e, desta forma, identificar os materiais envolvidos na composição das amostras. Assim, a Figura 27 apresenta os espectros de FTIR com varredura entre 650 cm^{-1} e 4000 cm^{-1} .

As Tabelas 8 e 9 apresentam as referências de regiões, vibrações e ligações correspondentes aos picos analisados no FTIR.

Foi possível observar os picos característicos do polipropileno em todas as amostras com uma pequena variação, conforme observado nas Figuras 28 e 29. As bandas entre 3361 e 3395 cm^{-1} foram identificadas como uma ligação O-H, provavelmente referente a umidade que as amostras poderiam conter, conforme Ashenurst (2016).

De acordo com Veerasingam *et al.* (2020), os picos a 2915 , 2845 , 1472 , 1462 , 730 , 717 cm^{-1} são correspondentes ao polietileno, porém de forma bem definida apenas os picos 730 e 720 foram identificados, pela proximidade com os picos de polipropileno, e pela pequena porcentagem de PE nas amostras, é possível que os demais picos de PE estejam sobrepostos dentro dos picos do PP. Portanto, os reciclados estudados consistem em copolímeros de propileno-etileno, o que foi comprovado também por outros ensaios apresentados mais adiante.

Figura 27 – Espectros de FTIR das amostras entre 4000 cm^{-1} e 650 cm^{-1} .

Fonte: A autora, 2023

Segundo Coman *et al.* (2020) e Jovanovski *et al.* (2002), os picos localizados em: 1418-1420, 874-876 e 713 cm^{-1} são correspondentes à estrutura cristalina calcita do CaCO_3 . Enquanto conforme Chakrabarty e Mahapatra (1999), os picos: 1474, 1083, 854, 712 e 700 cm^{-1} são correspondentes a aragonita do CaCO_3 . Todos os picos da calcita (estrutura encontrada em maior quantidade para a carga mineral) foram identificados, e para a aragonita, os picos 712 e 700 foram encontrados, que corrobora com as estruturas cristalinas identificadas no MEV.

Tabela 8 - Números de onda e ligações correspondentes ao CaCO_3 pela análise de FTIR.

	Carbonato de Cálcio			
	Plavšić <i>et al.</i> (1999)	Chakrabarty , Mahapatra (1999)	Coman <i>et al.</i> (2019)	Jovanovsk <i>et al.</i> (2002)
	cm^{-1}	cm^{-1}	cm^{-1}	cm^{-1}
Vibração C-O do CaCO_3	-	-	1418	1428
CaCO_3 (Aragonita, vaterita)	-	1083, 1087	-	-
CaCO_3 (Calcita, vaterita)	879	874, 876	874	875
CaCO_3 (Aragonita)	-	844, 854	-	-
CaCO_3 (Calcita, Aragonita)	713	713	-	712
CaCO_3 (Vaterita)	-	744	-	-
CaCO_3 (Aragonita)	708	700	-	-

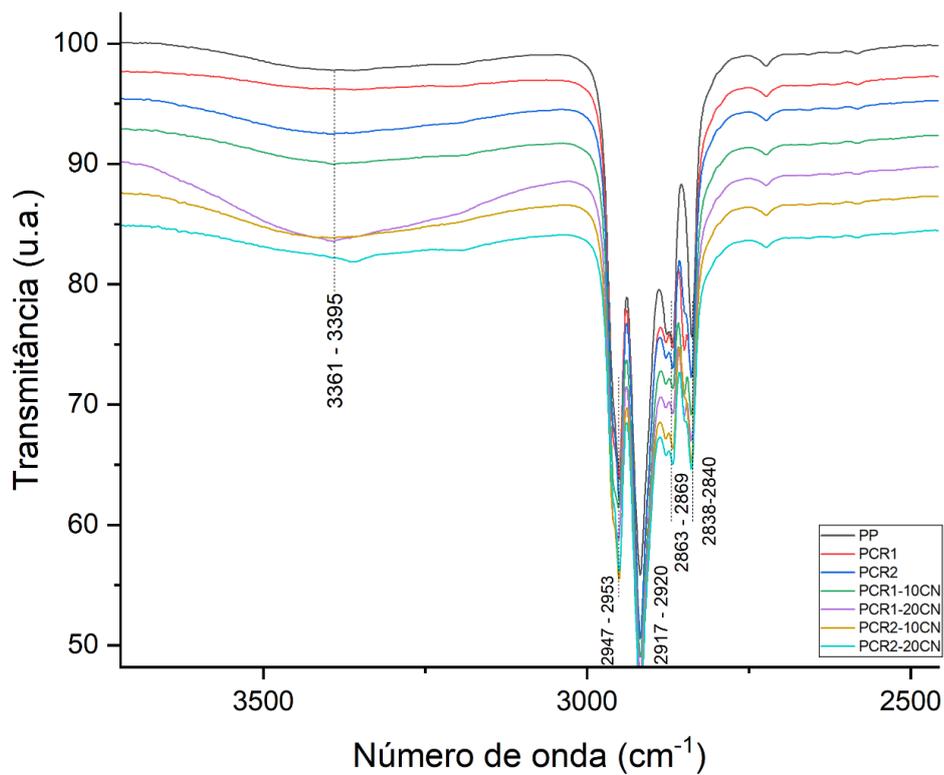
Fonte: Plavšić *et al.* (1999); Chakrabarty , Mahapatra (1999); Coman *et al.* (2019); Jovanovsk *et al.* (2002)

Tabela 9 - Números de onda e ligações correspondentes ao polipropileno, polietileno e hidroxila pela análise de FTIR.

	Polipropileno			Polietileno	Hidroxila (-OH)
	Prabowo, Pratama, Chalid (2017)	Veerasingam <i>et al.</i> (2020)	Caban (2022)	Veerasingam <i>et al.</i> (2020)	Ashenhurst (2016)
	cm ⁻¹	cm ⁻¹	cm ⁻¹	cm ⁻¹	cm ⁻¹
Alongamento OH	-	-	-	-	3200-3400
Estiramento CH	2950, 2918, 2836	2950, 2915, 2838	-	2915, 2845	-
Estiramento assimétrico CH ₃	-	-	2950	-	-
Estiramento assimétrico CH ₂	-	-	2915	-	-
Estiramento simétrico CH ₃	-	-	2860	-	-
Estiramento simétrico CH ₂	-	-	2837	-	-
Deformação CH ₂ e deformação simétrica CH ₃	1456, 1376	1455, 1377	1457, 1376	1472, 1462	-
Flexão C-C	1167	1166	1166	-	-
Flexão CH; Oscilação CH ₃	-	1166	1166	-	-
Banda de polipropileno isotático	998, 974, 842	-	-	-	-
Alongamento C-C	-	997	-	-	-
Balanço CH ₃ ; Flexão CH ₃	-	972	997, 972	-	-
Flexão CH	-	840	841	-	-
Balanço CH ₃ ; Alongamento C-C; Balanço CH ₂ ; Alongamento C-CH ₃ ; Balanço CH ₂ ; Alongamento C-C; Alongamento C-CH	-	808	809	730, 717	-

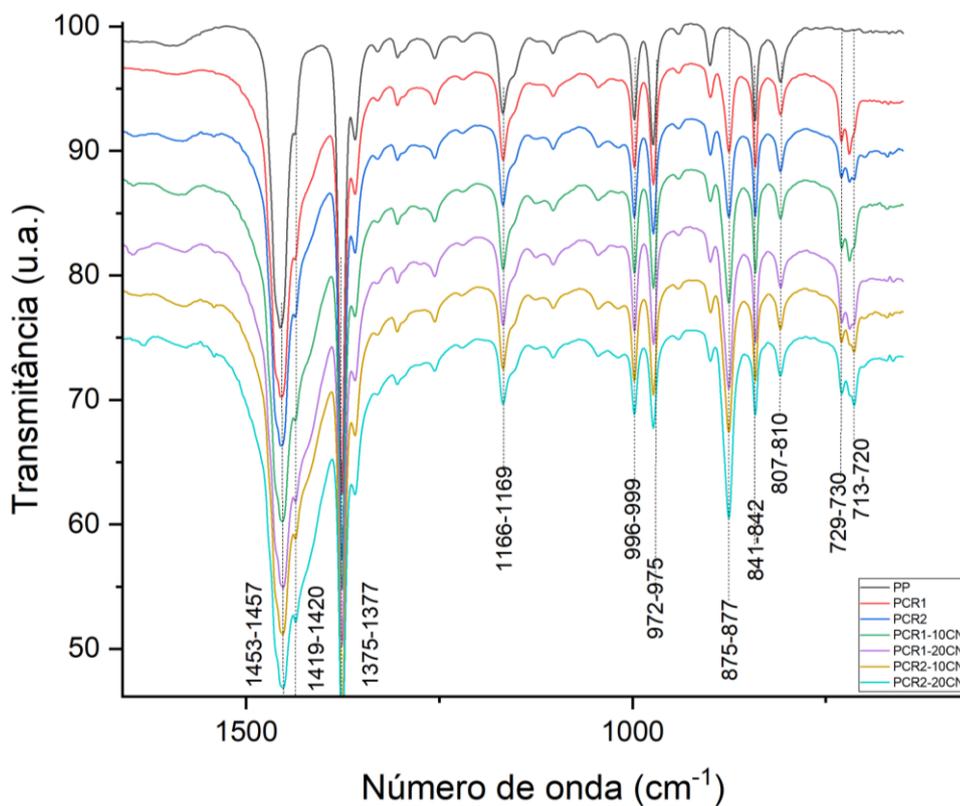
Fonte: Prabowo, Pratama, Chalid (2017); Veerasingam *et al.* (2020); Caban (2022); Veerasingam *et al.* (2020); Ashenhurst (2016).

Figura 28 - Espectros no infravermelho com identificação dos picos na região de varredura de 4000 a 2500 cm^{-1} .



Fonte: A autora, 2024.

Figura 29 - Espectros no infravermelho com identificação dos picos na região de varredura de 2000 a 650 cm^{-1} .

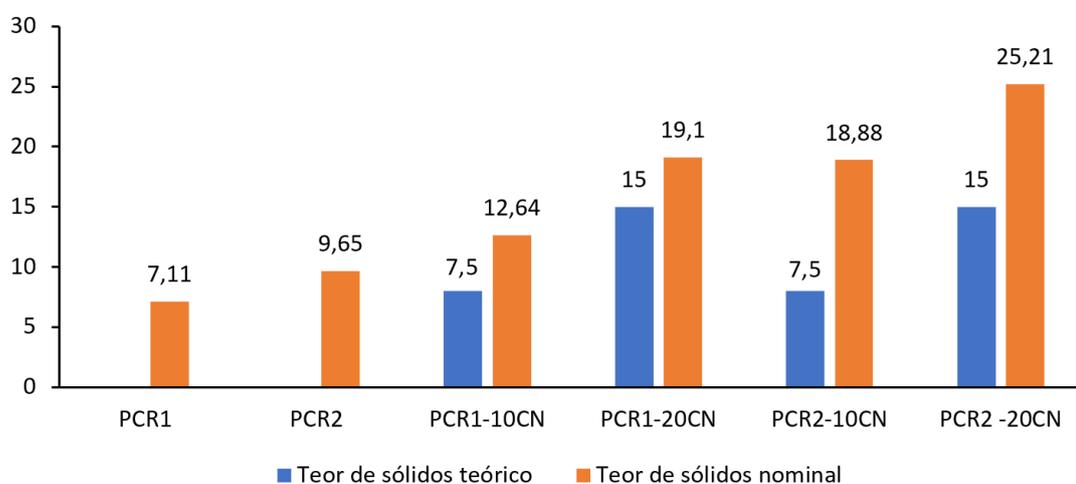


Fonte: A autora, 2024.

5.3. TEOR DE SÓLIDOS

Após a calcinação das amostras de PCR e seus compósitos foi obtido o teor de sólidos nominal de carbonato de cálcio, conforme apresentado na Figura 30. O gráfico também apresenta os valores teóricos de teor de sólidos, obtidos considerando uma porcentagem média de 75% de carbonato de cálcio no composto mineral e a porcentagem de composto mineral adicionado a cada amostra.

Figura 30 - Teor de sólidos teórico e nominal após a calcinação.



Fonte: A autora, 2023.

Foi observada uma diferença entre os teores, devido a já existência de carga nas amostras de PCR (7,11% e 9,65%). Além disso, devido a distribuição não tão homogênea do PCR com a carga mineral, conforme observado nas imagens de MEV, associado também a pequena amostra utilizadas no aquecimento (30g), provocou variações nos valores de teores nominais dos compósitos. Contudo, a pesagem das amostras evidenciou o aumento do teor de carbonato de cálcio nas amostras, ao adicionar uma maior porcentagem em massa do composto mineral.

5.4. CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)

A análise térmica das amostras pela técnica de DSC, teve como objetivo a determinação dos eventos térmicos e das amostras analisadas. Assim como avaliar eventuais alterações na cristalinidade das resinas e compósitos induzidas pela presença da carga mineral, além de verificar a influência de possíveis contaminantes.

Para isso, as amostras foram submetidas a dois ciclos de aquecimento intercalados por um ciclo de resfriamento (ANEXOS H, I e J). O primeiro aquecimento buscou eliminar o histórico térmico do material (Tabela 10), advindo dos processos de moldagem por injeção e extrusão, e o segundo para analisar as características térmicas sem a influência das condições de processamento (Tabela 11).

Tabela 10 - Temperaturas e entalpias de fusão para o primeiro aquecimento.

Amostras	T_{f1} (°C)		ΔH_{f1} (J/g)	
	Pico 1	Pico 2	Pico 1	Pico 2
PP	-	168,47	-	80,28
PCR 1	125,23	166,09	4,06	52,39
PCR 2	127,91	165,65	3,23	50,71
PCR1-10CN	125,68	167,34	3,25	55,59
PCR1-20CN	125,42	165,60	3,48	54,77
PCR2-10CN	129,10	166,42	3,43	55,33
PCR2-20CN	128,47	166,31	2,75	46,24

Fonte: A autora, 2023.

Tabela 11 - Temperaturas e entalpias de fusão para o segundo aquecimento.

Amostras	T_{f2} (°C)		ΔH_{f2} (J/g)	
	Pico 1	Pico 2	Pico 1	Pico 2
PP	-	165,65	-	76,02
PCR 1	123,75	164,10	3,65	50,76
PCR 2	127,57	162,13	3,13	48,94
PCR1-10CN	124,37	164,87	3,52	57,78
PCR1-20CN	124,25	163,10	2,99	56,25
PCR2-10CN	128,20	164,27	3,28	54,47
PCR2-20CN	127,93	163,27	2,49	49,77

Fonte: A autora, 2023.

Dois picos endotérmicos relativos à fusão do polímero foram identificados no primeiro e segundo aquecimentos. Segundo a American Chemical Society (2017), o polietileno possui um ponto de fusão mais baixo, entre 120°C e 130°C, respectivamente; enquanto o polipropileno funde entre 160°C e 170°C. Assim, os picos 1 e 2 indicam a presença e fusão do polietileno e do polipropileno,

respectivamente. Como esperado, o PP virgem, apresenta apenas um pico endotérmico, indicando que não há presença de polietileno, confirmando se tratar de um homopolímero.

Por apresentarem valores de densidade semelhantes, a separação do PE e PP se torna mais difícil, gerando contaminações cruzadas. Conforme o trabalho realizado por Goodship (2007), os pontos de fusão para o PEBD, PELBD e PEAD são bastante próximos (115°C, 123°C e 130°C, respectivamente), não sendo possível apenas com essa técnica, afirmar sobre qual ou quais polietilenos se trata.

A partir do DSC também foi possível calcular a porcentagem de teor de polietileno (Tabela 12), a partir da Equação 6 para análise semi-quantitativa:

$$\text{Teor de PE (\%)} = \frac{\Delta H_{PE}}{\Delta H_{total}} \times 100 \quad (\text{Eq. 6})$$

Tabela 12 - Teor de polietileno nas amostras no segundo aquecimento.

Amostras	Teor de PE (%)
PP	0,00
PCR 1	6,71
PCR 2	6,01
PCR1-10CN	5,75
PCR1-20CN	5,05
PCR2-10CN	5,67
PCR2-20CN	4,76

Fonte: A autora, 2023.

Segundo os estudos realizados por Tall (2000), a miscibilidade entre o polipropileno e o polietileno é algo contraditório, por vezes apresentando os dois materiais como imiscíveis. Dessa forma, a união das duas resinas pode influenciar em suas propriedades positivamente ou negativamente, tanto para propriedades reológicas, quanto mecânicas ou mesmo térmicas, dependendo de fatores como a processabilidade, técnicas de mistura e tipos de *grades* utilizados. A presença de PE pode interferir na cristalinidade do PP e em suas propriedades, mesmo em pequenas quantidades.

Por meio da Tabela 13, foi possível verificar as temperaturas de fusão (T_i) para o PCR1 e PCR2, que podem ser influenciadas pela exposição a radiações

ultravioletas, degradações térmicas e degradações termo-oxidativas, principalmente durante processos de moldagem por extrusão e injeção. Segundo Aumnate *et al* (2019), a adição de PEBD desloca a temperatura de fusão para temperaturas mais baixas, além de reduzir a taxa de cristalização do PP.

A partir dos dados obtidos na Tabela 11 e utilizando a Equação 5 foi calculado o grau de cristalinidade das amostras. Para o valor de W_p foi considerada a quantidade de resina restante após retirar o teor de sólidos encontrado após a calcinação (Figura 30) e o teor da fase do outro polímero, calculado através da Equação 6. Os valores encontrados estão descritos na Tabela 13.

Tabela 13 - Temperaturas de cristalização (T_c) e grau de cristalinidade da fase etileno (X_{c1}) e da fase propileno (X_{c2}) das amostras.

Amostras	Teor de sólidos nominal (%)	T_c (°C)	X_{c1} (%)	X_{c2} (%)
PP	0,00	112,0	0,00	36,37
PCR 1	7,11	112,3	18,57	28,18
PCR 2	9,65	113,0	17,77	27,76
PCR1-10CN	12,64	112,1	20,89	33,88
PCR1-20CN	19,1	113,5	20,21	35,48
PCR2-10CN	18,88	112,6	19,74	34,54
PCR2-20CN	25,21	112,5	17,85	34,00

Fonte: A autora, 2023.

Como o polipropileno isotático tem alto grau de cristalinidade, variando entre 30-60%, é possível que o PP virgem seja um polipropileno isotático. Os PCRs possuem menor grau de cristalinidade em relação ao PP virgem, que pode ser relacionado aos diferentes *grades* de polipropileno que os compõem, que são de copolímero de propileno-etileno, conforme resultado de FTIR, comprovado também pela existência de dois picos de fusão no DSC.

Contudo, foi observado que com a adição da carga mineral houve um aumento do grau de cristalinidade da fase de polipropileno (X_{c2}) dos PCRs com carga, em relação aos PCRs sem carga mineral, aproximando seus valores do resultado obtido para o PP virgem. Esses dados corroboram com o estudo realizado por Khare, Mitra. e Radhakrishnan (1996), que apresentam o carbonato de cálcio atuando como um

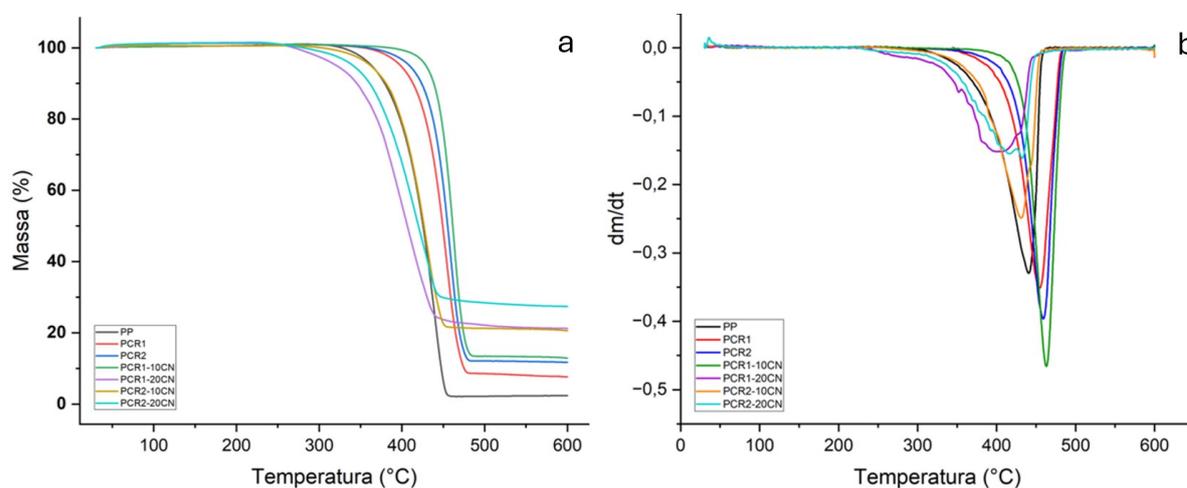
agente nucleante para o PP, aumentando a taxa de crescimento dos esferulitos e a cristalinidade.

5.5. TERMOGRAVIMETRIA (TG)

A termogravimetria foi realizada para todas as amostras, a fim de verificar a variação de massa em função da temperatura aplicada, e comparar os resultados entre as amostras. As curvas de TG e DTG (derivada da TG) foram apresentados na Figura 31, para o intervalo de temperatura de 30°C a 600°C. Com base nos gráficos foi produzida a Tabela 15, que resume os dados obtidos.

Figura 31 - Curvas de TG e DTG das amostras entre 30°C e 600°C.

a) Gráfico de TG e b) Gráfico de DTG.



Fonte: A autora, 2023.

Conforme a Tabela 14, o PCR1 e o PCR2 apresentaram maior resistência à degradação térmica, restando mais massa ao final do aquecimento em relação ao PP virgem, com diferença de 6,45% e 10%, respectivamente. Indicando uma maior estabilidade térmica para os reciclados.

Entre o intervalo de 600°C a 900°C, foi identificado o pico de degradação térmica do carbonato de cálcio, que ocorreu acima de 700°C, conforme a Figura 32 e Tabela 15. Indicando que a degradação do carbonato não ocorreu no mesmo intervalo de temperatura das resinas poliméricas, comportamento característico de um agente nucleante não sensível, ou seja, que não se funde na temperatura de processamento do Polipropileno.

Tabela 14 - Dados obtidos a partir dos gráficos de TG e DTG entre 30°C e 600°C.

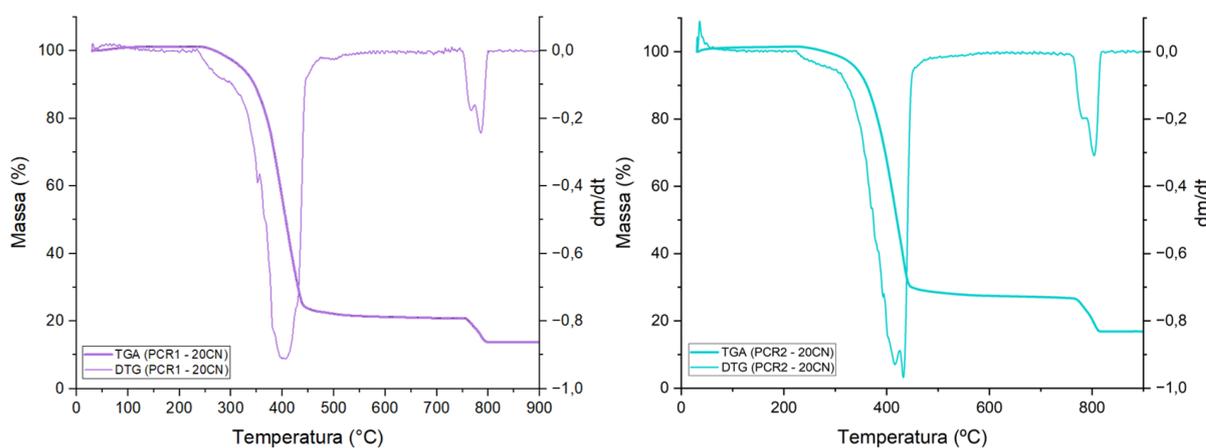
Amostras	T_{onset} (°C)	T_{pico} (°C)	T_{endset} (°C)	Resíduo a 600°C (%)
PP	367,67	440,63	457,26	2,18
PCR 1	400,00	454,17	479,17	8,49
PCR 2	418,67	459,17	481,17	12,00
PCR1-10CN	429,00	463,00	485,00	13,42
PCR1-20CN	322,00	404,33	446,67	21,76
PCR2-10CN	359,17	431,00	458,50	21,26
PCR2-20CN	333,83	432,50	448,00	28,40

Fonte: A autora, 2023.

Tabela 15 - Dados obtidos para a degradação térmica da carga mineral entre 30°C e 900°C.

Amostras	T_{onset} (°C)	T_{pico} (°C)	T_{endset} (°C)	Resíduo a 900°C (%)
PCR1-20CN	753,50	785,50	798,83	13,02
PCR2-20CN	762,79	803,73	816,32	18,53

Fonte: A autora, 2023.

Figura 32 - Curva de TG e DTG para o PCR1-20CN e PCR2-20CN.

Fonte: A autora, 2023.

Com a adição de composto mineral foi observado um aumento da temperatura de degradação para o PCR1-10CN, acima dos valores obtidos para o PCR1, PCR2 e a resina virgem, contudo houve uma redução na temperatura para o PCR1-20CN, PCR2-20CN, PCR2-10CN.

A partir da curva de DTG (Figura 31) é possível relacionar a largura do pico à velocidade de degradação de cada amostra, picos mais largos indicam uma degradação mais lenta, enquanto picos mais estreitos indicam uma degradação mais rápida. Apesar dos valores de temperaturas encontrados para as três últimas misturas, os picos indicam que a degradação ocorreu em um intervalo maior de temperatura (entre o T_{onset} e T_{endset}) em relação ao PP, apresentando uma degradação térmica mais lenta.

5.6. ÍNDICES DE FLUIDEZ ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

Conforme é possível observar na Tabela 16, a adição de carbonato de cálcio gerou um pequeno aumento da fluidez para o uso de 10% de composto, seguido de uma redução para 20%, tal fato pode se dar devido à maior heterogeneidade na distribuição do reforço na matriz polimérica. Dessa forma, pode ser necessário realizar triplicatas para cada amostra, pois segundo Gorga *et al.* (2005) a adição de carbonato de cálcio reduz o índice de fluidez.

Tabela 16 - Dados obtidos por meio da medida de índice de fluidez.

Identificação	IF (g/10min)
PP	9,51 ± 0,08
PCR1	7,25 ± 0,05
PCR2	12,72 ± 0,04
PCR1-10CN	7,44 ± 0,04
PCR1-20CN	6,83 ± 0,08
PCR2-10CN	14,62 ± 0,05
PCR2-20CN	14,24 ± 0,08

Fonte: A autora, 2023.

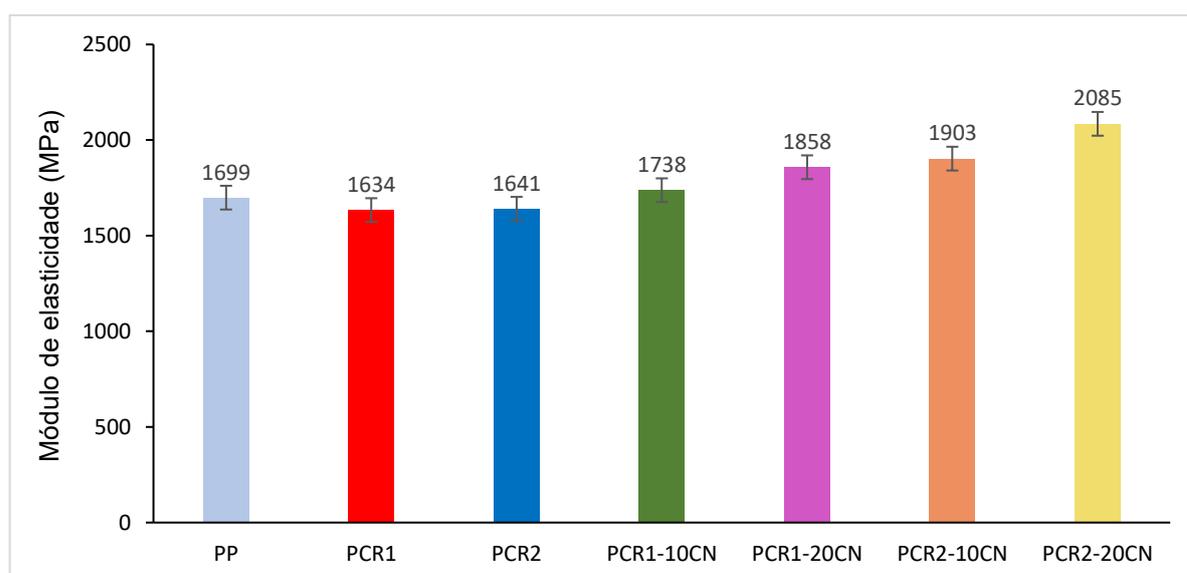
O aumento de fluidez do material pode resultar, a depender da geometria do produto (produtos grandes ou com geometrias mais complexas), em uma melhor capacidade de fluir pela cavidade do molde de injeção, reduzindo tempos de ciclo e evitando defeitos de processamento. Comparando os valores obtidos e considerando que o polipropileno pode possuir valores de índice de fluidez acima de 80 g/10min

(Braskem, c2024), todas as composições se mantiveram em um intervalo de baixa/média fluidez, o que evita variações nos parâmetros de processo.

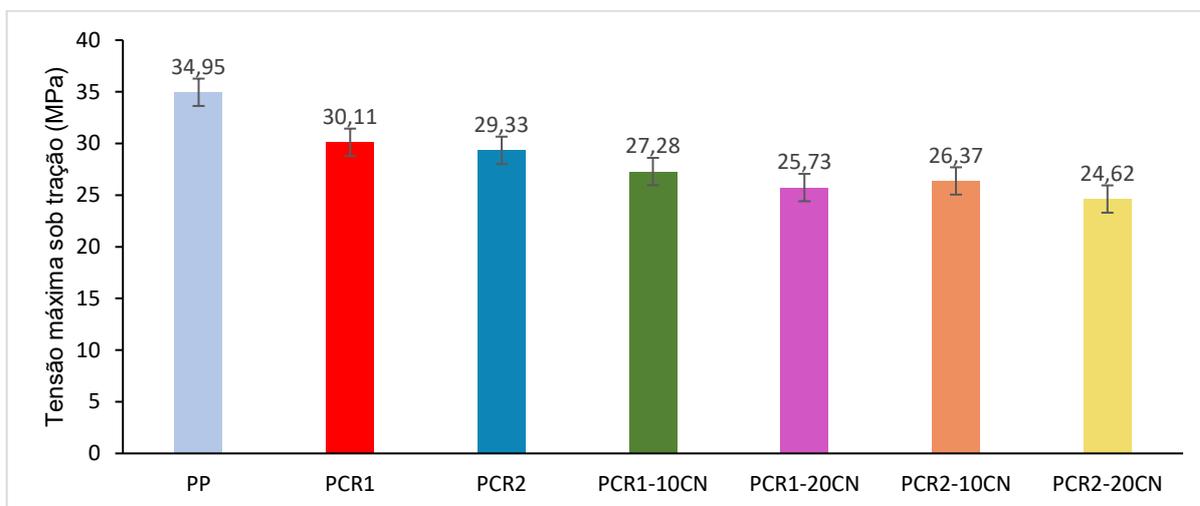
As Figuras 33 e 34 apresentam os dados obtidos ao realizar os ensaios mecânicos de resistência à flexão e à tração (ANEXOS A, B, C, D, E, F e G). Para o módulo de elasticidade do ensaio de flexão, foi observado que os PCRs sem carga possuem valores semelhantes ao PP virgem escolhido como base, com uma diferença de 3,82% e 3,41%, respectivamente, isso indica que apesar de todo o reprocessamento e menor grau de cristalinidade, os PCRs atingem valores de rigidez muito próximos a um PP virgem, podendo substituí-lo em diversas aplicações que necessitem dessa propriedade.

Com a adição de carbonato de cálcio ao polipropileno houve o aumento do módulo de elasticidade de flexão para os PCRs, com valores superiores ao PP virgem em: 2,3%, 9,36%, 12% e 22,72%, respectivamente; a incorporação da carga mineral a resina, reduz a movimentação das cadeias poliméricas, resultando em uma maior resistência à flexão, proporcional ao aumento de carbonato de cálcio. As partículas de CaCO_3 são conhecidas por atuarem como partículas de reforço, gerando uma estrutura mais rígida ao composto polimérico. Além disso, segundo Manrinch (2005), o aumento da cristalinidade observado anteriormente, reflete no aumento das propriedades mecânicas como a resistência à rigidez, que corrobora com os valores encontrados.

Figura 33 – Dados obtidos a partir do ensaio de resistência à flexão.



Fonte: A autora, 2023.

Figura 34 – Dados obtidos a partir do ensaio de resistência à tração.

Fonte: A autora, 2023.

A resistência à tração é a capacidade do material de resistir a força de estiramento proposta. Dessa forma, observou-se que os PCRs possuem valores mais baixos para essa propriedade, e com a adição do carbonato houve uma redução em relação aos PCRs sem carga (PCR1-10/20: 9,39% e 14,54%; PCR2-10/20: 5,72% e 11,97%).

Segundo Marinch (2005), esferulitos menores resultam em uma propensão maior de ruptura durante o estiramento sob tração, devido ao menor grau de ancoragem entre as estruturas cristalinas. A atuação do carbonato de cálcio como um possível agente nucleante, pode ter gerado menores esferulitos.

De acordo com Zebarjad *et al.* (2004), o polímero e o carbonato de cálcio possuem diferentes tendências à deformação, o que pode gerar delaminações. Assim, se houver uma má dispersão da carga, como observado nas micrografias do MEV, é possível gerar uma redução na resistência à tração, pois a força aplicada está sendo utilizada na delaminação e não no cisalhamento do polímero.

Em resumo, o aumento da rigidez, uma possível formação de esferulitos menores, uma menor distribuição da carga e a formação de aglomerados, podem gerar uma maior dificuldade para o material resistir ao estiramento, provocando a redução dessa propriedade.

5.7. ANÁLISE DE CUSTO

Com a utilização de PCR na formulação, houve uma redução de custo em 21,86% (PCR1) e 22,27% (PCR2) em relação à utilização do PP virgem, conforme a Tabela 17. Com a adição do composto de carbonato de cálcio é possível observar uma nova redução de custo, que vai de 24,40% a 27,26%.

Tabela 17 - Redução de custo em relação ao uso de 100% de resina virgem a partir de dados de 2024.

Identificação	Percentual de custo (%)
PCR1	-21,86%
PCR2	-22,27%
PCR1-10CN	-24,40%
PCR2-10CN	-24,76%
PCR1-20CN	-26,94%
PCR2-20CN	-27,26%

Fonte: A autora, 2024.

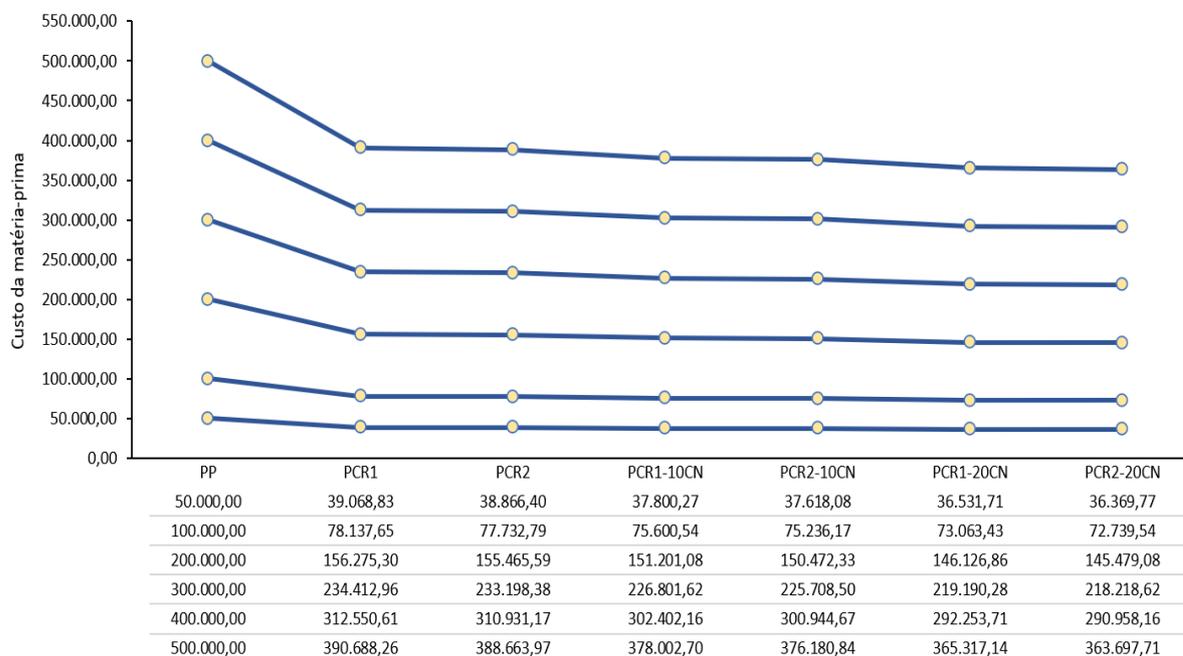
Os PCR1 e PCR2 possuem custos semelhantes, resultando em valores semelhantes de redução de custos que exercem um impacto significativo no custo da matéria-prima. Com a inclusão do composto de carbonato, é possível observar uma redução ainda maior, proporcional a quantidade de composto adicionado. Dessa forma, mesmo para PCRs com custos mais elevados, a incorporação do composto de carbonato permanece uma opção economicamente mais vantajosa quando comparada ao polipropileno virgem.

Como a análise de custo foi a última etapa avaliada, foi possível comparar os parâmetros de injeção, teores de cargas e índices de fluidez, e observar que as variações não impactaram de forma significativa nos ciclos de injeção, sendo possível desconsiderar esses fatores ao estruturar os custos de utilizar os materiais em estudo, aplicados ao processo de moldagem por injeção.

A fim de ilustrar a viabilidade financeira de utilizar os PCRs e em adicionar a carga mineral, a Figura 35 apresenta a economia anual no custo da matéria-prima, em relação a aplicação de 100% resina virgem. Todas as comparações foram realizadas para um mesmo produto hipotético de 2kg. O gráfico foi elaborado

considerando os custos anuais com matéria-prima virgem de: R\$ 50.000,00; R\$ 100.000,00; R\$200.000,00; R\$300.000,00; R\$400.000,00 e R\$500.000,00.

Figura 35 – Simulação de custo (R\$) da matéria-prima utilizada em um ano.



Fonte: A autora, 2024.

Conforme observado, considerando o custo das resinas e do composto deste trabalho, em um ano é possível identificar uma economia considerável com a troca da resina virgem pela resina de PCR, que aumenta com a adição do composto mineral.

A redução se torna ainda mais evidente conforme o custo anual com matéria-prima aumenta. Como exemplo, para um gasto de R\$500.000,00/ano em PP, ao trocar pelos PCRs há uma economia de R\$109.311,74 (PCR1) e de R\$111.336,03 (PCR2).

Adicionando o composto de carbonato de cálcio a composição, há uma economia de R\$121.997,30 (PCR1-10CN) e R\$123.819,16 (PCR1-20CN) em relação ao PP virgem. E em relação ao PCR1, uma economia de R\$12.685,56 (10CN) e R\$14.507,42 (20CN).

Para o PCR2 há uma economia de R\$ 134.682,86 (10CN) e R\$ 136.302,29 (20CN) em relação ao PP virgem. Relacionando a resina PCR2 com e sem adição de composto, uma economia de R\$ 23.346,83 (10CN) e de R\$ 24,966,26 (20 CN) pode ser obtida.

6. CONCLUSÃO

A partir das análises de MEV, EDS e FTIR, foi possível identificar cargas minerais nos PCRs, que não foram adicionadas pelos fornecedores, advindas, então, da composição dos produtos reciclados. Também foi possível identificar a presença das estruturas cristalinas calcita e aragonita nas cargas minerais, além da identificação de uma fase de polietileno, por se tratar de um copolímero propileno-etileno. Além disso, foi atestado o nível de dispersão e distribuição da carga mineral adicionada, mostrando a presença de aglomerados e que houve uma média distribuição das cargas.

A partir do DSC foi possível calcular semi-quantitativamente a porcentagem da fase de polietileno já existente nos PCRs, pouco acima de 6%. Ademais, a adição do composto de carbonato de cálcio aumentou a cristalinidade dos PCRs.

Para a curva de TG e de DTG, os PCRs apresentaram uma maior resistência térmica em relação ao PP virgem. Com a adição do reforço, o melhor resultado foi obtido para a amostra PCR1-10CN, com aumento da temperatura de degradação de quase 30°C em relação ao PP virgem.

Não houve grande variação no índice de fluidez dos PCRs e compósitos em relação ao PP virgem, ou seja, a adição de carbonato não influenciou de forma significativa na fluidez, o que é positivo, pois ajuda a manter os parâmetros de processo de moldagem com a substituição do PP virgem pelos compósitos.

Os PCRs apresentaram valores de resistência à flexão próximos aos do PP virgem. Ganhos em rigidez ao adicionar a carga foram observados, devido ao aumento no módulo de elasticidade obtido a partir do ensaio de flexão (2,3%, 9,36%, 12% e 22,72% para as amostras PCR1-10CN, PCR1-20CN, PCR2-10CN e PCR2-20CN, respectivamente). O que torna possível substituir o PP virgem em diversas aplicações que necessitem dessa propriedade, como por exemplo os móveis plásticos, ou mesmo nas que não possuem tanta exigência mecânica, como itens de utilidades domésticas e embalagens de cosméticos.

Houve a queda da resistência à tração com a adição do carbonato em relação ao PCRs sem carga, devido a possível formação de menores esferulitos e a presença de aglomerados de carga.

Para os custos, houve uma redução significativa (acima de 20%) ao trocar o PP virgem pelos PCRs. Além disso, o baixo custo da carga promoveu uma nova redução

em relação ao PP (variando entre 24% e 27%). Assim, uma empresa que consuma R\$500.000,00 em PP virgem anualmente, pode ter uma economia de até R\$111.336,03 ao substituí-lo por PCR e de até R\$136.302,29 ao substituí-lo pelo compósito. A redução se torna ainda mais evidente conforme o custo anual com matéria-prima aumenta.

Com o uso dos PCRs e compósitos além de ganhos em redução de custo, é possível atingir propriedades indicadas para inúmeras aplicações. Havendo assim, um ganho em sustentabilidade, por utilizar uma menor quantidade de resina virgem, proveniente de fontes não renováveis, e por incentivar a reciclagem e valorização de resíduos pós consumo.

REFERÊNCIAS

- ABIPLAST. Perfil 2020 – **As indústrias de transformação e reciclagem no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira das Indústrias do Plástico, 2021. 57 p.
- ABIPLAST. Perfil 2022 – **As indústrias de transformação e reciclagem de Plástico no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira das Indústrias do Plástico, 2023. 61 p.
- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2022. 64 p.
- ADMIN. **Resinas PCR e PIR. Você sabe a diferença?**, Plastic Insights, 2022. Disponível em: <https://bit.ly/3IWZhDY>. Acesso em: 16 abr. 2023.
- AFINKO. **O que é o Ensaio de Flexão?**. Afinko Soluções em Polímeros, 28 Jan. 2021. Disponível em: <https://afinkopolimeros.com.br/o-que-e-o-ensaio-de-flexao/>. Acesso em: 21 abr. 2023.
- AFINKO. **O que é o ensaio de Termogravimetria (TGA)?**. Afinko Soluções em Polímeros, 23 Abr. 2020. Disponível em: <https://afinkopolimeros.com.br/o-que-e-o-ensaio-de-termogravimetria-tga/>. Acesso em: 21 abr. 2023.
- ALCÂNTARA, T. **Microsoft lança mouse feito com plástico retirado do oceano**. G1, 22 de abril de 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/inovacao/noticia/2022/04/22/microsoft-lanca-mouse-feito-com-plastico-retirado-do-oceano.ghtml>. Acesso em: 25 fev. 2024.
- AMB SCIENCE ENGENHARIA. **O lixo e seu impacto ambiental**. [s. l.]. Disponível em: <https://ambscience.com/o-lixo-e-seu-impacto-ambiental/#:~:text=Al%C3%A9m%20da%20polui%C3%A7%C3%A3o%20do%20ar,bem%20como%20aos%20impactos%20paisag%C3%ADsticos>. Acesso em: 16 abr. 2023.
- ASHENHURST, J. **Infrared Spectroscopy: A Quick Primer On Interpreting Spectra**. Em: Master Organic Chemistry. 23 nov. 2016. Disponível em: https://www.masterorganicchemistry.com/2016/11/23/quick_analysis_of_ir_spectra/. Acesso em: 29 fev. 2024.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D 1238: Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer**. Pennsylvania: ASTM, 2013. 16 p.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D 638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. Pennsylvania: ASTM, 2022. 16 p.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D 6980: Standard Test Method for Determination of Moisture in Plastics by Loss in Weight**. Pennsylvania: ASTM, 2017. 6 p.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D 790: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**. Pennsylvania: ASTM, 2017. 12 p.

AUMNATE, C.; RUDOLPH, N.; SARMADI, M. Recycling of Polypropylene/Polyethylene Blends: Effect of Chain Structure on the Crystallization Behaviors. **Polymers**, v. 11, n. 9, p. 1456, 6 set. 2019.

BAHR JÚNIOR, R. **Histórico térmico dos materiais poliméricos: sua importância nos procedimentos de inspeção e manutenção**. EZAT Análises Térmicas, 2016.

BESSLER, Karl E.; e RODRIGUES, Laécio C. Os polimorfos de carbonato de cálcio: uma síntese fácil de aragonita. **Química Nova**, v. 31, n. 1, p. 178–180, 2008.

BIRON, M. **Thermoplastics and Thermoplastic Composites**. 2 ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2013.

BLUEVISION BRASKEM. **Mecânica, energética ou química? Como os tipos de reciclagem funcionam**. Mai, 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3IYqJBb>. Acesso em: 02 abr. 2023.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal, 2016. 496 p. Disponível em: https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/518231/CF88_Livro_EC91_2016.pdf. Acesso em: 14 mar. 2024.

BRASIL. **Decreto Nº 10.936, de 12 de Janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, v. 8 (extra), p. 2, 12 de Janeiro de 2022a.

BRASIL. **DECRETO Nº 11.043, de 13 de Abril de 2022. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 160, v. 72, p. 2, 14 de abril de 2022b.

BRASIL. **LEI Nº 12.305, 02 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 147, p. 3, 02 de Agosto de 2010.

BRASKEM. **Encontre um produto**. [s. l.]: Braskem, c2023. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/busca-de-produtos?p=353>. Acesso em: 21 abr. 2023.

CABAN, R. FTIR-ATR spectroscopic, thermal and microstructural studies on polypropylene-glass fiber composites. **Journal of Molecular Structure**, v. 1264, p. 133181, 15 set. 2022.

CALLISTER, W. D. Jr. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Abordagem Integrada**. LTC – Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., Rio de Janeiro, 2006.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CANEVAROLO Jr.; SEBASTIÃO V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**, Artliber, São Paulo, 2014.

CANEVAROLO, S. **Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006.

CECH, V.; PALESCH, E.; LUKES, J. The glass fiber–polymer matrix interface/interphase characterized by nanoscale imaging techniques. **Composites Science and Technology**, v. 83, p. 22-26, 2013.

CHAKRABARTY, D.; MAHAPATRA, S. Aragonite crystals with unconventional morphologies. **Journal of Materials Chemistry**, v. 9, n. 11, p. 2953–2957, 1999.

CLYNE, T. W.; HULL, D. **An Introduction to Composite Materials**. 3. ed. [S. l.]: Cambridge University Press, 11 jul. 2019. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781139050586/type/book>. Acesso em: 29 fev. 2024.

COMAN, A. E.; GABOR, A. R.; NICOLAE, C. A.; RADITOIU, V.; HUBCA, G.; e IORDACHE, T. The Influence of Plasticizer Nature and of Processing Mode Upon the Characteristics of Flexible Poly(vinyl chloride) Composites. **Materiale Plastice**, v. 56, n. 4, p. 845–851, 30 dez. 2019.

DE PAULA, S. M. **Uma abordagem de parâmetros da biomineralização em um sistema constituído por carbonato de cálcio**. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DEDAVID, B. A.; GOMES, Carmem Isse; e MACHADO, Giovanna. **Microscopia Eletrônica De Varredura: Aplicações E Preparação De Amostras: Materiais Poliméricos, Metálicos E Semicondutores**. [S. l.]: Edipucrs, 16 out. 2007.

DONATO, L. A.; BARBOSA, M. F. N.; BARBOSA, E. M. **Reciclagem: O caminho para o desenvolvimento sustentável**. *Polêmica* Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, jul./ago./ set. 2015.

DOS SANTOS, J. S. **Compósitos laminados têxteis de vidro e carbono em matriz epóxi reforçada com micro e nano sílica**. Dissertação (Mestrado em Materiais e processos de Fabricação) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2013.

DUARTE, Lauren da Cunha et al. Aplicações de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e sistema de energia dispersiva (EDS) no estudo de gemas exemplos brasileiros. **Pesquisas em Geociências**. Porto Alegre, v. 30, n. 2, p. 3-15, 2003.

EHRIG, R.; WALLING; R. L. **Recycling of Plastics**. In: GAUTHIER, M. M. (ed.). Engineered materials handbook desk edition. Ohio: ASM International, 1995. p. 292-296.

FACT. MR. **Plastic Furniture Market. Fact.MR**. 2022. Disponível em: <https://www.factmr.com/report/3574/plastic-furniture-market>. Acesso em: 21 abr. 2023.

FAGUNDES, T. F. da S. **Influência do Polipropileno modificado com anidrido maleico nas propriedades mecânicas e térmicas de compósitos de polipropileno com resíduos de concha calcinados**. 2018. 52 f. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

FAHLMAN, B. D. et al. **Chemistry in context: applying chemistry to society**. 9 ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2017. 590 p.

FARREL POMINI. **Continuous mixers**. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <https://www.farrel-pomini.com/site/assets/files/1068/farrelpomini-continuous-mixer-en.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2024.

FERNANDES, B. L.; DOMINGUES, A. J. Caracterização mecânica de polipropileno reciclado para a indústria automotiva. **Polímeros**, v. 17, n. 2, p. 85–87, jun. 2007.

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

FRAGA, S. C. L. **Reciclagem de Materiais Plásticos: Aspectos Técnicos, Econômicos, Ambientais e Sociais**. 1º ed. São Paulo: Editora Érika, 2014. 120 p.

GOODSHIP, Vannessa. Plastic Recycling. **Science Progress**, v. 90, n. 4, p. 245–268, out. 2007.

GORGA, C. J. P. et al. **Comparação do uso de carbonato de cálcio em compósitos utilizando uma matriz de polipropileno com diferentes IFs**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 8, 2005, Águas de Lindóia.

GRAND VIEW RESEARCH. **Plastic Compounding Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (PE, PP, PET, TPV, TPO, PVC, PS, PBT, PA, PC, ABS), By Application (Automotive, Electrical & Electronics), By Region, And Segment Forecasts, 2022 - 2030**.

Grand View Research, San Francisco, 2022. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/plastic-compounding-market/methodology>. Acesso em: 21 abr. 2022.

GRAND VIEW RESEARCH. **Polypropylene Market Size, Share & Trends Analysis Report By Polymer Type (Homopolymer, Copolymer), By Process, By Application, By End-Use, By Region, And Segment Forecasts, 2023 – 2030.**

Grand View Research, San Francisco, 2023a. Disponível em:

<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/polypropylene-market>. Acesso em: 21 abr. 2023.

HAN, Yong Sheng; HADIKO, Gunawan; FUJI, Masayoshi; e TAKAHASHI, Minoru. Effect of flow rate and CO₂ content on the phase and morphology of CaCO₃ prepared by bubbling method. **Journal of Crystal Growth**, [s. l.], v. 276, n. 3, p. 541–548, 1 abr. 2005.

HUGHES, M. **How long it takes everyday items to decompose.** The Waste Management & Recycling Blog. [s. l.]. 2022. Disponível em:

<https://www.forgerecycling.co.uk/blog/how-long-it-takes-everyday-items-to-decompose/#:~:text=Plastic%20can%20take%20anywhere%20from,factors%20such%20as%20sunlight%20exposure>. Acesso em: 21 abr. 2023.

IKEA Switzerland. **So entstand KUNGSBACKA.** Switzerland: IKEA Switzerland. 1 vídeo (2 min 35 seg). Disponível em:

https://www.youtube.com/watch?v=_SPlbwyCGdA. Acesso em: 20 abr. 2023.

JOVANOVSKI, G.; STEFOV, V.; ŠOPTRAJANOV, B.; BOEV, B. Minerals from Macedonia. IV. Discrimination between some carbonate minerals by FTIR spectroscopy. **Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen**, v. 177, n. 3, p. 241–253, 3 set. 2002.

JÚNIOR, R. P. L. **Influência da adição de carbonato de cálcio nas propriedades mecânicas de fitas planas de rafia estiradas produzidas pelo processo de extrusão plana (Flat die).** Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Faculdade de tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador, 2017.

Kaiak e ecosurf promovem ação de limpeza em prais do litoral brasileiro. **Natura**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://www.natura.com.br/blog/sustentabilidade/kaiak-oceano-e-ecosurf-promovem-acao-de-limpeza-no-litoral>. Acesso em: 29 fev. 2024.

KHARE, A.; MITRA, A.; RADHAKRISHNAN, S. Effect of CaCO₃ on the crystallization behaviour of polypropylene. **Journal of materials science**, v. 31, p. 5691-5695, 1996.

KOSHY, O.; SUBRAMANIAN, L.; THOMAS, S. Differential Scanning Calorimetry in Nanoscience and Nanotechnology. In: THOMAS, S. et al. (ed.). Thermal and Rheological Measurement Techniques for Nanomaterials Characterization. **Elsevier**, 2017. p. 109-122.

LOMASSO, A. L. et al. Benefícios e desafios na implementação da reciclagem: Um estudo de caso no Centro Mineiro de Referência em Resíduos (CMRR). **Revista Pensar Gestão e Administração**, v. 3, n. 2, 2015.

MACEDO, T. C. P. **Propriedades reológicas, térmicas e cinética de cristalização não isotérmica de blendas de polipropileno linear/polipropileno ramificado.** 2021. 178 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2021.

MACHADO, C. P. **Reciclagem de resíduos sólidos urbanos.** São Paulo: Editora Annablume, 2011.

MACHADO, G.; de LUCA, M. A.; SAMIOS, D. **Avaliação da orientação das esferulitas do polipropileno isotático após deformação.** In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, 23., 2000, Poços de Caldas. Anais [...]. São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, 2000. Disponível em: <http://www.s bq.org.br/ranteriores/23/resumos/0601/index.htm>. Acesso em: 21 abr. 2023.

MACIEL JÚNIOR, R. P. **Influência de cargas de reforço nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz polimérica.** 2017. 49 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

MADDAH, H. A. Polypropylene as a Promising Plastic: A Review. **American Journal of Polymer Science**, v. 6, n. 1, p. 1–11, 2016.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos: Rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes.** 1. ed. São Paulo: Artiliber Editora, 2005.

MARIA, V. P. K. **Estudo e caracterização do reforço proporcionado pelo carbonato de cálcio tratado com agente de acoplamento visando substituição parcial do negro de carbono em compósitos de borracha natural.** 2019. 51 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2019.

MARTINS, A. F.; SUAREZ, J. C. M.; MANO, E. B. Produtos poliolefinicos reciclados com desempenho superior aos materiais virgens correspondentes. **Polímeros**, v. 9, n. 4, p. 27–32, dez. 1999.

MAXIQUIM. **Cálculo dos índices de reciclagem mecânica de plásticos pós-consumo no Brasil.** nov. 2021. Apresentação Powerpoint: Disponível em: <https://www.picplast.com.br/portal/picplast/arquivos/Indices-Reciclagem-2020-PICPlast-divulgacao-final.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2023.

MELO, L. F. L. **Madeira plástica de carnaúba (Copernícia Prunifera), produzida com resinas de polipropileno e polietileno – processo, produto e características.** 2021. 97f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2021.

MIGUEL, J. J. P. **Estudo comparativo das propriedades térmicas e mecânicas do polipropileno reforçado com óxido de zinco, carbonato de cálcio e talco.**

2010. 82 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) - Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador, 2010.

MINDEROO FOUNDATION. **Plastic Waste Markers Index**. Austrália: 2023. Disponível em: <https://www.minderoo.org/plastic-waste-makers-index/>. Acesso em 16 abr. 2023.

MIRANDA, T. B. **Nanocompósitos de epóxi/nanopartículas de carbonato de cálcio: propriedades termomecânicas e de superfícies**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

MORGAN, G. M. **The circular economy: a wealth of flows**. 2ª ed. Reino Unido: The Ellen MacArthur Foundation, 2015.

OECD. **Global Plastic Outlook – Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options**. OECD Publishing, Paris, 2022a.

OECD. **Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060**. OECD Publishing, Paris, 2022b.

OECD. **Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options**. [S. l.]: OECD, 22 fev. 2022. ISBN 978-92-64-65494-5. DOI 10.1787/de747aef-en. Disponível em: https://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-plastics-outlook_de747aef-en. Acesso em: 12 mar. 2024.

PESSÔA, V. A. de F. **Reciclagem e reutilização de materiais poliméricos plásticos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

PLAV, B.; KOBE, S.; OREL, B. Identification of crystallization forms of CaCO₃ with FTIR spectroscopy. **Kovine Zlitate Tehnologije**, v. 33, n. 6, 1999.

Polipropileno H 155. Brasken. [S. l.: s. n.], c2024. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/busca-de-produtos?p=302>. Acesso em: 29 fev. 2024. Polipropileno H 301. Brasken (Folha de dados) [s. l.], mai, 2018.

PORTILHO, G. R.; FERREIRA, C. A. M.; PROENÇA, F. de O.; LUCAS, V. H. S.; de OLIVEIRA, M. C. F. **A importância da estatística descritiva no setor de qualidade em uma empresa de garrafas plásticas**. Revista Mythos, v. 15, n. 1, p. 45-57, 2021.

PRABOWO, I.; PRATAMA, J. N.; CHALID, M. **The effect of modified ijuk fibers to crystallinity of polypropylene composite**. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2017. p. 012020.

RABELLO, M; PAOLI, M. https://www.amazon.com.br/Aditiva%C3%A7%C3%A3o-Termopl%C3%A1sticos-Marcelo-Rabello/dp/8588098784#detailBullets_feature_div RABELLO, Marcelo; DE PAOLI, Marco-Aurelio. **Aditivação de termoplásticos**. São Paulo: Artliber, 2013.

REDAÇÃO AB. **Ford retira 1,2 bilhão de garrafas PET por ano da natureza.**

Automotive Business. 24 jul. 2019. Disponível em:

<http://automotivebusiness.com.br/pt/posts/noticias/ford-retira-12-bilhao-de-garrafas-pet-por-ano-da-natureza/>. Acesso em: 25 fev. 2024.

REDAÇÃO. **Tramontina utiliza embalagens compostas por 90% de plástico reciclado.** Mercado & Consumo, 29 dez. 2023. Disponível em:

<https://mercadoeconsumo.com.br/29/12/2023/sustentabilidade/tramontina-utiliza-embalagens-compostas-por-90-de-plastico-reciclado/>. Acesso em: 25 fev. 2024.

RIBEIRO, F. S.; BORGES, D. H.; BATISTA, J. V. L. Reutilização de reciclados no processo de injeção. In: **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 38., 2018. Maceió. Anais [...] Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2018. Disponível em:

https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_268_532_35533.pdf. Acesso em: 16 abr. 2023.

ROMANO, R. S. G.; OLIANI, W. L.; PARRA, D. F.; LUGÃO, A. B. Avaliação da degradação térmica do polipropileno irradiado. In: **Congresso Brasileiro de Polímeros**, 14., 2017, Água de Lindóia. Anais [...]. São Carlos: Associação Brasileira de Polímeros, 2017. Disponível em:

<http://repositorio.ipen.br/bitstream/handle/123456789/29087/24877.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2023.

SAMPAIO, M. Q. **Adição de carbonato de cálcio ao polietileno de baixa densidade e sua viabilidade para aplicação em embalagens.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Mackenzie, São Paulo, 2021.

SANTOS, W. N.; GREGÓRIO, R.; MUMMERY, P.; WALWORK, A. Propriedades térmicas de polímeros por métodos transientes de troca de calor. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 13, n. 4, p. 265-269, 2003.

SOUZA, Eliane De Fátima; BELTRAME JR., Milton; GONÇALVES, Erika Peterson; e SIMIONI, Andreza Ribeiro. Obtenção de vaterita estabilizada para aplicação em sistemas de liberação controlada de fármacos. **Revista Tecnologia e Tendências**, v. 11, n. 1, p. 138, 15 set. 2020.

SPINACÉ, M. A. da S.; PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. *Química Nova*. v. 28, n. 1, Fev. 2005.

SPLABOR. **O que é uma Balança Determinadora de Umidade.** SPLABOR Blog, 9 de Jan. 2018. Disponível em: <https://blog.forlabexpress.com.br/balanca-determinadora-de-umidade/>. Acesso em: 21 abr. 2023.

STRAPASSON, R. **Valorização do polipropileno através de sua mistura e reciclagem.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

STUART, B. H. **Analytical Techniques in Materials Conservation**. 1. ed. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd., 2007. 424 p.

Sustentabilidade | Tramontina. Disponível em: <https://global.tramontina.com/sustentabilidade>>. Acesso em: 25 fev. 2024.

TALL, Stefan. **Recycling of mixed plastic waste—is separation worthwhile**. Tese (Doutorado em Tecnologia) – Departamento de tecnologia de polímeros, Royal Institute of Technology. Estocolmo, 2000.

TRIPATHI, Devesh. **Practical guide to polypropylene**. Rapra Technology, 2002. 114 p.

UNEP. **Entenda a nova resolução sobre poluição plástica da ONU**. [s. l.], 3 fev. 2022. Disponível em: <http://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/entenda-nova-resolucao-sobre-poluicao-plastica-da-onu>. Acesso em: 8 abr. 2024.

VALGROUP. **A importância do plástico para a sociedade**. [s. l.]: c2022. Disponível em: <https://www.valgroupco.com/esg/a-importancia-do-plastico/>. Acesso em: 16 abr. 2023.

VEERASINGAM, S. et al. Contributions of Fourier transform infrared spectroscopy in microplastic pollution research: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 51, n. 22, p. 2681–2743, 17 nov. 2021.

VILHENA, A. (coord.). **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 4. ed. São Paulo: CEMPRE, 2018. 316 p.

WOOD MACKENZIE. **Why the polyolefins are the polymers to watch**. **Wood Mackenzie**. [s. l.], 07 out. 2020. Disponível em: <https://www.woodmac.com/news/opinion/why-polyolefins-are-the-polymers-to-watch/>. Acesso em: 21 abr. 2023.

ZANIN, M.; MANCINI, S. D. **Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia**. 2 ed. São Carlos: EdUFSCar, 2021, 179 p.

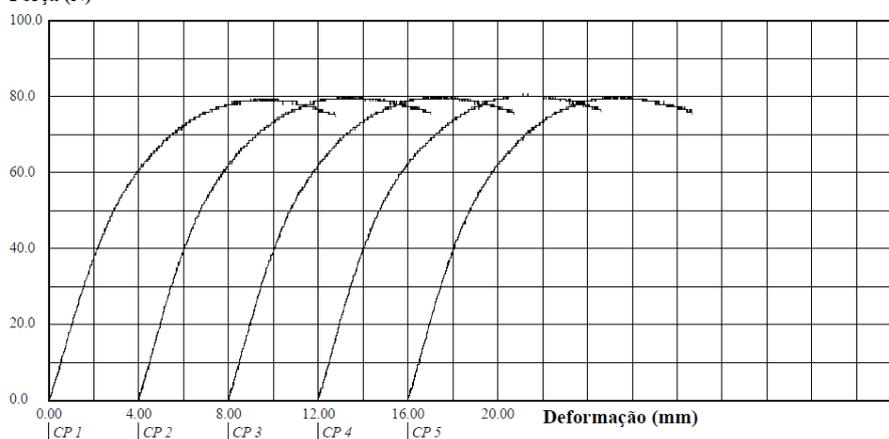
ZEBARJAD, S. M.; TAHANI, M.; SAJJADI, S. A. Influence of filler particles on deformation and fracture mechanism of isotactic polypropylene. **Journal of materials processing technology**, v. 155, p. 1459-1464, 2004.

ANEXO A - VALORES DE FLEXÃO E TRAÇÃO DO PP

Relatório de teste de resistência a flexão do PP

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Compr.Base (mm)	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP 1	1.706	137.83	79.5	46.6	1593
CP 2	1.708	137.83	80.2	47.0	1730
CP 3	1.708	137.83	80.2	47.0	1693
CP 4	1.708	137.83	80.9	47.4	1761
CP 5	1.708	137.83	80.2	47.0	1717
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.707	137.8	80.18	46.96	1699
Desv.Padrão	0.0005852	0.0000	0.4846	0.2713	64.25
Coef.Var.(%)	0.03428	0.0000	0.6044	0.5778	3.782
Mínimo	1.706	137.8	79.49	46.59	1593
Máximo	1.708	137.8	80.87	47.36	1761

Força (N)



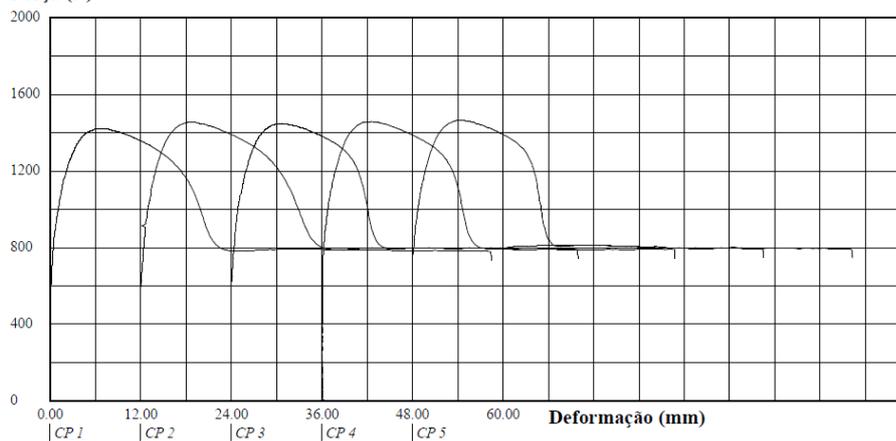
Relatório de teste de resistência a tração do PP

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)	Resistencia @Escoam. ES1 (MPa)	Alongamento @Escoam. ES2 (%)
CP 1	41.50	1423.08	34.29	*	*
CP 2	41.50	1455.22	35.07	*	*
CP 3	41.50	1449.07	34.92	19.1	0
CP 4	41.50	1459.32	35.17	0.1	0
CP 5	41.50	1465.48	35.31	*	*
Número CPs	5	5	5	2	2
Média	41.50	1450	34.95	9.604	0.2811
Desv.Padrão	0.0000	16.42	0.3957	13.40	0.2912
Coef.Var.(%)	0.0000	1.132	1.132	139.5	103.6
Mínimo	41.50	1423	34.29	0.1318	0.07515
Máximo	41.50	1465	35.31	19.08	0.4870

Escoam. ES1 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: : 0.200 %

Escoam. ES2 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: : 0.200 %

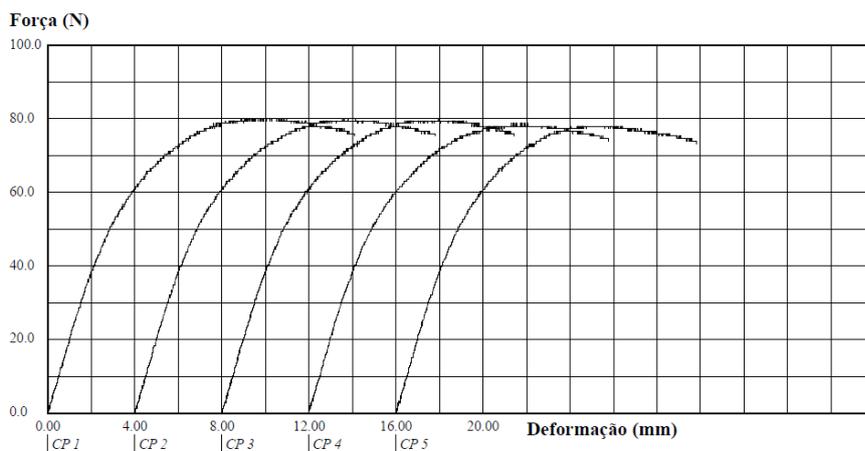
Força (N)



ANEXO B - VALORES DE FLEXÃO E TRAÇÃO DO PCR1

Relatório de teste de resistência a flexão do PCR1

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Compr.Base (mm)	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP 1	1.715	137.83	80.2	46.7	1633
CP 2	1.713	137.83	80.2	46.8	1612
CP 3	1.711	137.83	80.2	46.8	1672
CP 4	1.715	137.83	78.8	45.9	1616
CP 5	1.711	137.83	78.1	45.6	1635
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.713	137.8	79.49	46.40	1634
Desv.Padrão	0.001984	0.0000	0.9692	0.5622	23.36
Coef.Var.(%)	0.1158	0.0000	1.219	1.212	1.430
Mínimo	1.711	137.8	78.12	45.65	1612
Máximo	1.715	137.8	80.18	46.85	1672

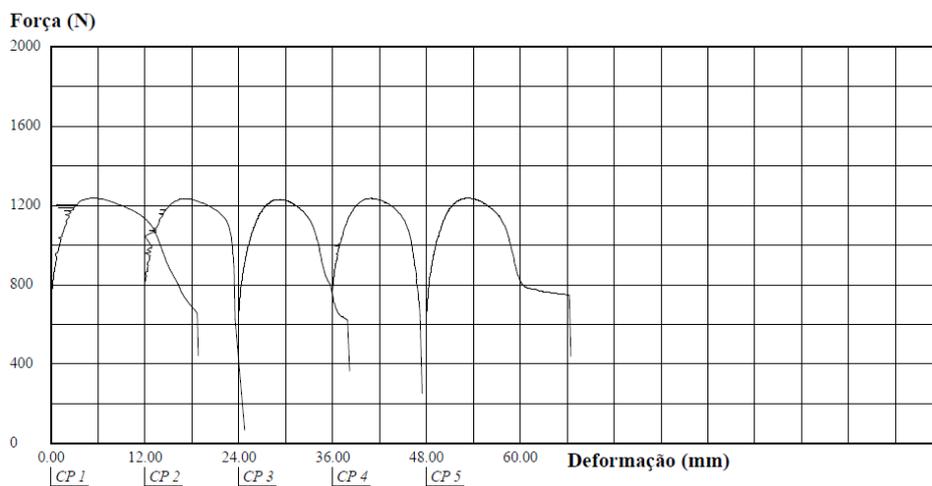


Relatório de teste de resistência a tração do PCR1

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)	Resistencia @Escoam. ES1 (MPa)	Alongamento @Escoam. ES2 (%)
CP 1	41.08	1239.81	30.18	*	*
CP 2	41.08	1235.71	30.08	*	*
CP 3	41.08	1232.29	30.00	*	*
CP 4	41.08	1237.76	30.13	*	*
CP 5	41.08	1239.13	30.16	*	*
Número CPs	5	5	5	0	0
Média	41.08	1237	30.11	*	*
Desv.Padrão	0.0000	3.035	0.07389	*	*
Coef.Var.(%)	0.0000	0.2454	0.2454	*	*
Mínimo	41.08	1232	30.00	*	*
Máximo	41.08	1240	30.18	*	*

Escoam. ES1 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: : 0.200 %

Escoam. ES2 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: : 0.200 %

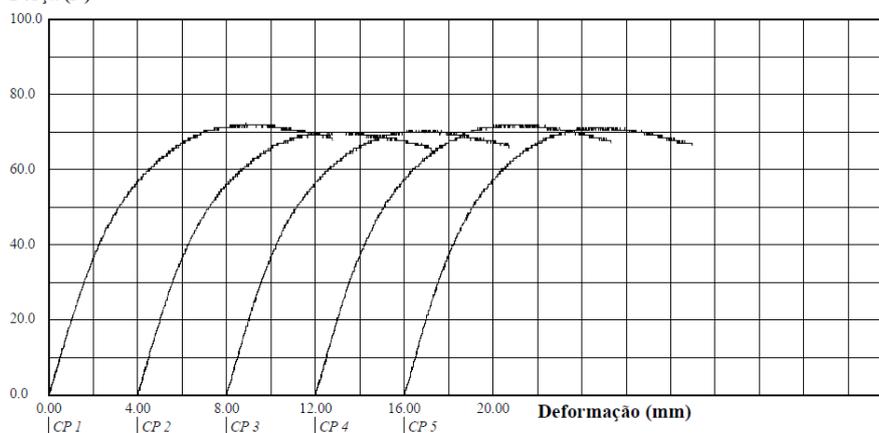


ANEXO C - VALORES DE FLEXÃO E TRAÇÃO DO PCR2

Relatório de teste de resistência a flexão do PCR2

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Compr.Base (mm)	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP 1	1.695	138.26	72.6	42.8	1593
CP 2	1.695	138.26	69.9	41.2	1652
CP 3	1.697	138.26	70.6	41.6	1638
CP 4	1.695	138.26	72.0	42.4	1665
CP 5	1.695	138.26	71.3	42.0	1656
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.696	138.3	71.27	42.03	1641
Desv.Padrão	0.0005815	0.0000	1.084	0.6443	28.42
Coef.Var.(%)	0.03429	0.0000	1.520	1.533	1.732
Mínimo	1.695	138.3	69.90	41.23	1593
Máximo	1.697	138.3	72.64	42.84	1665

Força (N)



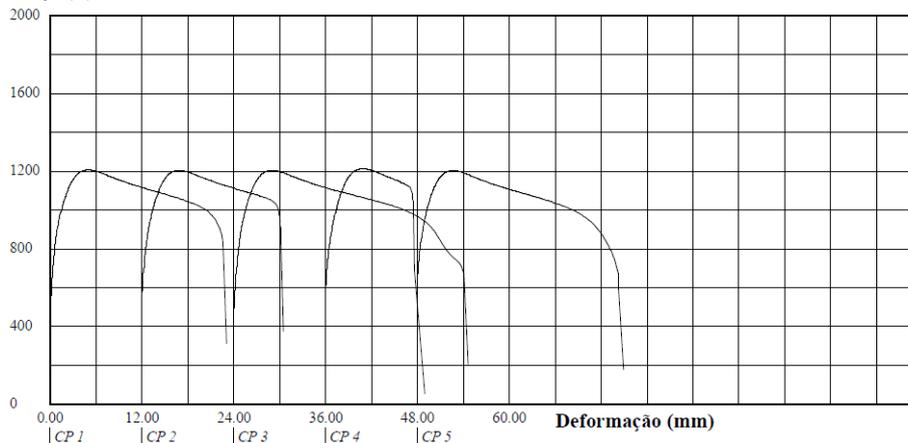
Relatório de teste de resistência a tração do PCR2

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)	Resistência @Escoam. ES1 (MPa)	Alongamento @Escoam. ES2 (%)
CP 1	41.17	1209.04	29.36	0.4	0
CP 2	41.37	1206.30	29.16	*	*
CP 3	41.14	1206.99	29.34	*	*
CP 4	41.21	1215.88	29.51	*	*
CP 5	41.17	1205.62	29.28	*	*
Número CPs	5	5	5	1	1
Média	41.21	1209	29.33	0.3841	0.03868
Desv.Padrão	0.08946	4.177	0.1264	*	*
Coef.Var.(%)	0.2171	0.3455	0.4308	*	*
Mínimo	41.14	1206	29.16	0.3841	0.03868
Máximo	41.37	1216	29.51	0.3841	0.03868

Escoam. ES1 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: 0.200 %

Escoam. ES2 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: 0.200 %

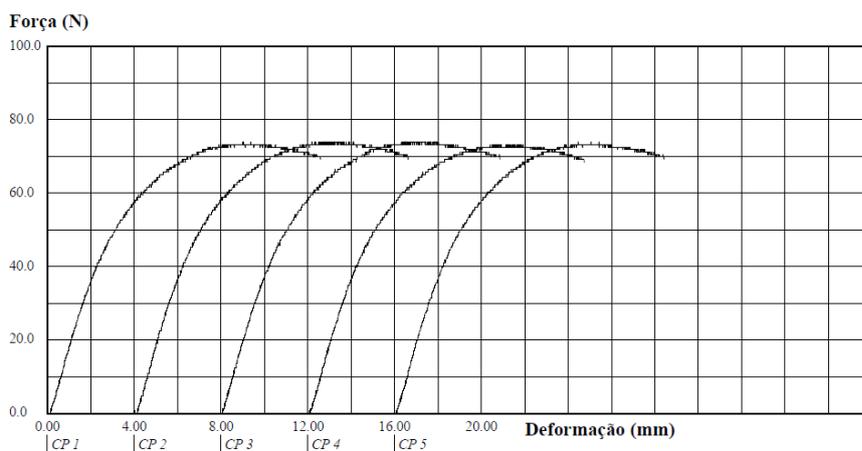
Força (N)



ANEXO D - VALORES DE FLEXÃO E TRAÇÃO DO PCR1-10CN

Relatório de teste de resistência a flexão do PCR1-10CN

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Compr.Base (mm)	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP 1	1.693	138.26	74.0	43.7	1749
CP 2	1.693	138.26	74.0	43.7	1763
CP 3	1.693	138.26	74.0	43.7	1706
CP 4	1.693	138.26	73.3	43.3	1737
CP 5	1.693	138.26	74.0	43.7	1733
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.693	138.3	73.88	43.64	1738
Desv.Padrão	0.0000	0.0000	0.3065	0.1810	21.24
Coef.Var.(%)	0.0000	0.0000	0.4149	0.4149	1.222
Mínimo	1.693	138.3	73.33	43.32	1706
Máximo	1.693	138.3	74.01	43.72	1763

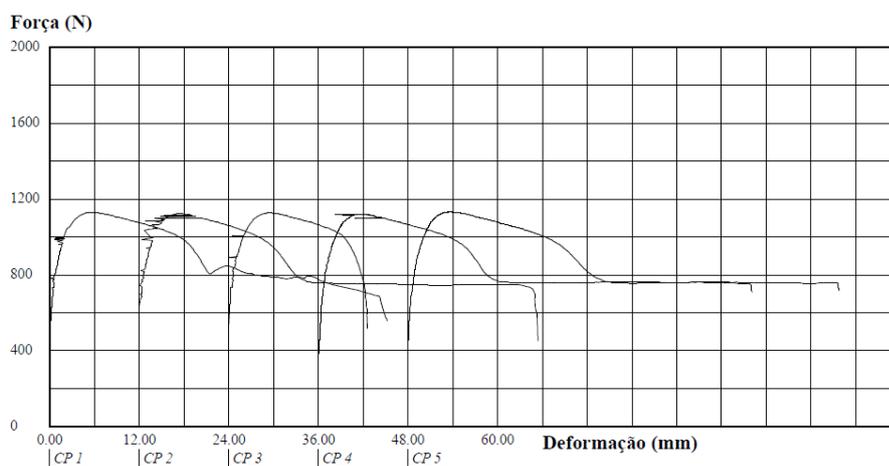


Relatório de teste de resistência a tração do PCR1-10CN

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)	Resistência @Escoam. ES1 (MPa)	Alongamento @Escoam. ES2 (%)
CP 1	41.21	1131.76	27.47	*	*
CP 2	41.37	1122.87	27.14	*	*
CP 3	41.34	1128.34	27.30	*	*
CP 4	41.37	1122.19	27.13	*	*
CP 5	41.40	1133.81	27.39	13.5	0
Número CPs	5	5	5	1	1
Média	41.34	1128	27.28	13.50	0.2310
Desv.Padrão	0.07588	5.194	0.1486	*	*
Coef.Var.(%)	0.1836	0.4606	0.5446	*	*
Mínimo	41.21	1122	27.13	13.50	0.2310
Máximo	41.40	1134	27.47	13.50	0.2310

Escoam. ES1 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: : 0.200 %

Escoam. ES2 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: : 0.200 %

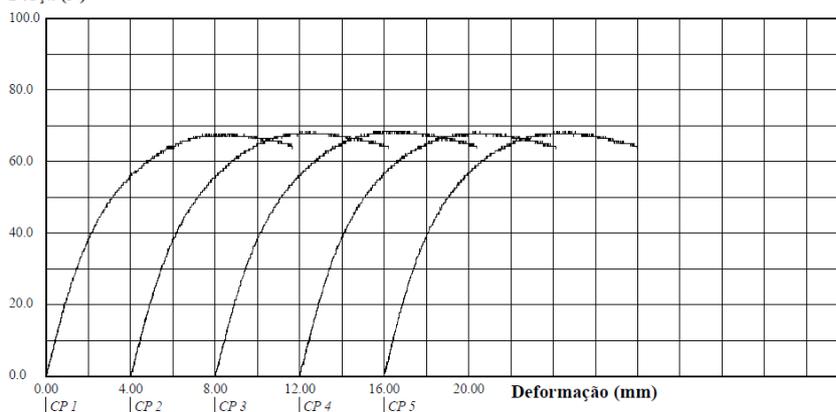


ANEXO E - VALORES DE FLEXÃO E TRAÇÃO DO PCR1-20CN

Relatório de teste de resistência a flexão do PCR1-20CN

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Compr.Base (mm)	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP 1	1.698	138.26	67.8	40.0	1862
CP 2	1.720	137.39	68.5	39.9	1799
CP 3	1.695	138.26	68.5	40.4	1867
CP 4	1.706	137.83	68.5	40.2	1831
CP 5	1.708	137.83	68.5	40.1	1931
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.705	137.9	68.39	40.10	1858
Desv.Padrão	0.009488	0.3639	0.3065	0.2182	49.11
Coef.Var.(%)	0.5564	0.2639	0.4481	0.5440	2.643
Mínimo	1.695	137.4	67.84	39.85	1799
Máximo	1.720	138.3	68.53	40.42	1931

Força (N)

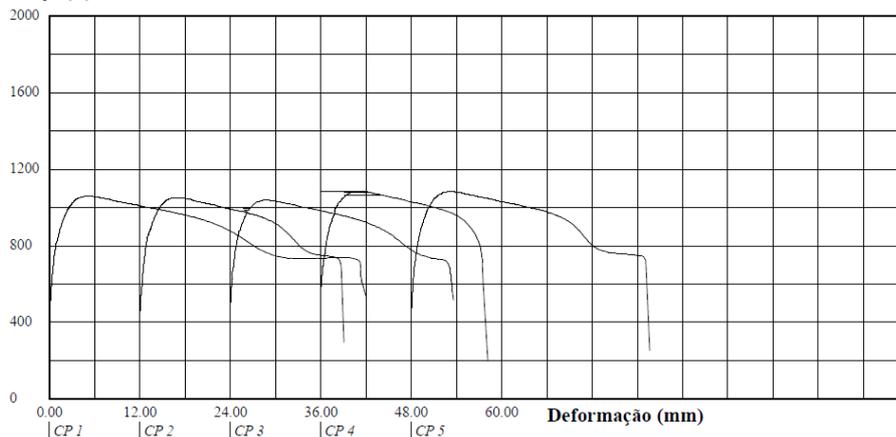


Relatório de teste de resistência a tração do PCR1-20CN

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)	Resistência @Escoam. ES1 (MPa)	Alongamento @Escoam. ES2 (%)
CP 1	41.37	1061.33	25.66	*	*
CP 2	41.37	1053.12	25.46	15.2	0
CP 3	41.53	1040.81	25.06	*	*
CP 4	41.40	1088.00	26.28	16.5	0
CP 5	41.43	1084.58	26.18	*	*
Número CPs	5	5	5	2	2
Média	41.42	1066	25.73	15.88	0.4274
Desv.Padrão	0.06730	20.31	0.5074	0.9386	0.07310
Coef.Var.(%)	0.1625	1.906	1.972	5.910	17.10
Mínimo	41.37	1041	25.06	15.22	0.3757
Máximo	41.53	1088	26.28	16.55	0.4791

Escoam. ES1 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: : 0.200 %
Escoam. ES2 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: : 0.200 %

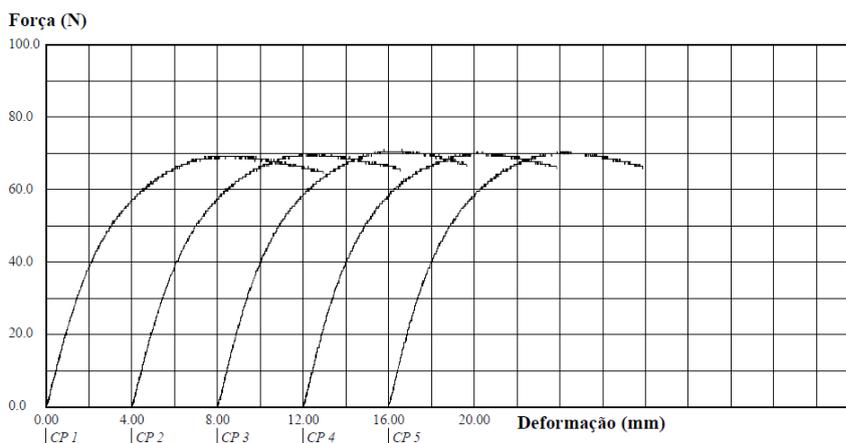
Força (N)



ANEXO F - VALORES DE FLEXÃO E TRAÇÃO DO PCR2-10CN

Relatório de teste de resistência a flexão do PCR2-10CN

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Compr.Base (mm)	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP 1	1.699	138.26	69.2	40.7	1842
CP 2	1.708	137.83	69.9	40.9	1825
CP 3	1.701	138.26	71.3	41.9	1960
CP 4	1.698	138.26	70.6	41.6	1967
CP 5	1.710	137.83	70.6	41.3	1921
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.703	138.1	70.31	41.28	1903
Desv.Padrão	0.005345	0.2389	0.7814	0.4737	66.10
Coef.Var.(%)	0.3138	0.1730	1.111	1.147	3.473
Mínimo	1.698	137.8	69.22	40.73	1825
Máximo	1.710	138.3	71.27	41.91	1967

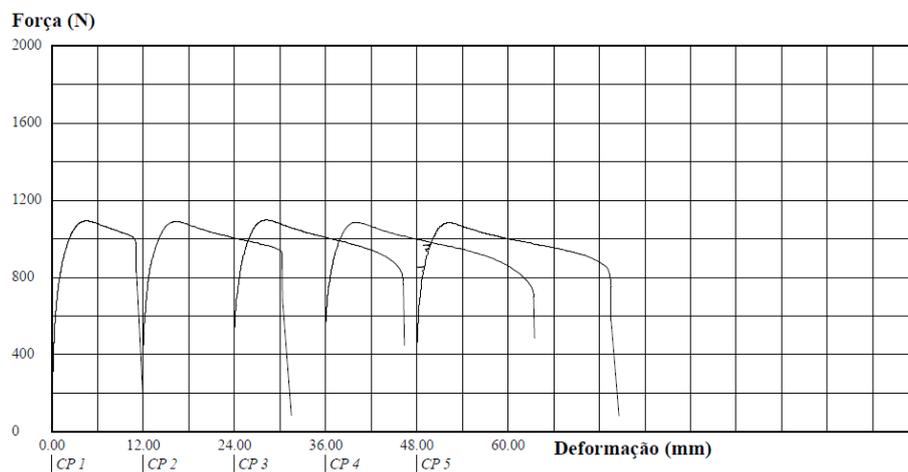


Relatório de teste de resistência a tração do PCR2-10CN

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)	Resistencia @Escoam. ES1 (MPa)	Alongamento @Escoam. ES2 (%)
CP 1	41.46	1094.15	26.39	*	*
CP 2	41.40	1090.73	26.35	*	*
CP 3	41.40	1099.62	26.56	15.7	0
CP 4	41.21	1086.63	26.37	*	*
CP 5	41.40	1084.58	26.20	*	*
Número CPs	5	5	5	1	1
Média	41.37	1091	26.37	15.68	0.3277
Desv.Padrão	0.09769	6.012	0.1295	*	*
Coef.Var.(%)	0.2361	0.5510	0.4910	*	*
Mínimo	41.21	1085	26.20	15.68	0.3277
Máximo	41.46	1100	26.56	15.68	0.3277

Escoam. ES1 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: : 0.200 %

Escoam. ES2 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: : 0.200 %

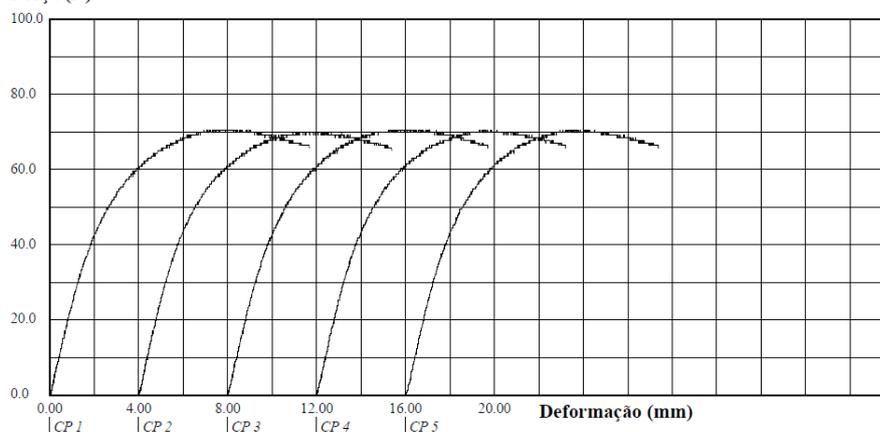


ANEXO G - VALORES DE FLEXÃO E TRAÇÃO DO PCR2-20CN

Relatório de teste de resistência a flexão do PCR2-20CN

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Compr.Base (mm)	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)
CP 1	1.708	137.83	70.6	41.3	2050
CP 2	1.709	137.83	69.9	40.9	2200
CP 3	1.708	137.83	70.6	41.3	2079
CP 4	1.720	137.39	70.6	41.0	2088
CP 5	1.709	137.83	70.6	41.3	2006
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.710	137.7	70.45	41.19	2085
Desv.Padrão	0.005163	0.1938	0.3065	0.1992	72.01
Coef.Var.(%)	0.3019	0.1407	0.4350	0.4838	3.454
Mínimo	1.708	137.4	69.90	40.91	2006
Máximo	1.720	137.8	70.59	41.34	2200

Força (N)



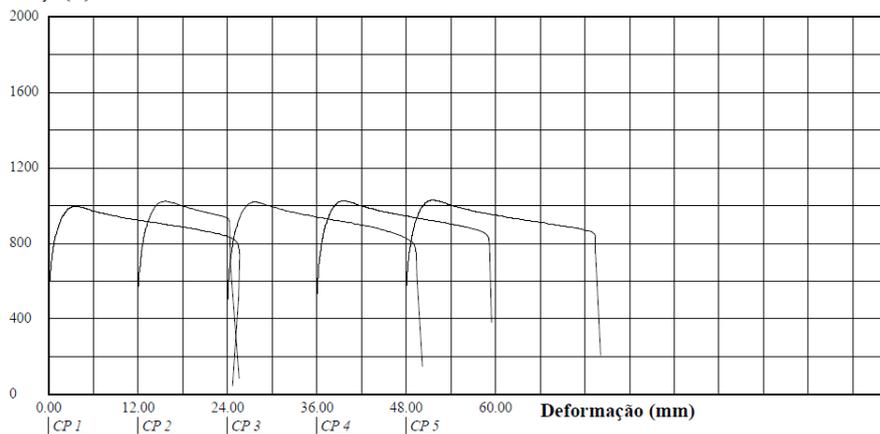
Relatório de teste de resistência a tração do PCR2-20CN

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)	Resistência @Escoam. ES1 (MPa)	Alongamento @Escoam. ES2 (%)
CP 1	41.40	997.73	24.10	14.6	0
CP 2	41.37	1024.40	24.76	*	*
CP 3	41.53	1019.61	24.55	*	*
CP 4	41.40	1026.45	24.79	14.7	0
CP 5	41.40	1031.24	24.91	*	*
Número CPs	5	5	5	2	2
Média	41.42	1020	24.62	14.63	0.2101
Desv.Padrão	0.06345	13.07	0.3200	0.03120	0.03615
Coef.Var.(%)	0.1532	1.282	1.299	0.2132	17.21
Mínimo	41.37	997.7	24.10	14.61	0.1845
Máximo	41.53	1031	24.91	14.66	0.2357

Escoam. ES1 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: : 0.200 %

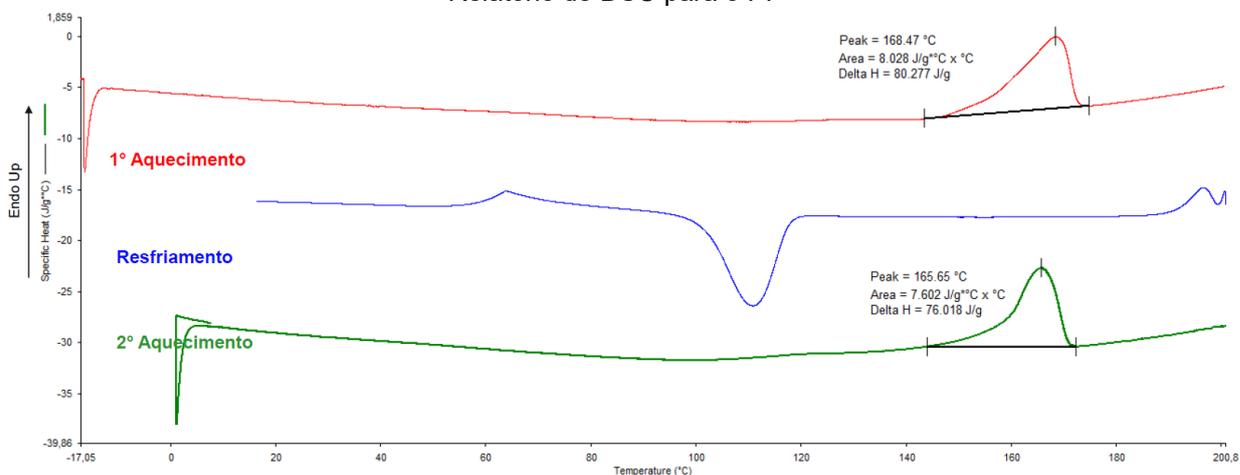
Escoam. ES2 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: : 0.200 %

Força (N)

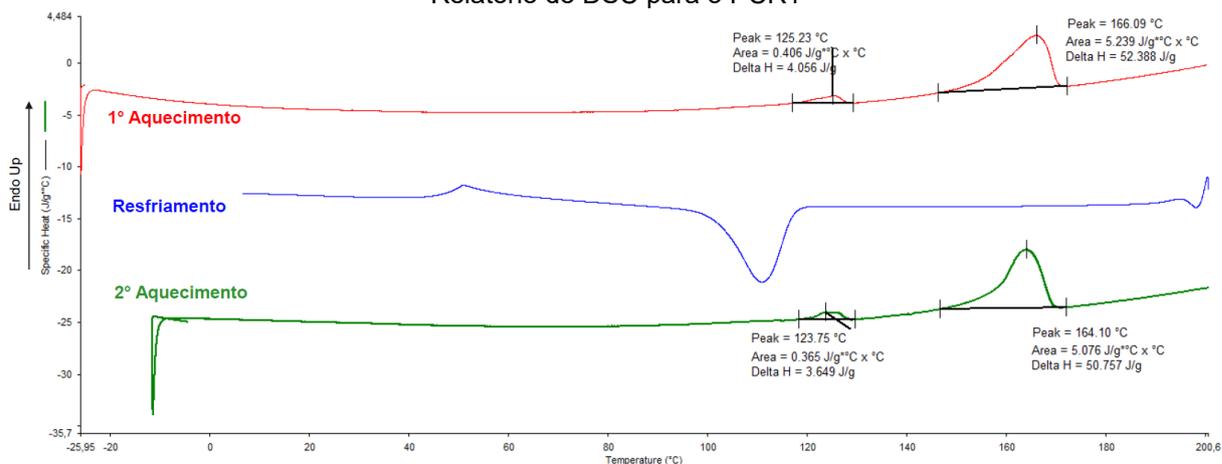


ANEXO H – GRÁFICOS OBTIDOS NO ENSAIO DE DSC PARA O PP E RECICLADOS

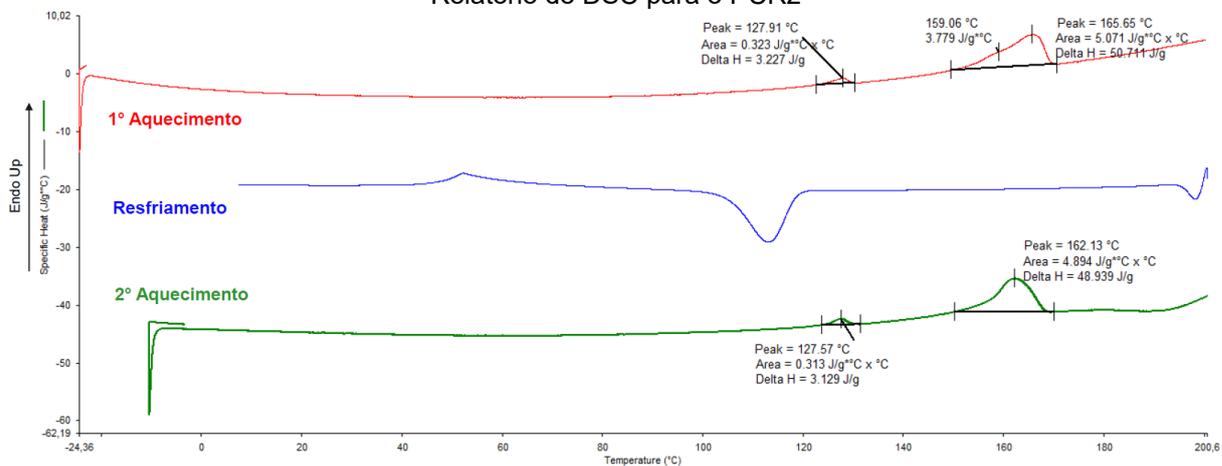
Relatório de DSC para o PP



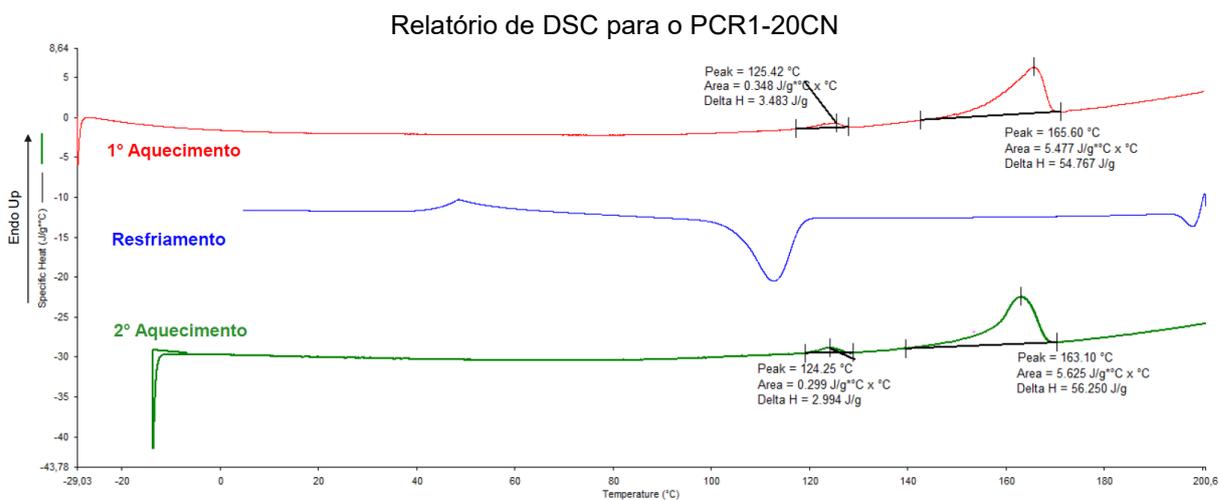
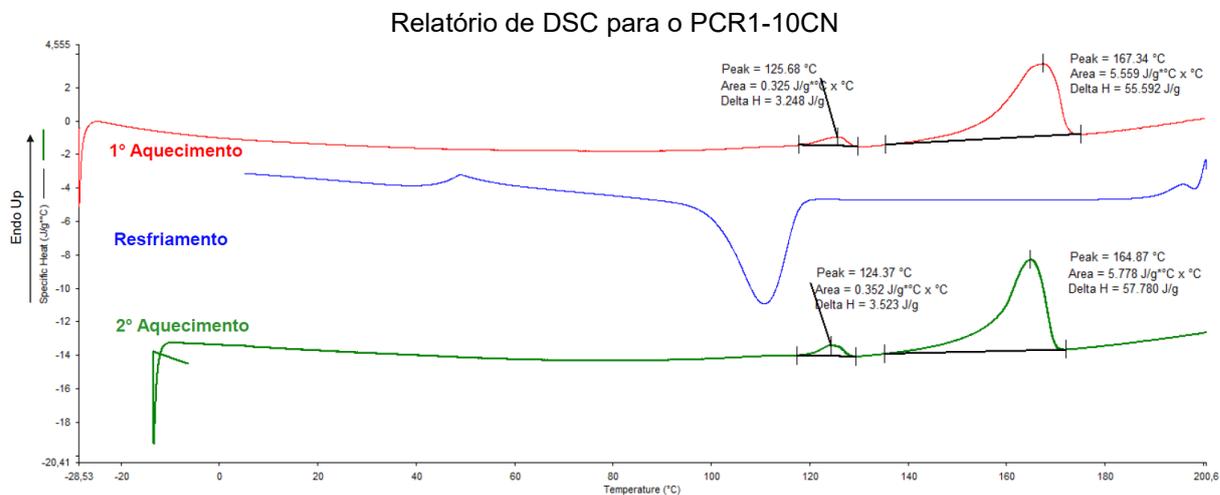
Relatório de DSC para o PCR1



Relatório de DSC para o PCR2

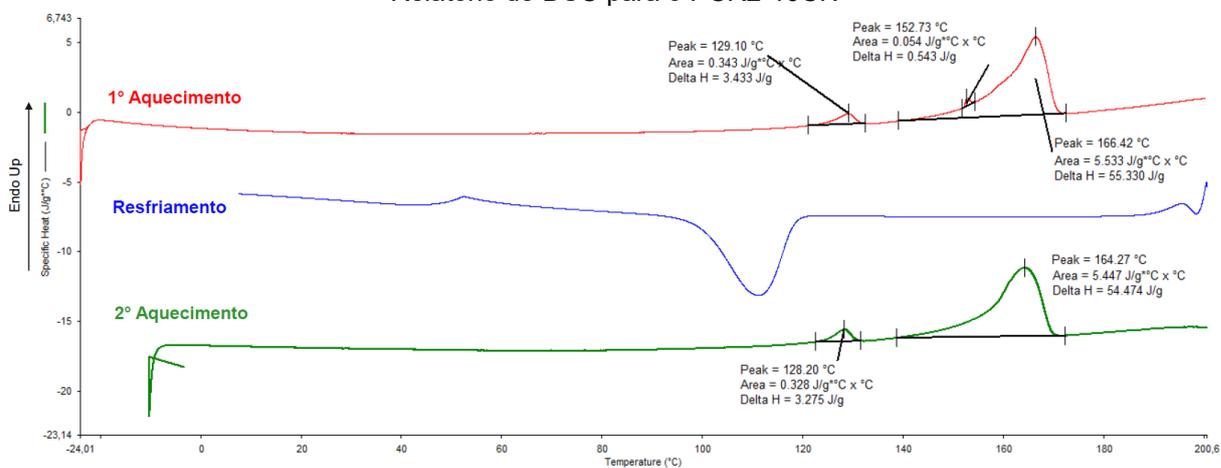


ANEXO I – GRÁFICOS OBTIDOS NO ENSAIO DE DSC PARA O PCR1 COM ADIÇÃO DE CARGA MINERAL



ANEXO J – GRÁFICOS OBTIDOS NO ENSAIO DE DSC PARA O PCR2 COM ADIÇÃO DE CARGA MINERAL

Relatório de DSC para o PCR2-10CN



Relatório de DSC para o PCR2-20CN

