

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL – UCS  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA REGIÃO DOS VINHEDOS – CARVI  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS DA NATUREZA E DE TECNOLOGIA – CENT  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Eduardo Habas**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASIVIDADE DE COMPÓSITOS DE  
POLIPROPILENO E RESÍDUOS DE GRANITO COM POTENCIAL APLICAÇÃO  
EM COMPONENTES AUTOMOTIVOS**

**BENTO GONÇALVES**

**2024**

**EDUARDO HABAS**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASIVIDADE DE COMPÓSITOS DE  
POLIPROPILENO E RESÍDUOS DE GRANITO COM POTENCIAL APLICAÇÃO  
EM COMPONENTES AUTOMOTIVOS**

Trabalho de conclusão de curso II (GRA014660R),  
apresentado como requisito parcial à conclusão do curso  
de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Dr. Matheus Poletto.

**BENTO GONÇALVES**

**2024**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente e antes de tudo a Deus, por todas as coisas que aconteceram em minha vida, pelas portas que me foram abertas e pelos caminhos que me possibilitou percorrer. Aos meus pais, Leonel Habas e Claudia Habas, por terem sido viga mestre em minha trajetória, não só acadêmica, mas de vida. À minha esposa, Luise Rocha, que me motivou e ajudou a continuar em frente mesmo durante as tempestades que aconteceram durante o percurso. Ao Prof. Dr. Matheus Poletto, por todo o apoio prestado durante o curso e trabalho de conclusão de curso. E um agradecimento especial à Maristela De Bortoli Pasquali e ao Prof. Gilberto Hummes, pelas oportunidades que me proporcionaram dentro da universidade, que foram fundamentais para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

## RESUMO

A utilização de compósitos poliméricos reforçados com resíduos de rochas ornamentais, como o granito, possui potencial na indústria automotiva, pois combina leveza e resistência, características fundamentais para melhorar a eficiência energética dos veículos e reduzir as emissões de gases poluentes. O tipo de material atende à crescente demanda por soluções sustentáveis e economicamente viáveis. O objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto da incorporação de diferentes teores de pó de granito em compósitos de polipropileno, focando na resistência à abrasão e em possíveis aplicações no setor automotivo. A pesquisa contribui para a destinação sustentável de resíduos de rochas ornamentais e para o desenvolvimento de materiais inovadores para a indústria. Foram utilizados resíduos de granito (Cinza Corumbá) e polipropileno como matriz. O pó de granito foi incorporado em concentrações de 10%, 20%, 30% e 40% em massa, sendo triturado, peneirado a 45 mesh e seco antes do processamento, enquanto o polipropileno também foi pré-secado. O processamento dos compósitos foi realizado por extrusão a 190 °C e 200 rpm, seguido de moldagem por injeção para a obtenção de corpos de prova. Os ensaios realizados incluíram densidade, resistência à abrasão, tração, flexão e impacto. A caracterização dos compósitos incluiu análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), ensaios de densidade, propriedades mecânicas e resistência à abrasão, avaliando a interação matriz-carga e o impacto da variação de pó de granito. A densidade aumentou até 37% com 40% de carga, enquanto o módulo de tração e flexão cresceram 54% e 80%, respectivamente. Porém, a resistência à tração e à flexão reduziram até 47% e 9%, devido à má adesão entre matriz e carga. A resistência ao impacto foi maior com 10% de pó (42%), mas caiu em concentrações superiores. A resistência à abrasão piorou, com perda de massa de até 236% nas maiores concentrações. O MEV confirmou a distribuição heterogênea do pó e formação de crateras. Conclui-se que o pó de granito aumenta a rigidez, mas prejudica a resistência mecânica e ao desgaste em concentrações elevadas. Modificações, como compatibilizantes ou ajuste da granulometria, são sugeridas para melhorar o desempenho.

**Palavras-chave:** compósitos poliméricos, pó de granito, setor automotivo, polipropileno, abrasão, adesão matriz-carga.

## ABSTRACT

The utilization of polymer composites reinforced with ornamental rock waste, such as granite, has potential in the automotive industry due to its combined lightness and resistance. Essential features for optimizing vehicle energy efficiency and reducing greenhouse gas emissions. This material meets the growing demand for sustainable and economically viable solutions. This study aimed to evaluate the impact of incorporating different granite powder concentrations in polypropylene composites, focusing on abrasion resistance and potential automotive applications. The research contributes to the sustainable disposal of ornamental rock waste and the development of innovative materials for industry. Granite waste (Cinza Corumbá) and polypropylene were used as a matrix. Granite powder was incorporated at 10%, 20%, 30%, and 40% concentrations by mass, crushed, sieved to 45 mesh, and dried before processing. while the polypropylene was also pre-dried. The composites were extruded at 190°C and 200 rpm, followed by injection molding to produce test specimens. Tests included density, abrasion resistance, tensile strength, flexural strength, and impact resistance. The characterization of the composites included analysis by Scanning Electron Microscopy (SEM), density tests, mechanical properties and abrasion resistance, evaluating the matrix-filler interaction and the impact of the variation of granite powder. The density increased up to 37% with 40% load, while the tensile and flexural modulus increased by 54% and 80%, respectively. However, the tensile and flexural strengths reduced by up to 47% and 9%, due to poor adhesion between matrix and filler. The impact resistance was higher with 10% powder (42%), but decreased at higher concentrations. The abrasion resistance worsened, with mass loss of up to 236% at the highest concentrations. The SEM confirmed the heterogeneous distribution of the powder and the formation of craters. It is concluded that granite powder increases stiffness, but impairs mechanical and wear resistance at high concentrations. Modifications, such as compatibilizers or adjustment of the granulometry, are suggested to improve performance.

**Keywords:** Polymer composites, granite powder, automotive sector, polypropylene, abrasion, matrix-filler adhesion.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução do Uso de Materiais em Automóveis: 1980 a 1997 .....	15
Tabela 2 - Compatibilidade química dos polímeros utilizados em peças automotivas .....	17
Tabela 3 - Repartição da produção, intercâmbio e consumo interno de rochas ornamentais e de revestimento - 2018-2023 (valores em mil toneladas). .....	22
Tabela 4 - Perfil da produção brasileira por tipo de rocha - 2023 .....	22
Tabela 5 - Consumo Interno Aparente de Rochas Ornamentais e de Revestimento no Brasil - 2023 .....	23
Tabela 6 - Distribuição da produção de rochas ornamentais e de revestimento no Brasil - 2023 .....	25
Tabela 7: Ficha técnica Polipropileno H 103.....	33
Tabela 8: Propriedades mecânicas obtidas no ensaio de resistência à tração.....	44
Tabela 9: Propriedades mecânicas obtidas no ensaio de resistência à flexão.....	46

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama dos principais componentes de um automóvel moderno .....	15
Figura 2 - Evolução dos faturamentos dos principais exportadores mundiais (US\$ x ANO/Mt). .....	20
Figura 3 - Lavra de matacão de grande porte. ....	24
Figura 4 - Distribuição regional da produção de rochas ornamentais e de revestimento no Brasil 2023 (participação percentual) .....	25
Figura 5 - Plotagem dos valores da tabela 7 – Repartição da produção, consumo e rejeito de granito.....	26
Figura 6 - Possíveis aplicações de materiais poliméricos em automóveis. ....	27
Figura 7 - Configurações estruturais do PP .....	29
Figura 8 - Amostra de granito Cinza Corumbá.. ....	30
Figura 9 - Fluxograma do processo de fabricação do compósito.....	34
Figura 10: Micrografia de MEV do rejeito de granito em 80x (A), 250x (B) e 500x (C).....	37
Figura 11: Elementos químicos no resíduo de granito.....	38
Figura 12: Morfologia do polipropileno (PP) 250x (A), 500x (B).....	39
Figura 13: Morfologia granito-PP com 10% de carga, 250x (A) e 500x (B).....	40
Figura 14: Morfologia granito-PP com 20% de carga, 250x (A) e 500x (B).....	41
Figura 15: Morfologia granito-PP com 30% de carga, 250x (A) e 500x (B).....	42
Figura 16: Morfologia granito-PP com 40% de carga, 250x (A) e 500x (B).....	42
Figura 17: Densidade dos materiais.....	43
Figura 18: Perda de massa em função do compósito e polipropileno puro.....	47
Figura 19: Resistência à abrasão em função do compósito e polipropileno puro.....	48
Figura 20: Resistência ao impacto.....	49

## LISTA DE SIGLAS

ONU	Organização das Nações Unidas
ODSs	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
SAE	<i>Society of Automotive Engineers International</i>
CAE	Engenharia Assistida por Computador
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
LPOL	Laboratório de Polímeros da UCS
UCS	Universidade de Caxias do Sul

## LISTA DE ABREVIATURAS

UV	Ultravioleta
PP	Polipropileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PET	Polietileno Tereftalato
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinila
CFRP	Polímero Reforçado com Fibra de Carbono
GFRP	Polímero Reforçado com Fibra de Vidro
F1	Fórmula 1
PMMA	Poli Metacrilato de Metila
DRX	Difração de Raio X
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho com transformada de Fourier
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
PA	Poliamida
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
POM	Poliacetil
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>PROJETO DE PESQUISA.....</b>	<b>10</b>
2.1	TEMA.....	10
2.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	10
2.3	OBJETIVO GERAL.....	11
2.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
3.1	O CONTEXTO DA INDUSTRIALIZAÇÃO AUTOMOTIVA BRASILEIRA VOLTADA PARA A EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS.....	12
3.2	RECICLAGEM NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA DE MATERIAIS POLIMÉRICOS .....	16
3.3	O POTENCIAL DO SETOR DE ROCHAS ORNAMENTAIS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.....	19
3.3.1	PROCESSOS DE EXTRAÇÃO DAS ROCHAS ORNAMENTAIS .....	23
3.3.2	REJEITO DE GRANITO GERADO NA PRODUÇÃO BRASILEIRA .....	26
3.4	COMPÓSITOS POLIMÉRICOS .....	26
3.4.1	COMPOSITOS POLIMÉRICOS NO SETOR AUTOMOTIVO.....	26
3.4.2	POLIPROPILENO (PP) .....	28
3.4.3	GRANITO CINZA CORUMBÁ.....	30
3.4.4	COMPÓSITO DE POLIPROPILENO REFORÇADO COM PÓ DE BRITAGEM DE GRANITO CINZA CORUMBA.....	31
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>33</b>
4.1	MATERIAIS.....	33
4.2	METODOLOGIA.....	33
4.2.1	Moagem dos resíduos de granito .....	33
4.2.2	Processamento dos compósitos.....	34

4.2.3	Caracterização dos compósitos.....	35
4.2.4	Microscopia eletrônica de varredura.....	35
4.2.5	Densidade .....	35
4.2.6	Ensaio Mecânicos.....	35
4.2.7	Resistência à abrasão .....	36
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>37</b>
5.1	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DO REJEITO DE GRANITO.....	37
5.2	MORFOLOGIA DO PP E DOS COMPÓSITOS.....	39
5.3	CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO .....	39
5.4	DENSIDADE .....	43
5.5	ENSAIOS MECÂNICOS .....	44
5.5.1	Resistência à tração.....	44
5.5.2	Resistência à flexão .....	46
5.5.3	Resistência à abrasão .....	47
5.5.4	Resistência à impacto .....	49
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....</b>	<b>52</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil, durante a história automobilística, investiu nas rodovias para o transporte de pessoas e cargas, construindo e melhorando estradas. Estratégia com o objetivo de integrar o território continental brasileiro, além de industrializar o país na formação de polos automobilísticos. Uma abordagem contrastante com a tendência de outros países, que se enraizaram através de complexas malhas ferroviárias para escoar cargas e transportar pessoas entre territórios.

Enquanto as rodovias impulsionavam a industrialização e o transporte no Brasil, uma outra faceta da economia nacional se revelava nas pesadas cargas das rochas ornamentais, um setor que se destaca não só pelo volume e densidade de material agregado, mas também pelo mercado bilionário que movimenta (ABIROCHAS, 2023).

As rochas ornamentais, presentes no cotidiano, são pedras decorativas, geralmente utilizadas para cobrir pisos, paredes e na fabricação de alguns tipos de móveis mais robustos, como por exemplo, mesas e balcões. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais - ABIROCHAS, em 2023 a produção brasileira de rochas ornamentais alcançou 10 milhões de toneladas. Os dados mostram que, apesar da pandemia, a produção brasileira seguiu o mesmo patamar dos anos anteriores, 2019 e 2018. De todas as rochas ornamentais extraídas 44,4% correspondeu ao granito.

Um dos maiores problemas enfrentados atualmente pela humanidade é a geração de resíduos sólidos que não possuem uma destinação adequada e sustentável, uma parcela destes resíduos são gerados pela extração e processamento de materiais rochosos, incluído as rochas ornamentais. Durante a extração e o processamento destas pedras são produzidos resíduos minerais que podem equivaler até mesmo a 80% de perdas em alguns tipos de extração e processamento (SANTOS, 2016). Os resíduos oriundos da extração e processamento das rochas ornamentais possuem um potencial significativo em diversos ramos da indústria.

Ao longo dos anos os materiais utilizados na fabricação de veículos foram ficando cada vez mais leves e baratos, seguindo uma tendência econômica e sustentável. Fazendo a transição da predominância de materiais metálicos e pesados para polímeros e fibras leves com mais viabilidade econômica. Partindo deste princípio, a utilização de materiais poliméricos contribui para a diminuição da emissão de gases tóxicos e de efeito estufa, uma vez que a massa do veículo como um todo diminui, aumentando a eficiência energética.

No contexto dos veículos de transporte, que possuem um viés mais robusto para encarar o transporte de pesadas cargas, a utilização de materiais poliméricos é justificada, pois,

exigem uma combinação única de robustez, durabilidade, segurança e leveza. Os compósitos poliméricos são candidatos potenciais, constituídos da combinação de outros elementos junto ao polímero base, de forma que o compósito resultante combinará os dois componentes que não se dissolvem entre si, aproveitando as melhores características de cada um para criar um material final com propriedades superiores às dos materiais originais.

O compósito estudado neste trabalho é o polipropileno (PP) reforçado com o pó de rochas ornamentais, em específico o granito da variedade Cinza Corumbá, que, além de ser uma das variedades mais comuns da rocha mais amplamente produzida no Brasil, também já foi objeto de estudo por outros autores.

## 2 PROJETO DE PESQUISA

Neste capítulo, são abordadas as questões relacionadas ao tema, a justificativa do tema e aos objetivos do presente estudo.

### 2.1 TEMA

Encontrar uma possibilidade de destinação para os resíduos gerados no processamento de rochas ornamentais. Será utilizado o resíduo de pó de granito, incorporado em uma matriz polimérica de polipropileno, resultando em um compósito polimérico com teores de 10%, 20%, 30% e 40% em massa de incorporação.

As propriedades mecânicas do compósito resultante com diferentes concentrações de pó de granito serão analisadas através de ensaios de densidade, impacto, abrasão flexão e tração.

### 2.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Um dos maiores desafios da sociedade contemporânea é uma eficaz gestão da reciclagem de resíduos, que se alinha intimamente com as metas estabelecidas pela Organização das Nações Unidas (ONU) nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODSs). Em especial, o ODS 11, que visa cidades e comunidades sustentáveis, e o ODS 12, que propõe o consumo e produção responsáveis, ambos ressaltam a relevância de implementar práticas ambientais conscientes em todas as esferas da sociedade.

A finalidade deste trabalho é encontrar uma abordagem sustentável para utilização do rejeito das rochas ornamentais na área dos compósitos poliméricos, com foco na aplicação dos materiais na indústria automotiva, visando assim reduzir o impacto ambiental e promover a sustentabilidade do setor.

O compósito desenvolvido possui o potencial para ser utilizado na elaboração de proteções para caçambas e carcaças de veículos de carga. O objetivo é identificar um material que possa resistir a desgastes típicos do transporte de carga. Para isso, serão realizados testes específicos de abrasão e impacto, a fim de avaliar a resistência do compósito ao desgaste e à deterioração. A adoção de um material com essas propriedades poderia prolongar a vida útil dos veículos e reduzir a frequência das manutenções necessárias nas caçambas e carcaças, diminuindo, assim, a geração de resíduos provenientes de peças danificadas e promovendo uma gestão mais sustentável dos recursos.

### 2.3 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito da incorporação de diferentes teores de pó de granito na resistência à abrasão de compósitos de polipropileno, com o foco na aplicação no setor automotivo.

### 2.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Comparar os efeitos de distintas proporções de incorporação de resíduos de pó de granito como agente de reforço em compósitos poliméricos granito-polipropileno.

Avaliar as propriedades mecânicas, morfológicas, físicas com teores de 10%, 20%, 30% e 40% em massa de pó de granito incorporados ao polipropileno.

Identificar a concentração de pó de granito que oferece a maior durabilidade nas análises desenvolvidas.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordados temas essenciais sobre sustentabilidade, reutilização e aspectos econômicos no contexto da indústria automotiva. Além disso, será explorado a questão dos resíduos em pó derivados do processamento e extração de rochas ornamentais, com ênfase especial no granito aplicado em compósitos poliméricos com base em polipropileno.

#### 3.1 O CONTEXTO DA INDUSTRIALIZAÇÃO AUTOMOTIVA BRASILEIRA VOLTADA PARA A EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS

Desde os primeiros quilômetros percorridos pelos automóveis no Brasil, os mais afortunados foram os protagonistas no meio automotivo. Alberto Santos Dumont, conhecido por façanhas na aviação, ao retornar da França ao Brasil em 1891, trouxe consigo um *Peugeot*, adquirido diretamente da fábrica, tornando-se assim um dos primeiros importadores de veículos motorizados no país (FERRO, 2004). Os automóveis da época eram predominantemente fabricados com materiais ferrosos, como aço e madeira, devido às limitações tecnológicas do período. Esses veículos se diferenciavam estruturalmente das tradicionais carruagens puxadas por cavalos ao substituir a tração animal por um motor (MEDINA, 2001).

Outros membros da elite econômica e cultural seguiram o exemplo de Dumont, vendo nos automóveis não apenas um meio de transporte, mas também um símbolo de *status*. Pelos próximos 50 anos a predominância de veículos no Brasil se daria através de importações, limitando-se no máximo à montagem de veículos com peças importadas. O país além de possuir naquele período uma indústria fraca, ainda possuía problemas logísticos substanciais, dissuadindo a industrialização voltada para o automobilismo (FERRO, 2004). Os carros desta época eram suscetíveis à corrosão motivo pelo qual existem poucos exemplares hoje em dia.

Até 1928 as até então principais cidades do país, São Paulo e Rio de Janeiro, ainda não estavam totalmente ligadas por estradas, foi somente naquele ano que foi inaugurada a Rio-São Paulo, uma estrada que interligava as duas cidades, feita principalmente de terra batida (FERRO, 2004). Naquela época, engenheiros e metalurgistas já debatiam sobre a fadiga dos materiais, resistência mecânica e rigidez dos aços, com o objetivo de manter o peso reduzido dos automóveis, assegurando ao mesmo tempo economia nos custos dos materiais e durabilidade dos veículos. Foi também nesse período que surgiu um projeto inglês de um carro feito de alumínio, embora ele fosse dois terços mais pesado que os modelos existentes. Nos Estados Unidos, o alumínio já estava sendo usado em conexões de eixos, e na Europa, blocos

de motor feitos desse material já eram comuns. Além disso, o primeiro termoplástico começou a ser utilizado nessa fase, que culminou com a inovação da *DuPont* na produção de tintas e no processo de pintura, reduzindo o tempo de aplicação de dias para horas e proporcionando um acabamento superior e uma maior variedade de cores (MEDINA, 2001).

Conforme os veículos motorizados foram se popularizando, além do *status*, eles foram se tornando mais importantes na função de transporte para a economia, problemas secundários como: segurança, conforto e sustentabilidade, não só ficaram em segundo plano, como demoraram para serem colocados em pauta, uma vez que os principais fatores de implementação desses veículos eram econômicos e logísticos.

Durante a Segunda Guerra Mundial, o Brasil ainda era completamente dependente da importação direta de peças e veículos. Com o início e andamento do conflito, viu-se a necessidade de implementar fábricas para produzir veículos 100% em território nacional, pois as importações diminuíram drasticamente (FERRO, 2004), uma vez que o aço e recursos essenciais estavam sendo destinados para os esforços de guerra.

Entre 1939 e 1949, a era moderna foi caracterizada pela popularidade dos plásticos coloridos. Com a escassez de materiais durante a II Guerra Mundial, os padrões da SAE foram ajustados para conservar metais como cobre, magnésio e alumínio. A escassez de cobre, em especial, levou à criação de ligas de zinco e alumínio como alternativas ao bronze (MEDINA, 2001).

De maneira inédita, foi a *Volkswagen* que, pulando a fase de fabricação artesanal, introduziu diretamente o conceito de produção em massa de automóveis no Brasil. Iniciando com a Kombi em 1957 e o Fusca em 1959, alcançando em 1961 uma produção de 95% dos componentes de origem nacional. Sob os governos de Vargas e Kubitschek, políticas foram implementadas para atrair investimentos e limitar importações. A *Volkswagen* dominou o mercado nos anos 1960, apesar das crises econômicas e políticas enfrentadas pela indústria (FERRO, 2004).

A crise do petróleo nas décadas de 1970, especialmente entre 1973 e 1979, despertaram a consciência sobre a escassez de combustíveis e a fragilidade do uso indiscriminado de recursos não renováveis. Esses momentos críticos marcaram uma virada decisiva na busca por carros mais eficientes, seguros, confortáveis e econômicos (HEMAIS, 2003). Durante esse período houve um renovado interesse na redução de peso e melhoria de desempenho, com foco em materiais mais leves, como alumínio, polímeros e zinco revestido de estanho. Esse impulso foi motivado por desafios ambientais e regulatórios, como o *Clean*

*Air Act* da Califórnia em 1975, que incentivou a busca por maior durabilidade, eficiência e redução de emissões (MEDINA, 2001).

Entre os anos 1980 e 1994, o Brasil enfrentou uma séria crise financeira, com uma forte estagnação em 1980 devido à alta inflação, afetando o mercado interno. As montadoras tiveram que se ajustar. Somente em 1994, com a abertura do mercado brasileiro para importações, o setor automotivo se reorganizou para manter-se competitivo. Nesse período, também houve um aumento nos investimentos estrangeiros diretos, levando à modernização das fábricas e à introdução de novas tecnologias (CATTO, 2015). Também em 1994, se intensificaram os estudos através de ferramentas CAE para elaboração de estruturas monobloco nos veículos, elevando consideravelmente a viabilidade, otimização e segurança dos veículos (TORRES, 2016).

Nos anos 90, os carros passaram por mudanças na composição de materiais visando leveza e sustentabilidade. Houve uma transição do aço para plásticos, reduzindo o peso médio dos veículos. Embora previsões sugerissem um aumento na participação de polímeros, a realidade foi diferente devido a uma rede complexa de fatores que influenciam a seleção de materiais, incluindo fatores políticos, econômicos e técnicos (MEDINA, 2001). Designs mais modernos começaram a surgir, peças que até então sofriam com corrosão puderam ser substituídas por peças poliméricas. Porém, a utilização de polímeros virgens tinha como consequência, se comparada aos metais, peças de menor resistência mecânica e alta degradação quando expostas a UV e altas temperaturas.

A degradação do meio ambiente, que já era um problema significativo naquela época, se intensificou com a introdução dos polímeros, uma vez que somente 5,26% do descarte gerado eram reciclados, o restante sendo direcionado à aterros (HATSCHBACH e NAVEIRO, 2003).

Nos anos 2000, o setor automotivo no Brasil passou por um crescimento e diversificação notáveis, impulsionados pela ascensão da Classe C devido ao aumento da renda e acesso facilitado ao crédito. Isso ampliou o mercado automotivo, com mais pessoas comprando veículos. Políticas governamentais, como o programa Inovar-Auto, foram cruciais ao incentivar a inovação tecnológica e fortalecer a cadeia produtiva, atraindo mais investimentos e modernizando o setor (CATTO, 2015). Uma alternativa adotada pelas montadoras para viabilizar cada vez mais os automóveis foi a utilização mais ampla de polímeros e conjugados, conforme pode-se observar na Tabela 1.

Tabela 1 - Evolução do Uso de Materiais em Automóveis: 1980 a 1997.

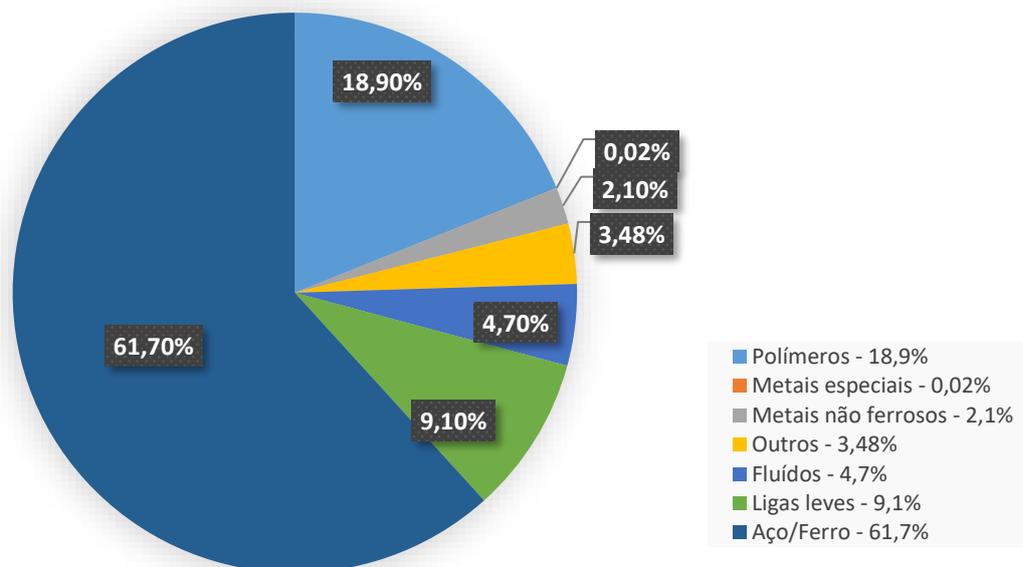
Material	Ano - kg			Ano - %		
	1980	1990	1997	1980	1990	1997
Aço comum	789	638	641	74,93%	65,77%	61,87%
Aços especiais	79	108	134	7,50%	11,13%	12,93%
Aço inoxidável	13	15	22	1,23%	1,55%	2,12%
Polímeros e conjugados	89	104	110	8,45%	10,72%	10,62%
Alumínio	59	72	94	5,60%	7,42%	9,07%
Cobre e bronze	16	22	21	1,52%	2,27%	2,03%
Peças sinterizadas	8	11	14	0,76%	1,13%	1,35%

Fonte: Adaptado de Medina (2001).

Na década de 2010, a indústria automobilística enfrentou desafios devido a crises políticas e econômicas, afetando o consumo e produção de veículos. Surgiram iniciativas de sustentabilidade, como por exemplo as ODSs possuindo como objetivo enfrentar alguns dos desafios mais urgentes do mundo, que vão desde a erradicação da pobreza até a proteção do meio ambiente.

Na Figura 1 pode-se observar a predominância de cada material atualmente nos veículos.

Figura 1 - Diagrama dos principais componentes de um automóvel moderno.



Fonte: Adaptado de Torres (2016).

A evolução dos materiais na indústria automotiva reflete as necessidades e inovações tecnológicas de cada período. Aço, alumínio, polímeros e materiais compósitos têm vantagens

e desafios. Enquanto os materiais ferrosos tradicionais ainda são essenciais devido à resistência e durabilidade, os polímeros oferecem soluções leves e versáteis, contribuindo para a eficiência e inovação nos veículos modernos.

No meio desse panorama emergem os compósitos, oferecendo uma síntese dos benefícios de cada abordagem ao combinar resistência mecânica e leveza em único material.

### 3.2 RECICLAGEM NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA DE MATERIAIS POLIMÉRICOS

Definindo os polímeros, pode se afirmar que são materiais compostos por longas cadeias moleculares, formadas por unidades menores chamadas monômeros. Por meio de um processo químico chamado polimerização, os monômeros são unidos quimicamente para formar polímeros, e o tamanho e a estrutura dessas moléculas influenciam as propriedades do material. Os polímeros podem ser classificados como termoplásticos e termorrígidos (GOMES e MEDINA, 2003).

Os polímeros termoplásticos mantêm a estrutura química durante o aquecimento e podem ser remoldados após o resfriamento, incluindo materiais como polipropileno (PP), polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno tereftalato (PET), poliestireno (PS), policloreto de vinila (PVC), entre outros. Por outro lado, os termorrígidos não podem ser remoldados após o aquecimento e incluem resinas fenólicas, epóxi, poliuretanos, entre outros (GOMES e MEDINA, 2003).

Na indústria automotiva, esses materiais são amplamente empregados devido à flexibilidade e habilidade de serem moldados em formas complexas, resultando em componentes que são leves, duráveis e eficientes, contribuindo para a diminuição do peso dos veículos e, conseqüentemente, para a melhoria da eficiência do combustível e redução de emissões de CO<sub>2</sub>.

Até meados dos anos 2000, cerca de aproximadamente 95% de todo rejeito de carcaças poliméricas geradas eram destinadas para aterros (HATSCHBACH e NAVEIRO, 2003). Parte deste descarte era dado em função de peças poliméricas praticamente virgens, sem a adição de outros elementos ao polímero base, porém, muitas vezes contaminadas com tintas e resíduos que dificultavam ainda mais o reaproveitamento.

O principal desafio na reciclagem de polímeros utilizados no setor automotivo é a diversidade. Em um veículo, podem existir em média 40 tipos de polímeros diferentes, com variações em composição, aditivos e corantes, dificultando a reciclagem. Os diferentes materiais poliméricos têm níveis variados de compatibilidade química, sendo muitas vezes

incompatíveis entre si. Isso pode resultar em materiais reciclados de baixa qualidade ou fora dos padrões necessários para serem usados novamente em componentes automotivos (GOMES e MEDINA, 2003). A Tabela 2 apresenta a compatibilidade química dos polímeros automotivos.

Tabela 2 – Compatibilidade química dos polímeros utilizados em peças automotivas.

	ABS	PA	PC	PE	PMMA	POM	PP	PBT	PVC	PC + PBT	ABS + PC
ABS	1	2	2	3	1	3	3	2	2	2	1
PA	2	1	3	3	3	3	2	2	3	2	2
PC	2	3	1	3	2	3	3	1	3	1	1
PE	3	3	3	1	3	3	2	3	3	3	3
PMMA	1	3	2	3	1	3	3	3	1	2	2
POM	3	3	3	3	3	1	3	2	2	2	3
PP	3	2	3	2	3	3	1	3	3	3	3
PBT	2	2	1	3	3	2	3	1	2	1	2
PVC	2	3	3	3	1	2	3	2	1	2	2
PC + PBT	2	2	1	3	2	2	3	1	2	1	2
ABS + PC	1	2	1	3	2	3	3	2	2	2	1

#### Legenda

1	Boa compatibilidade
2	Compatíveis sobre certas condições
3	Incompatíveis

Adaptado de Gomes e Medina (2003).

Devido à prevalência da incompatibilidade entre diferentes tipos de polímeros, se tratando dos resultados desejados em reaproveitamentos com aplicações robustas na indústria automotiva, a reciclagem para reutilização no mesmo contexto torna-se um desafio considerável.

Existem três principais métodos de reciclagem de polímeros: química, energética e mecânica. Cada uma possui vantagens e desafios únicos, alimentando uma discussão complexa sobre como alcançar uma economia circular eficiente no setor automotivo.

A reciclagem química modifica polímeros, transformando-os em elementos petroquímicos fundamentais: monômeros ou uma combinação de hidrocarbonetos. Esses elementos são utilizados como matéria-prima em refinarias ou centros petroquímicos para produzir produtos de alta qualidade. O propósito central da reciclagem química é recuperar os elementos químicos individuais para reutilização como produtos químicos ou para a fabricação

de novos polímeros. Essa abordagem de reciclagem possibilita o tratamento de uma mistura de polímeros, o que reduz os custos de preparação, coleta e seleção.

A reciclagem energética é uma solução ambientalmente responsável para a geração alternativa de energia, aproveitando o alto poder calorífico dos resíduos poliméricos como combustível para produzir eletricidade e calor. Essa prática, adotada em pelo menos 35 países, trata em torno de 150 milhões de toneladas de resíduo urbano anualmente em cerca de 750 usinas, gerando 10.000 MW de energia. Embora países como Alemanha e Japão já tenham abolido aterros sanitários em favor da reciclagem energética, o Brasil ainda não possui usinas desse tipo. Nos Estados Unidos, essas usinas fornecem eletricidade para milhões de residências, enquanto no Japão, as instalações são chamadas de "fábricas", produzindo materiais de construção a partir dos resíduos do processo.

A reciclagem mecânica transforma os resíduos poliméricos pós-industriais ou pós-consumo em grânulos reutilizáveis na fabricação de outros produtos. Este processo permite a criação de produtos compostos por um único tipo de polímero ou por misturas de diferentes polímeros em proporções específicas. As etapas básicas incluem a coleta dos resíduos, a separação e triagem dos polímeros, a moagem para fragmentação, a lavagem para remoção de contaminantes, a aglutinação para compactação e adição de aditivos, e a extrusão para fundir e homogeneizar a massa polimérica, produzindo grãos que podem ser utilizados na fabricação de novos produtos.

Incentivar a reciclagem e reutilização de materiais poliméricos que seriam descartados em lixões ou aterros não é apenas ecologicamente correto, mas também uma atitude inovadora e visionária. A reciclagem de resíduos passa por várias etapas cruciais: primeiro, a coleta e separação dos materiais, classificados por tipo, em seguida, a revalorização, na qual os materiais são preparados para serem transformados em novos produtos e finalmente, a transformação, que é o processamento dos materiais revalorizados para criar itens (Reciclagem..., p.1).

Sustentabilidade, é a função de sustentar, preservar não apenas a vida humana, mas também a de todas as criaturas que compartilham e que herdarão nosso planeta. O fator econômico é o maior paradigma a ser quebrado em relação às novas tecnologias e, conseqüentemente, a sustentabilidade.

Num mundo onde o consumismo reina e a competitividade global transcende produtos, a batalha central das potências se estende para além das mercadorias: é a corrida pela geração e comercialização de energia. Desde o venerado 'ouro negro' até o gás natural e derivados, a energia mantém enorme importância na economia e na política global.

### 3.3 O POTENCIAL DO SETOR DE ROCHAS ORNAMENTAIS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

O setor brasileiro de rochas ornamentais e de revestimento demonstrou relevância no cenário global em 2023, destacando-se por uma série de indicadores. Com uma produção estimada em 10 milhões de toneladas, equivalente a cerca de 7% da produção mundial, o Brasil reafirmou a posição como um dos principais *players* nesse mercado. No mesmo ano, esse volume alimentou exportações avaliadas em US\$ 1,11 bilhão, com 77% representados por rochas processadas semiacabadas, totalizando 1,8 milhão de toneladas, das quais 53% eram do mesmo tipo (CHIODI e FILHO, 2024).

A diversidade também foi um ponto forte, com 900 variedades comerciais disponíveis nos mercados interno e externo, alimentadas por 1.100 pedreiras ativas e sustentadas por uma rede de 12 mil empresas ao longo da cadeia produtiva. Isso gerou um impacto econômico significativo, refletido, no ano de 2023, em 150 mil empregos diretos no setor (CHIODI e FILHO, 2024).

No âmbito internacional, o Brasil consolidou presença como um dos principais exportadores, com pelo menos 400 empresas atuando nesse segmento e alcançando mais de 120 países. Embora seja o quinto maior produto de base mineral exportado pelo país, atrás de minérios como ferro, cobre, ouro e ferro-nióbio, o setor de rochas ornamentais e de revestimento registrou transações comerciais superiores a US\$ 6 bilhões, evidenciando a importância econômica (CHIODI e FILHO, 2024).

Destaque especial foi para os Estados Unidos, principal destino das exportações brasileiras nesse setor, com um volume de US\$ 608 milhões, apesar de uma leve queda de 19% em comparação com o ano anterior. Além disso, o Brasil se destacou como o maior e mais eficiente produtor mundial de grandes chapas, com uma capacidade de 100 milhões de metros quadrados por ano (CHIODI e FILHO, 2024).

Essa posição de liderança foi ainda mais reforçada pela infraestrutura do país, que abriga o maior parque mundial de teares multifios diamantados, com 600 máquinas em operação, das quais 350 são de fabricação nacional. Esse conjunto de fatores posiciona o Brasil não apenas como um dos principais protagonistas no mercado global de rochas ornamentais e de revestimento, mas também como um exemplo de excelência e inovação na indústria.

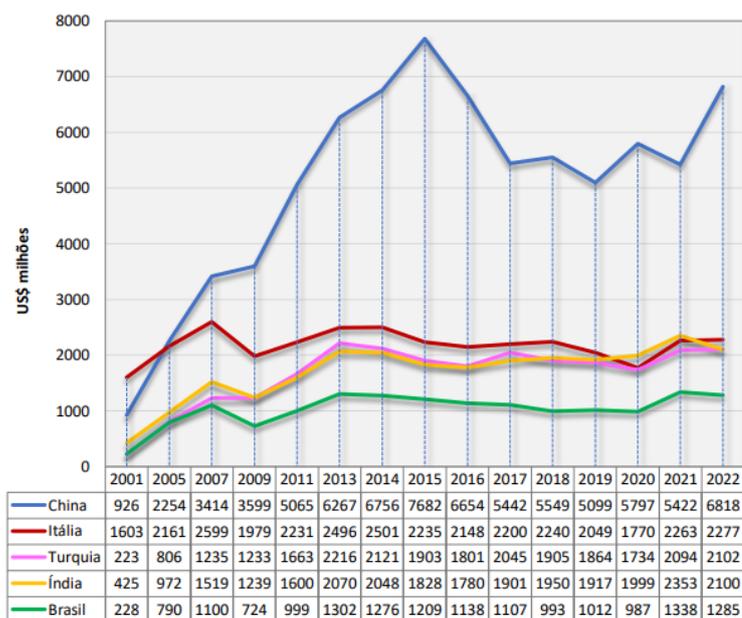
O setor de rochas ornamentais e de revestimento tem desempenhado um papel crucial tanto na economia global quanto na brasileira, destacando-se pelo impacto na construção civil e na arquitetura. A expansão desse setor no século 21 é notável, não apenas pelo aumento da

produção e comércio internacional, mas também pela modernização tecnológica e diversificação de produtos. O Brasil, em particular, emergiu como um dos principais protagonistas, contribuindo substancialmente para o mercado global (CHIODI e FILHO, 2024). Desde o início do século 21, a produção global de rochas ornamentais saltou de 60 milhões de toneladas em 2000, para aproximadamente 170 milhões de toneladas em 2023, equivalentes a 1,8 bilhão de metros quadrados com 2 cm de espessura. Durante esse período, o comércio internacional cresceu de 23 milhões para 58 milhões de toneladas, divididas entre 60% de rochas brutas e 40% de rochas processadas, resultando em transações comerciais que alcançaram US\$ 20 bilhões em 2022 (CHIODI e FILHO, 2024).

Os maiores produtores mundiais são China, Índia, Turquia, Brasil e Itália. Em termos de volume físico exportado, a Índia lidera, seguida por China, Turquia, Itália e Brasil. No quesito faturamento, os líderes são China, Itália, Turquia, Índia e Brasil. O preço médio dos produtos comercializados pelos 12 maiores exportadores mundiais é de cerca de US\$ 800,00 por tonelada ou US\$ 42,00 por metro quadrado para chapas com 2 cm de espessura (CHIODI e FILHO, 2024).

A Figura 2, ilustra o aumento das importações ao longo dos anos por todos os principais participantes deste mercado.

Figura 2 – Evolução dos faturamentos dos principais exportadores mundiais (US\$ x ANO/Mt)



Fonte (BALANÇO DO SETOR BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS E DE REVESTIMENTO EM 2023 – pg 34, figura 27) (CHIODI e FILHO, 2024).

A partir de 2015, enquanto a China reduziu as exportações de rochas naturais, aumentou substancialmente a produção e exportação de revestimentos artificiais. Essa mudança foi impulsionada por uma exigência do governo chinês de reutilizar os resíduos do setor de rochas, fazendo desses resíduos a principal matéria-prima para os materiais artificiais. Além disso, a China focou em exportações de materiais naturais em produtos acabados, que têm maior valor agregado do que as rochas semiacabadas (chapas). As exportações do Brasil refletiram variações no volume físico das chapas e um aumento na participação de chapas de rochas mais valiosas, como quartzitos, mármore e outros materiais “exóticos”, especialmente a partir de 2018 (CHIODI e FILHO, 2024).

As exportações brasileiras de rochas ornamentais estão em declínio constante desde 2022, esperando-se continuar abaixo de US\$ 1 bilhão em 2024 se não houver mudança no perfil de exportação, focado em blocos e chapas. A estratégia agora é comercializar produtos acabados para grandes projetos internacionais. Apesar da oferta de chapas mais valiosas, como quartzitos e mármore, as exportações não avançam desde 2022, culminando no fechamento de muitas pedreiras. O aumento na produção de materiais artificiais reduz ainda mais a participação das rochas naturais. Ajustes urgentes nos programas de promoção de exportações são necessários para manter a posição global do Brasil no mercado de rochas ornamentais (CHIODI e FILHO, 2024).

Do consumo interno, 44% são atribuídos a granitos/rochas silicáticas, 36% a rochas carbonáticas (mármore, travertinos e calcários), enquanto 8% são de quartzitos maciços e foliados, seguidos por 5% de ardósias, 3% de outras rochas brasileiras e 4% de materiais importados, tanto naturais quanto artificiais. A região Sudeste concentra 66% desse consumo, porém, é importante destacar o crescimento da participação das regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, que alcançaram 20% do total brasileiro em 2023 (CHIODI e FILHO, 2024).

Na Tabela 3, encontram-se detalhes sobre a produção, importação, consumo interno e outros dados relevantes do setor.

Tabela 3 - Repartição da produção, intercâmbio e consumo interno de rochas ornamentais e de revestimento - 2018-2023 (valores em mil toneladas).

<b>Parâmetros</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>
Produção de rochas brutas	9.000	9.200	9.000	10.200	10.000	10.000
Importação de rochas brutas	18,1	17,2	16,3	21,5	27,3	30,6
Disponibilidade de rochas brutas	9.018,10	9.217,20	9.016,30	10.221,50	10.027,30	10.030,60
Exportação de rochas brutas	1.066,80	984,20	962,30	993,50	907,00	852,80
Rochas brutas para processamento	7.951,30	8.233	8.054	9.228	9.120,30	9.177,80
Rejeito de processamento (41%)	3.260	3.375,50	3.302,10	3.783,50	3.739,70	3.762,90
Produção de rochas processadas	4.691,30	4.857,50	4.751,90	5.444,50	5.380,60	5.414,90
Importação de rochas processadas	99,5	99,4	92,9	125,3	124,3	122,8
Disponibilidade de rochas processadas	4.790,70	4.956,90	4.844,80	5.569,80	5.504,90	5.537,70
Exportação de rochas processadas	1.130	1.169,30	1.195,40	1.411,10	1.191	969,3
Consumo interno	3.660,70	3.787,60	3.649,40	4.158,70	4.313,90	4.568,40
Consumo em m <sup>2</sup> equivalente	67,8	70,1	67,6	77	80	85
Consumo per capita (m <sup>2</sup> x 2 cm espessura)	0,32	0,33	0,32	0,36	0,39	0,42
Consumo per capita (kg)	17,28	17,95	17,28	19,44	21,25	22,5

Fonte: Adaptado de Chiodi e Filho (2024)

Na Tabela 4, é evidente a destacada predominância do granito no panorama da produção brasileira de rochas ornamentais e de revestimento.

Tabela 4 - Perfil da produção brasileira por tipo de rocha – 2023.

<b>Tipo de Rocha</b>	<b>Produção (Mt)</b>	<b>Participação (%)</b>
Granito e similares	3,8	38
Mármore e Travertino	2,9	29
Quartzito Maciço	2	20
Ardósia	0,4	4
Quartzito Foliado	0,2	2
Pedra Miracema (Paduana)	0,2	2
Outros (Basalto, Pedra Cariri, Pedra-Sabão, Pedra Morisca)	0,5	5
Total estimado	10	100

Fonte: Adaptado de Chiodi e Filho (2024)

O consumo interno, seguindo o padrão do perfil de produção, segue uma trajetória semelhante. Mais uma vez, o granito surge como um dos principais tipos de rochas processadas e consumidas em 2023, conforme detalhado na Tabela 5.

Tabela 5 - Consumo Interno Aparente de Rochas Ornamentais e de Revestimento no Brasil – 2023.

<b>Tipo de Rocha</b>	<b>Consumo (10<sup>6</sup> m<sup>2</sup> equivalentes)</b>	<b>Participação (%)</b>
Granito	37,3	44
Mármore e Travertino	30,6	36
Ardósia	4,3	5
Quartzitos Maciços e Foliados	6,8	8
Outros	2,6	3
Mármore importados	1,3	1,5
Aglomerados importados	2,1	2,5
Total estimado	85	100
* Chapas com 2 cm de espessura equivalente		

Fonte: Adaptado de Chiodi e Filho (2024)

### 3.3.1 PROCESSOS DE EXTRAÇÃO DAS ROCHAS ORNAMENTAIS

A exploração de rochas ornamentais visa a extração do material economicamente viável dos maciços rochosos ou afloramentos. O resultado desse processo, denominado ‘lavra’ é a obtenção de blocos, geralmente com arestas retangulares, cujas dimensões variam entre 2,8 e 3,0 metros de comprimento, 1,7 e 1,9 metros de altura, e 1,6 e 1,8 metros de espessura. Essas medidas são cuidadosamente selecionadas para otimizar o aproveitamento do material e maximizar a eficiência dos equipamentos utilizados nas etapas subsequentes de beneficiamento (SANTOS, 2016).

Existem diversos métodos de lavra, que determinam a sequência espacial e os ciclos de trabalho, ajustados ao longo do tempo para otimizar a exploração de uma jazida em desenvolvimento, levando em conta a geometria e a progressão do avanço, com foco nos volumes a serem isolados e subdivididos. A aplicação de uma metodologia de lavra para uma determinada jazida permite, em qualquer estágio de desenvolvimento, definir a geometria espacial da mina em todos os detalhes. A primeira etapa é identificar os volumes e, em seguida, determinar a sequência de extração (VIDAL, et al., 2014).

A técnica de extração de matacões envolve a remoção de blocos através de furos alinhados em planos paralelos, utilizando cunhas e martelos para dividir o material. No entanto, essa abordagem não oferece garantias adequadas para empreendimentos de grande escala devido à incerteza sobre a uniformidade da rocha e a estimativa precisa do volume da jazida. Embora seja uma opção mais econômica devido aos custos relativamente baixos de preparação de acessos, utilização de mão de obra menos especializada e operação com despesas reduzidas,

ela também resulta em uma significativa geração de resíduos, o que pode acarretar sérios problemas ambientais (SANTOS, 2016). A Figura 3 mostra um exemplo de lavra denominada “lavra matacão”.

Figura 3 - Lavra de matacão de grande porte.

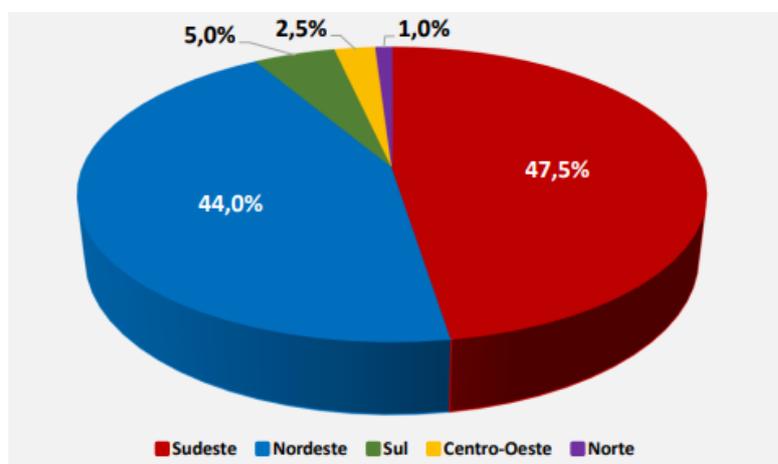


Fonte: (VIDAL, et al., 2014).

Existem duas outras abordagens comumente utilizadas para extração: Através de bancadas e de painéis verticais. A primeira técnica envolve a divisão da área de extração em camadas horizontais, permitindo a exploração simultânea de diferentes seções. Abordagens com bancadas altas são empregadas para terrenos heterogêneos, enquanto bancadas baixas são mais adequadas para terrenos uniformes. Por outro lado, o segundo método de extração, conhecido como painéis verticais, é preferível nas fases iniciais da extração em pedreiras e quando é necessário explorar em profundidade devido a restrições de reserva ou características físicas da área de extração.

Na Figura 4, é possível visualizar a distribuição atual das regiões brasileiras onde a produção de rochas ornamentais e de revestimento é mais significativa.

Figura 4 - Distribuição regional da produção de rochas ornamentais e de revestimento no Brasil 2023.



Fonte: (CHIODI e FILHO, 2024).

Os Estados do Sudeste e Nordeste se sobressaem em relação aos demais, representando juntos uma parcela de 91,5% de toda a produção brasileira de rochas ornamentais e de revestimento. Na Tabela 6 identifica-se os principais estados e os tipos predominantes de rochas produzidas em cada região.

Tabela 6 - Distribuição da produção de rochas ornamentais e de revestimento no Brasil – 2023.

Região	UF	Produção (1.000 t)	Tipo de Rocha
Sudeste	Espírito Santo	2.600	Granito, mármore
	Minas Gerais	1.900	Granito, pegmatito, ardósia, quartzito foliado, quartzito maciço, pedra-sabão, mármore
	RJ e SP	250	Granito, mármore, gnaiss (Pedra Paduana), arenito
Nordeste	Bahia	1.900	Granito, pegmatito, mármore, travertino, quartzito maciço
	Ceará	1.300	Granito, pegmatito, calcário, mármore
	Paraíba	450	Granito, conglomerado
	PE, AL, RN e PI	750	Granito, quartzito, mármore, calcário
Sul	PR, RS e SC	500	Granito, mármore, basalto, ardósia (folhelho)
Centro-Oeste	GO, MT e MS	250	Granito, quartzito foliado, serpentinito, mármore
Norte	RO, RR, PA, TO	100	Granito, anortosito, chert, serpentinito
Total Brasil		10.000	

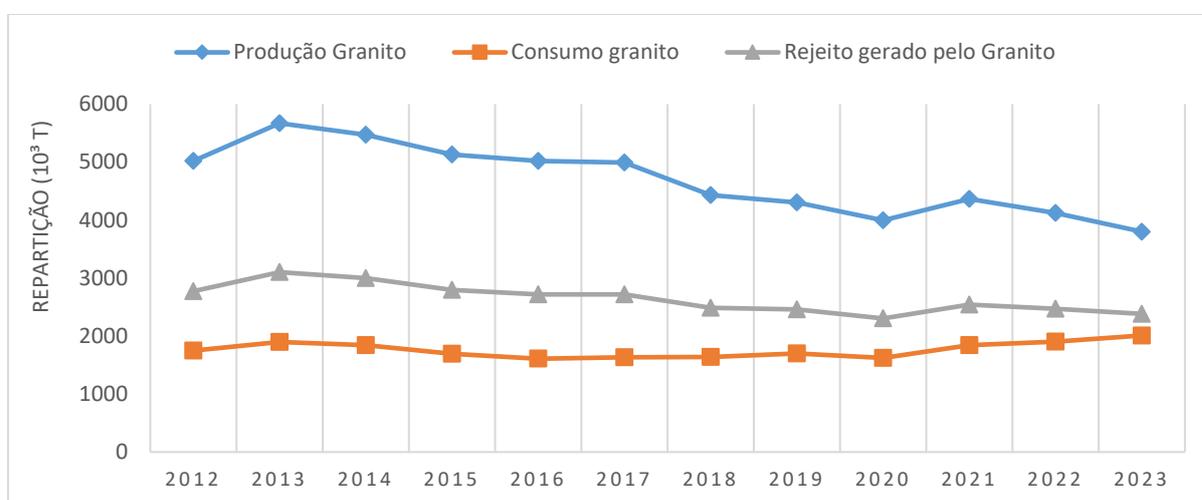
Fonte: Adaptado de Chiodi e Filho (2024)

Novamente, o granito se destaca com uma presença marcante, sendo encontrado em todos os estados que produzem rochas ornamentais.

### 3.3.2 REJEITO DE GRANITO GERADO NA PRODUÇÃO BRASILEIRA

Dependendo do método de extração e processamento escolhidos, podem ser gerados até 80% de perdas (SANTOS, 2016). Porém, de acordo ABIROCHAS (CHIODI e FILHO, 2024), são gerados durante o processo em média 41% de rejeito, munido desta premissa e dados estatísticos foi compilado os balanços demonstrativos de 2012 até 2023 com foco na participação do Granito na geração de resíduos no setor das rochas ornamentais. A Figura 5 apresenta os rejeitos de granito gerados ao longo do período compreendido entre 2012 e 2023.

Figura 5 - Repartição da produção, consumo e rejeito de granito.



Fonte ABIROCHAS, 2018, 2023 e Anuário estatístico, 2021 – Adaptado pelo autor.

### 3.4 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Segundo *American Society for Testing and Materials* - Terminologia Padrão para Materiais Compostos (Designação: D3878 – 16, 2016), um material compósito é formado pela união de dois ou mais componentes que não se dissolvem entre si, criando um produto de engenharia com propriedades específicas que os materiais originais não têm.

Os materiais poliméricos são amplamente empregados como matriz, sendo tanto termoplásticos quanto termorrígidos.

#### 3.4.1 COMPOSITOS POLIMÉRICOS NO SETOR AUTOMOTIVO

Ao longo dos anos, a indústria tem experimentado uma transformação significativa na seleção de materiais, passando de metais pesados e convencionais para ligas leves, compósitos

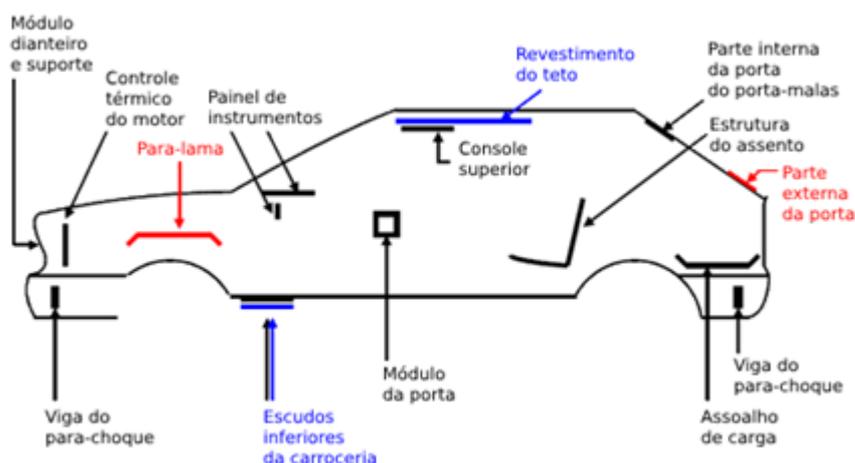
avançados e polímeros de alta resistência. Esta mudança não só atende às rigorosas regulamentações ambientais e de segurança, mas também às expectativas de um mercado cada vez mais orientado para a inovação e a sustentabilidade.

As principais desvantagens dos termoplásticos virgens são a baixa resistência ao desgaste por abrasão, baixa resistência à fadiga e impacto repetido (TORRES, 2016).

Os materiais compósitos, configurados em uma estrutura sanduíche, oferecem alta resistência e rigidez, características que os tornam populares em carros de corrida, como os da Fórmula 1, e em supercarros. O uso de CFRP (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono) pode reduzir o peso dos componentes em até 75-80% em comparação ao aço, 30-40% em relação ao alumínio e 50% em comparação ao GFRP (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro) de fibras curtas. Muitos carros esportivos modernos utilizam compósitos de CFRP para diminuir o peso. O McLaren F1 foi o primeiro carro de produção em série com uma estrutura monocoque integral e painéis externos de CFRP, pesando 1.140 kg no total. Em 2011, o modelo MP4-12C também adotou uma estrutura monocoque inteiramente feita de CFRP (TORRES, 2016).

Os fabricantes tendem com o tempo a incorporar cada vez mais os polímeros de engenharia. Na Figura 6 observa-se os locais do veículo possíveis de se aplicar compósitos atualmente.

Figura 6 – Possíveis aplicações de materiais poliméricos em automóveis.



Fonte TORRES, 2016 - Adaptado pelo autor.

O emprego de materiais poliméricos na construção de caçambas para veículos pickup despertou crescente interesse na indústria automotiva. A substituição das estruturas metálicas

convencionais por compósitos poliméricos reforçados apresenta diversas vantagens, tais como a redução de peso, maior resistência à corrosão e capacidade aprimorada de absorção de impactos.

Os compósitos poliméricos combinam uma matriz contínua com materiais de reforço, tipicamente fibras, aproveitando as propriedades únicas de ambos os componentes. No setor automotivo, esses materiais oferecem vantagens como: redução de peso, resistência à corrosão e alta resistência à fadiga. A adoção de caçambas feitas de materiais poliméricos em pick-ups não apenas é tecnicamente viável, mas também proporciona diversas vantagens em termos de desempenho e durabilidade. A substituição de componentes metálicos por compósitos poliméricos pode resultar em veículos mais leves, econômicos e duráveis, alinhando-se perfeitamente às demandas atuais por eficiência e sustentabilidade na indústria automotiva. (ANJOS, 2018).

### 3.4.2 POLIPROPILENO (PP)

O polipropileno (PP) é o segundo termoplástico mais produzido globalmente, devido a uma combinação de características que o tornam altamente versátil e atrativo para diferentes indústrias. Trata-se de um polímero compatível com várias técnicas de processamento, possui baixo peso específico (cerca de  $0,9 \text{ g/cm}^3$ ), boa resistência mecânica e térmica, além de excelente resistência química, especialmente contra solventes orgânicos. Essas propriedades, somadas ao custo moderado, impulsionaram um significativo aumento no consumo desse polímero nas últimas décadas. Atualmente, o PP faz parte do dia a dia moderno, sendo amplamente utilizado em aplicações que vão desde peças automotivas até embalagens de alimentos, fraldas infantis e máscaras descartáveis.

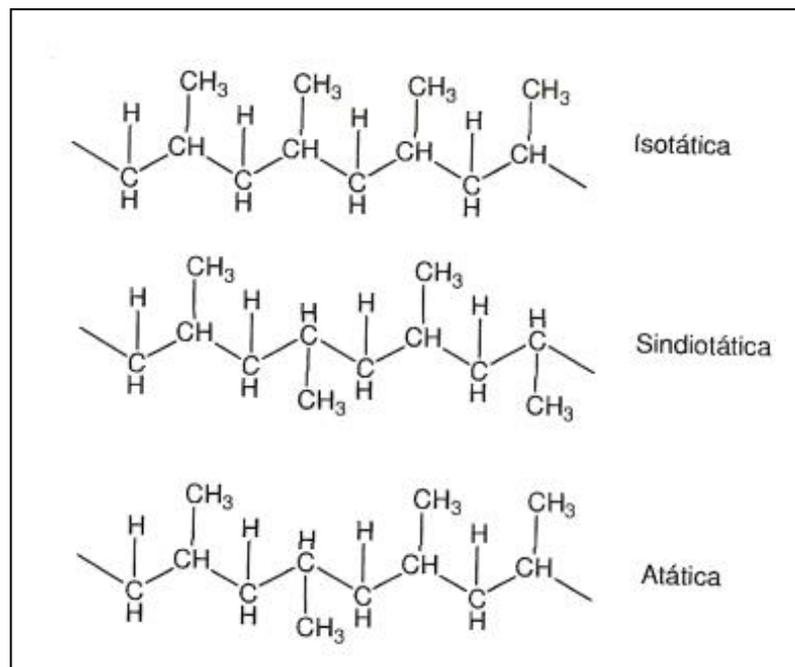
Os métodos de fabricação variam conforme a aplicação do polipropileno. Por exemplo, itens para embalagens são frequentemente produzidos por meio de extrusão. Já eletrodomésticos e peças automotivas, como para-choques e painéis, geralmente são fabricados por moldagem por injeção. Cada método exige propriedades específicas do material, tornando a relação entre o processo de produção e as características ideais do polímero bastante complexa. Esse equilíbrio envolve aspectos como custos, viabilidade técnica e as propriedades mecânicas exigidas para o produto final. Um aspecto fundamental no processamento do polipropileno é o índice de fluidez, que avalia a capacidade do material fundido de escoar durante a moldagem. Na moldagem por injeção, é preferível utilizar polipropileno com índice de fluidez alto, facilitando o preenchimento completo dos moldes. Em contrapartida, na

extrusão de filmes, materiais com índice de fluidez mais baixo são considerados mais adequados para atender às necessidades específicas dessa aplicação (NETO, 2021).

Além disso, o polipropileno pode apresentar três estruturas distintas, determinadas pela estereoquímica do propileno, que influencia a posição dos grupos metila na cadeia principal do polímero. Na prática, a estrutura sindiotática é a mais amplamente utilizada, devido à sua combinação de resistência mecânica, processabilidade e propriedades térmicas. Essa estrutura, resultado de uma estereoquímica alternada e regular durante a inserção do monômero, proporciona características ideais para aplicações industriais. Por outro lado, o polipropileno isotático, com sua alta cristalinidade, é mais utilizado em aplicações que demandam maior rigidez, enquanto o polipropileno atático, amorfo, encontra uso em adesivos e selantes. A cristalinidade do PP, determinada pela disposição dos grupos metila ( $\text{CH}_3$ ), é um fator chave em suas propriedades e aplicações (KOLTZ, 2023).

Na Figura 7, representam-se as possíveis configurações estruturais do polipropileno.

Figura 7 - Configurações estruturais do PP.



Fonte: Adaptado de Cardoso (2009). (KOLTZ, 2023).

Gradualmente, o polipropileno tem tomado o lugar de materiais como vidro, metal e plásticos de engenharia, como ABS, policarbonato, poliestireno e nylon, em várias aplicações. Ademais, o PP compete no mercado com outros termoplásticos, como o polietileno e o PVC, além de poder representar uma opção ao PET em embalagens rígidas. Essa adaptabilidade deve-

se a aspectos como o custo reduzido e o desempenho de alta performance. Os produtos feitos de polipropileno costumam ter maior durabilidade, são mais leves e duráveis (NETO, 2021).

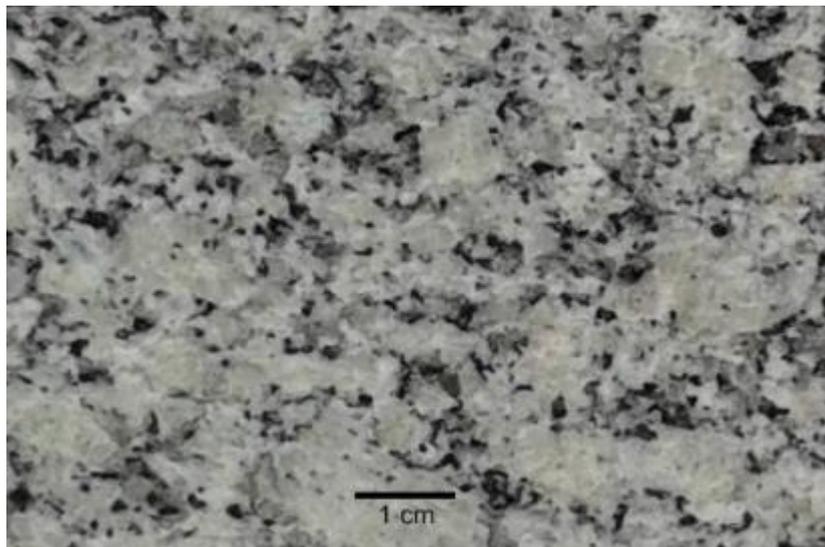
### 3.4.3 GRANITO CINZA CORUMBÁ

Os granitos são rochas ígneas com textura granulada, compostas principalmente por quartzo e feldspato, além de pequenas quantidades de micas, como biotita e muscovita. Como minerais acessórios, podem conter zircão, apatita, magnetita, piroxênio e anfibólio. Os granitos possuem um alto teor de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), cerca de 75%, presente no quartzo e nos feldspatos. Comercialmente, são considerados granitos todos os tipos de rochas não calcárias (exceto alguns quartzitos e ardósias) que podem ser cortadas, polidas e utilizadas como material de revestimento.

A cor de uma rocha pode ser explicada pelo conteúdo mineral primário e secundário. O granito com tonalidades cinza e branco são mais comuns devido à presença de minerais como o feldspato (que lhe confere a cor branca e cinza), o quartzo (que acrescenta tons de cinza e áreas transparentes) e a biotita (que lhe confere a cor preta) (SANTOS, 2016).

A Figura 8 apresenta uma amostra de granito Cinza Corumbá.

Figura 8 - Amostra de granito Cinza Corumbá.



Fonte: (SANTOS, 2016).

O quartzo é um mineral feito de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) que pertence ao grupo de silicatos e tem nove formas diferentes conhecidas, sendo oito naturais e uma artificial. A presença das diversas formas de silicato está relacionada com as condições de temperatura e

pressão. Os polimorfos que ocorrem em temperaturas mais elevadas têm estruturas mais abertas e menor energia reticular, portanto, são menos estáveis. Além disso, têm menor densidade e menor índice de refração.

Os feldspatos são derivados da sílica, são do grupo de minerais mais comuns da crosta terrestre, desempenham um papel crucial na classificação das rochas ígneas, onde a proporção entre os feldspatos alcalinos e plagioclásios é essencial. São encontrados não apenas em rochas ígneas, mas também em rochas sedimentares e metamórficas. Além disso, os feldspatos têm uma ampla gama de aplicações industriais, incluindo na produção de cerâmicas como pisos, revestimentos e porcelanas, bem como em vidros, esmaltes, construção civil, próteses dentárias, fertilizantes e como reforço em matriz polimérica.

A biotita pertence ao grupo de classificação mica. Mica é um tipo de mineral composto por folhas de silicatos de alumínio hidratados, principalmente silicatos de potássio. Estes minerais variam em composição e propriedades físicas, podendo conter além de silício, oxigênio, alumínio e hidrogênio, também íons de sódio, ferro, magnésio, cálcio, titânio, cloro e flúor em menor quantidade. Dentro do grupo dos filosilicatos, as micas têm uma estrutura onde três dos quatro oxigênios dos tetraedros de  $\text{SiO}_4$  são compartilhados com tetraedros adjacentes, resultando em uma razão  $\text{Si} = 2:5$ . No caso das micas, íons de alumínio parcialmente substituem íons de silício nos sítios tetraédricos, resultando em uma carga negativa na superfície das folhas, equilibrada pela presença de íons de potássio. Esses minerais são altamente flexíveis, têm baixa condutividade térmica e elétrica, e são altamente resistentes a mudanças repentinas de temperatura. Eles possuem uma dureza na escala de Mohs que varia de 2,0 a 2,5 e uma densidade entre 2,6 e 3,1  $\text{cm}^3$  (SANTOS, 2016).

#### **3.4.4 COMPÓSITO DE POLIPROPILENO REFORÇADO COM PÓ DE BRITAGEM DE GRANITO CINZA CORUMBA**

Especialmente no Brasil, pesquisas estão em andamento desde 1990 para explorar o uso de resíduos das indústrias de rochas ornamentais na fabricação de argamassas, concretos, tijolos, ladrilhos cerâmicos, porcelana para isolamento elétrico e como carga para polímeros (SANTOS, 2016).

Arimatéia (2014), estudou o poli (metacrilato de metila) (PMMA) pelo potencial de substituição do vidro em diversas aplicações devido à transparência, facilidade de polimento e maior resistência. Ele possui baixa densidade em relação aos metais, o que facilita o manuseio e reduz os custos de transporte, além de não gerar estilhaços ao quebrar, aumentando a

segurança. Contudo, o PMMA apresenta baixa resistência à abrasão e riscos. Para solucionar esse problema sem comprometer a transparência, foram desenvolvidos compósitos de PMMA com 1 e 3% em massa de argila organofílica, produzidos por fusão em uma extrusora de rosca dupla. Esses compósitos foram caracterizados por difração de raios X (DR-X), espectroscopia no infravermelho (FTIR) e submetidos a testes mecânicos de tração, impacto, dureza, abrasão e risco. As análises por DR-X e FTIR confirmaram a eficácia da organofilização. Observou-se uma redução na resistência ao impacto e um aumento na dureza e resistência à abrasão com o incremento da concentração de argila.

Gautam (2023), teve como objetivo investigar e otimizar as propriedades de resistência ao desgaste abrasivo de compósitos poliméricos reforçados com fibras. Para isso, diferentes estudos foram conduzidos, analisando o impacto de vários fatores, como tipo de fibra, tratamentos de superfície, e adição de partículas de enchimento. Testes com compósitos de PEEK mostraram que o aumento de fibras melhora a resistência ao desgaste, enquanto a adição de lubrificantes sólidos como grafite pode ter um efeito negativo. Comparações entre fibras de carbono e vidro revelaram que os compósitos de vidro têm melhor resistência ao desgaste. Em conclusão, o projeto demonstrou que a resistência ao desgaste de compósitos poliméricos pode ser otimizada através da escolha adequada de fibras, tratamentos de superfície e aditivos, utilizando técnicas de otimização para alcançar resultados precisos e eficazes.

Melo (2013), avaliou a viabilidade do uso de pó de conchas de moluscos como carga particulada em compósitos poliméricos de polietileno de alta densidade (PEAD). Para atingir esse objetivo, foram analisadas as influências das concentrações de 2%, 5% e 8% em massa de pó de concha, com granulometrias de 200 e 325 mesh, nas propriedades mecânicas, morfológicas e térmicas do PEAD puro. Os resultados mostraram que os compósitos sofreram pouca alteração, indicando que a carga de concha não influenciou o comportamento reológico do PEAD. O grau de cristalinidade do PEAD puro aumentou com o incremento do teor de pó de concha, sendo que a composição com 5% de pó de concha (325 mesh) apresentou um aumento de quase 29% em comparação ao PEAD puro, e a composição com 5% de pó de concha (200 mesh) tratada com titanato teve um aumento de quase 38%, sugerindo um possível efeito nucleante das partículas.

Arruda (2014), pesquisou a utilização de resíduos de mármore Bege Bahia como carga mineral na produção de compósitos de polipropileno (PP), alcançando até 50% em massa. Esses compósitos apresentaram baixa densidade e alta resistência mecânica, o que pode reduzir o custo do material e maximizar o aproveitamento dos resíduos, contribuindo para a mitigação do impacto ambiental.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 MATERIAIS

Os resíduos de granito que foram utilizados são da variedade Cinza Corumbá, eles foram obtidos na marmoraria Pietra D'Arte, cujo está localizada na rua Fernando Antônio Merlin Rachele, 153 - Ouro Verde, Bento Gonçalves - RS, 95700-000. O PP homopolímero que foi utilizado como matriz foi fornecido pela Braskem, grade H 103.

Na Tabela 7, encontra-se a ficha técnica do polipropileno H 103, fornecida pela própria Braskem.

Tabela 7 – Ficha técnica Polipropileno H 103

<b>Característica</b>	<b>Método</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
Densidade	D 792	g/cm <sup>3</sup>	0,905
Módulo de Flexão Secante a 1%	D 790	MPa	1200
Resistência à Tração no Escoamento	D 638	MPa	34
Alongamento no Escoamento	D 638	%	12
Dureza Rockwell (Escala R)	D 785	-	101
Resistência ao Impacto Izod a 23°C	D 256	J/m	20
Temperatura de Deflexão Térmica a 0,455 MPa	D 648	°C	98
Temperatura de Deflexão Térmica a 1,820 MPa	D 648	°C	55
Temperatura de Amolecimento Vicat a 10 N	D 1525	°C	156
Índice de Fluidez (230°C/2,16kg)	D 1238	g/10 min	40

Fonte: Adaptado de Braskem, 2018

### 4.2 METODOLOGIA

O projeto foi desenvolvido através da sequência metodológica a seguir.

#### 4.2.1 Moagem dos resíduos de granito

Os resíduos gerados pelo descarte de peças de granito foram triturados até atingirem a forma de pó e, posteriormente, peneirados para obter particulados com granulometria de 45 mesh, escolhida em função de limitações técnicas. Após essa etapa, o material foi seco em estufa com circulação de ar a 100°C por 8 horas, garantindo a eliminação da umidade residual.

#### 4.2.2 Processamento dos compósitos

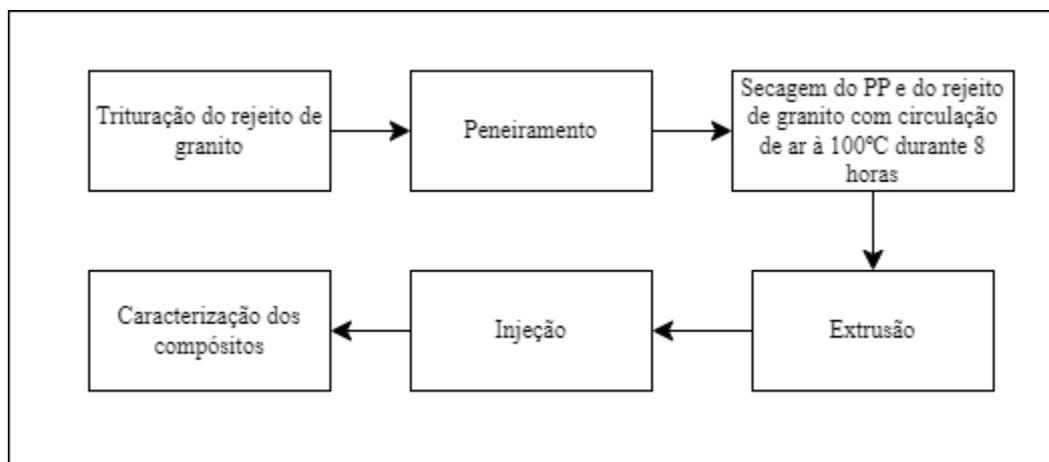
O polipropileno foi previamente seco em estufa a 100°C por 8 horas antes de ser submetido ao processo de extrusão com o pó de granito. A extrusão foi conduzida em uma extrusora de rosca dupla, modelo COR-20-32-LAB, corrotacional, com uma relação L/D de 32 e diâmetro de 20 mm, fabricada pela MH Equipamentos. Esse procedimento seguiu a mesma metodologia adotada por Koltz (2023), utilizando equipamentos similares disponíveis para essa aplicação.

As concentrações de pó de granito utilizadas foram de 10%, 20%, 30% e 40% em massa, misturadas ao polímero na extrusora de rosca dupla, com perfil de temperatura de 120°C, 160°C, 175°C, 185°C, 190°C, 170°C, 185°C, 190°C, 190°C e 190°C nas diferentes seções de aquecimento do equipamento. A rotação da rosca foi de 200 rpm. Após o processo de extrusão, o material foi novamente seco em estufa a 100°C durante 8 horas para assegurar a remoção de qualquer umidade residual.

A injeção foi realizada com uma injetora instalada no LPOL, modelo LHS 150-80, fabricada pela Himaco Hidráulica e Máquinas Ltda. Foram injetados corpos de prova para testes de densidade (ASTM D792-13) abrasão (ASTM D5963-22), tração (ASTM D638-10), flexão (ASTM D790-03) e impacto (ASTM D256-04), de acordo com as normas destacadas, com perfil de temperatura de 170°C, 185°C e 190°C, nas diferentes seções da injetora.

A seqüência dos processos de obtenção dos compósitos poliméricos está representada na Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma do processo de fabricação do compósito.



Fonte: o Autor (2024).

### 4.2.3 Caracterização dos compósitos

Foram realizados testes para caracterizar o compósito estudado, incluindo Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), medição de densidade, ensaios mecânicos e testes de resistência à abrasão. Esses testes fornecerão uma visão abrangente das propriedades e do comportamento do compósito polimérico.

### 4.2.4 Microscopia eletrônica de varredura

As micrografias da matriz, dos resíduos de pó de granito e dos compósitos foram feitas no Laboratório Central de Microscopia da UCS, utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Tescan, modelo Mira3. As amostras fraturadas, previamente revestidas com uma camada de ouro, foram analisadas gerando imagens de 80, 250 e 500 vezes de ampliação.

### 4.2.5 Densidade

A determinação da densidade realizada de acordo com as diretrizes da norma ASTM D792-13. Inicialmente, as amostras foram pesadas em uma balança analítica. Em seguida, elas foram imersas em etanol e novamente pesadas. A densidade foi determinada a partir da média de três medições para cada amostra. A densidade do material foi determinada de acordo com a Equação 1.

$$\rho = \frac{(m.d)}{(m-a)}(1)$$

Onde:  $\rho$  = densidade ( $\text{g.cm}^{-3}$ );  $m$  = massa da amostra (g);  $d$  = densidade do etanol ( $\text{g.cm}^{-3}$ );  $a$  = massa da amostra imersa no etanol (g).

### 4.2.6 Ensaios Mecânicos

As amostras para os testes mecânicos de tração, flexão e impacto foram submetidas a uma temperatura de 23 °C e umidade relativa do ar de 50%, por um período de 48 horas. O ensaio de tração obedeceu à norma ASTM D638-10 e foi realizado em cinco corpos de prova, a uma velocidade de ensaio de  $5 \text{ mm.min}^{-1}$ . Os ensaios de flexão foram conduzidos de acordo com a ASTM D790-03, utilizando uma máquina universal de ensaios EMIC DL3000 e cinco

corpos de prova, com uma velocidade de ensaio de  $1,5 \text{ mm.min}^{-1}$ . Os ensaios de resistência ao impacto Izod com entalhe, foram realizados com um martelo de 1J no equipamento CEAST Resil 25, de acordo com a ASTM D256-04, usando cinco corpos de prova.

#### 4.2.7 Resistência à abrasão

O teste de abrasividade em um compósito polimérico foi realizado seguindo os procedimentos descritos na norma ASTM D5963-22. O equipamento de testes foi configurado, utilizando um tambor rotativo ao qual uma folha abrasiva de abrasividade nominal (S0) é montada, garantindo que a abrasividade real da folha esteja dentro da faixa especificada de 180 a 220 mg. Para a execução do teste, a peça de teste é deslizada sobre a superfície da folha abrasiva montada no tambor rotativo sob condições especificadas de pressão de contato, distância de deslizamento e velocidade de rotação do tambor.

A abrasão é calculada medindo-se a perda de massa da peça de teste em relação ao material de referência, no caso o PP, considerando a densidade da amostra de teste e da referência.

A perda de massa por abrasão do material foi determinada de acordo com a Equação 2.

$$A = \frac{(\Delta c \cdot d_{pp})}{(\Delta p_{pp} \cdot d_c)} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde: A = índice de resistência à abrasão (%);  $\Delta c$  = perda de massa do compósito (g);  $d_c$  = densidade do compósito ( $\text{g.cm}^{-3}$ );  $\Delta p_{pp}$  = perda de massa do polipropileno (g);  $d_{pp}$  = densidade do propileno ( $\text{g.cm}^{-3}$ );

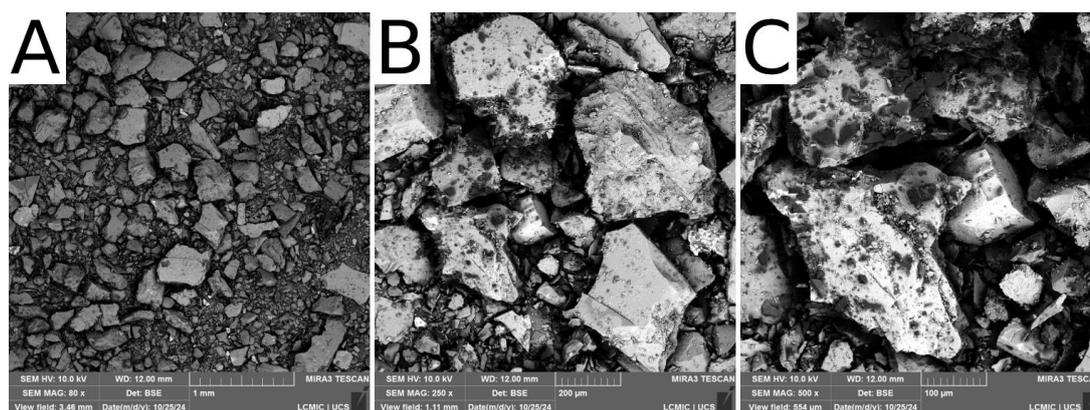
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos.

### 5.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DO REJEITO DE GRANITO

A Figura 10 mostra micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com ampliações de 80x (A), 250x (B) e 500x (C). Nessas micrografias, observa-se a distribuição irregular das partículas de pó de granito, cujos grãos variam tanto em formato quanto em tamanho, sem seguir um padrão definido. Esse comportamento ocorre porque apenas o tamanho máximo dos grãos foi controlado, utilizando peneiramento com malha de 5 mesh, 0,354 mm.

Figura 10: Micrografia de MEV do rejeito de granito em 80x (A), 250x (B) e 500x (C).



Fonte: O autor, 2024.

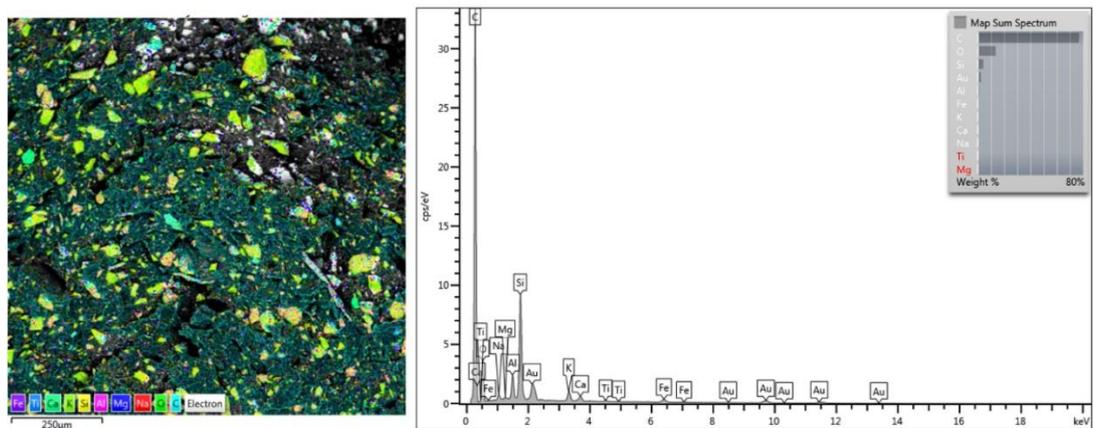
A análise realizada por MEV revelou que os grãos apresentam tamanhos variados, o que sugere uma distribuição heterogênea do material. Essa variação nas dimensões dos grãos indica que a distribuição das partículas não seguirá um padrão uniforme, resultando em uma estrutura com zonas de concentração e espaçamento irregular entre as partículas. Esse comportamento pode impactar diretamente as propriedades finais do material, como resistência mecânica e comportamento térmico, visto que a ausência de uma distribuição homogênea tende a influenciar a interação e a coesão entre as partículas.

Arruda (2014) utilizou uma granulometria de 0,037 mm, cerca de 9,56 vezes mais fina, o que facilita uma melhor dispersão das partículas na matriz polimérica. Isso ocorre devido às forças de adesão e à tensão interfacial entre a carga mineral e o polímero, que também

influenciam na tendência de formação de agregados, especialmente em partículas menores que 20 µm, onde as forças atrativas superam a massa das partículas.

A Figura 11 apresenta o levantamento dos elementos químicos identificados no rejeito de granito, destacando ferro, titânio, cálcio, potássio, silício, alumínio, magnésio, sódio, oxigênio e carbono, que compõem a maior parte do material. Além desses, a presença de ouro também foi detectada, porém, foi adicionada propositalmente ao material para facilitar a condução de elétrons durante a análise.

Figura 11: Elementos químicos no resíduo de granito.



Fonte: O autor, 2024.

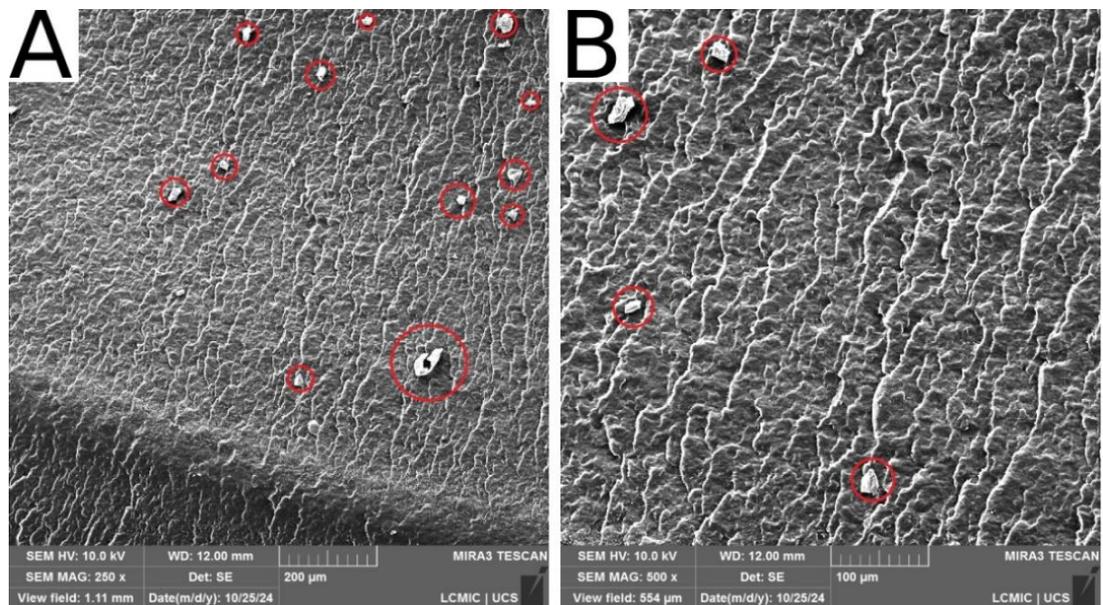
A diversidade química observada reflete a complexidade da composição do rejeito de granito, os elementos carbono, oxigênio e silício são os mais predominantes. Segundo Santos (2016), na análise elementar realizada na mesma variedade de granito, o cinza Corumbá, identificou a presença dos elementos silício, alumínio, sódio, potássio, cálcio, ferro, magnésio e titânio. A correspondência desses elementos com os resultados do presente estudo reforça a consistência da composição química típica do granito cinza Corumbá.

Na análise, Santos utilizou granulometrias que chegaram a 325 mesh, permitindo uma avaliação mais detalhada da composição química e uma maior homogeneidade na amostra analisada. Esse refinamento da granulometria possibilita maior precisão na caracterização do material.

## 5.2 MORFOLOGIA DO PP E DOS COMPÓSITOS

A Figura 12 mostra a morfologia do polipropileno (PP), evidenciando que, após o processo de extrusão, apresenta a adesão de impurezas superficiais, destacadas em vermelho. Essas impurezas, provavelmente, são resultado do contato do polipropileno com superfícies contaminadas durante o processamento, como no próprio equipamento de extrusão ou em etapas subsequentes de manuseio.

Figura 12: Morfologia do polipropileno (PP) 250x (A), 500x (B).



Fonte: O autor, 2024.

No entanto, considerando o foco desta pesquisa, essas impurezas não são provenientes de falhas no compósito, mas sim de fatores externos ao material. Dessa forma, elas não impactam diretamente os objetivos propostos nem influenciam significativamente nas propriedades avaliadas, sendo, portanto, passíveis de desconsideração na análise.

## 5.3 CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO

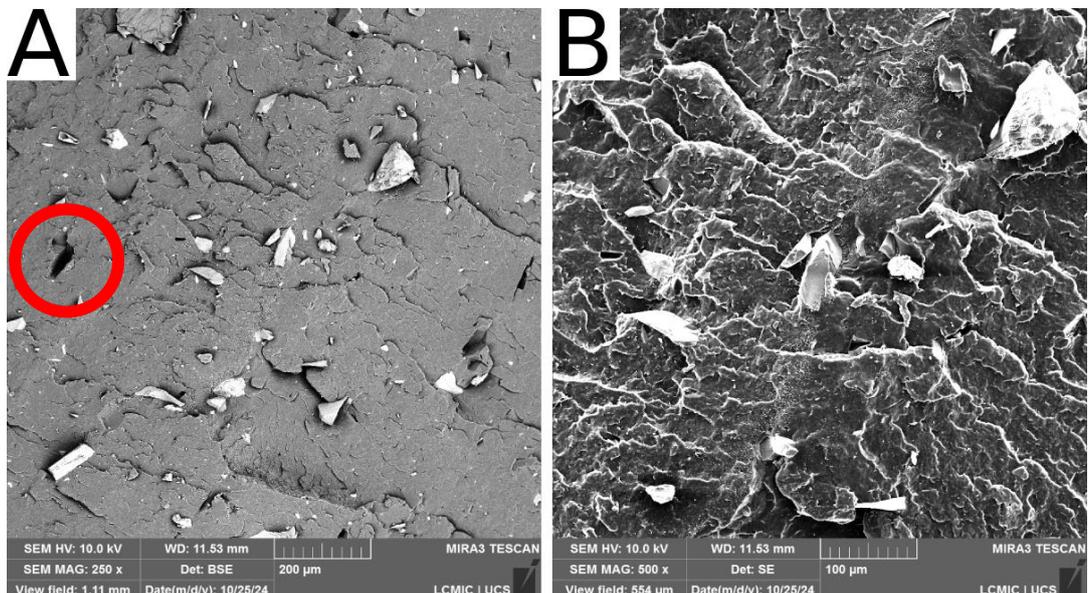
Através da análise de MEV é possível investigar a interação e a adesão do pó de granito na matriz de polipropileno (PP). As micrografias obtidas dos compósitos com diferentes concentrações de carga, variando de 10%, 20%, 30% a 40% em massa, permitem uma avaliação detalhada da dispersão e da distribuição do pó de granito na matriz polimérica. Essas

micrografias são fundamentais para entender a compatibilidade entre o pó e o polímero, além de fornecer informações sobre a homogeneidade, a presença de possíveis vazios e a eficiência do processo de mistura, que influenciam diretamente as propriedades mecânicas e a performance do material final.

Na Figura 13, os grãos do pó de granito exibem uma distribuição homogênea e bem espaçada, o que é um indicativo de que o processo de mistura entre o pó de granito e a matriz de polipropileno (PP) foi realizado de maneira eficiente. No entanto, é possível observar que alguns grãos apresentam formatos e tamanhos variados, além de estarem parcialmente expostos, o que pode ser um indicativo de baixa adesão entre o PP e o granito. A presença desses grãos descobertos sugere que a interação entre as superfícies do polipropileno e do granito não foi suficiente para garantir adesão, resultando em áreas onde o material particulado não está completamente envolvido pela matriz.

Além disso, é possível identificar a formação de vazios na superfície do compósito, o que pode ser atribuído a uma adesão inadequada entre os componentes. Esse comportamento pode estar relacionado a fatores como a diferença de polaridade entre o polipropileno e o pó de granito, que dificulta a interação química e física entre as fases. Adicionalmente, a superfície irregular das partículas de granito pode gerar concentrações de tensão em pontos específicos, contribuindo para a formação de zonas de fraca adesão e vazios. Esses aspectos comprometem a integridade estrutural do material, afetando negativamente suas propriedades mecânicas e sua durabilidade.

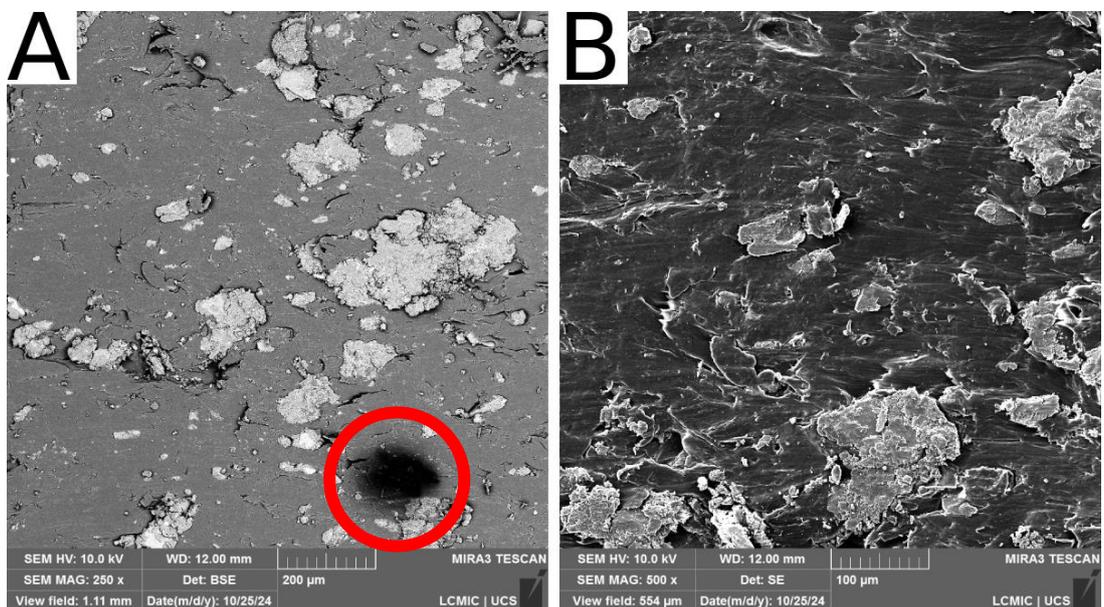
Figura 13: Morfologia granito-PP com 10% de carga, 250x (A) e 500x (B).



Fonte: O autor, 2024.

Na Figura 14, observou-se um maior agrupamento dos grãos de granito à medida que o seu percentual aumentou, o que parece ser uma tendência natural de aglomeração em concentrações mais elevadas, sem, no entanto, indicar uma melhoria significativa na adesão com a matriz de polipropileno. Os vazios ainda permanecem visíveis, sugerindo que a adesão entre os componentes não é completamente eficiente. Além disso, nesta proporção de mistura, alguns grãos aparecem parcialmente envoltos pela matriz polimérica, o que pode indicar um início de interação, mas sem uma adesão total entre os materiais.

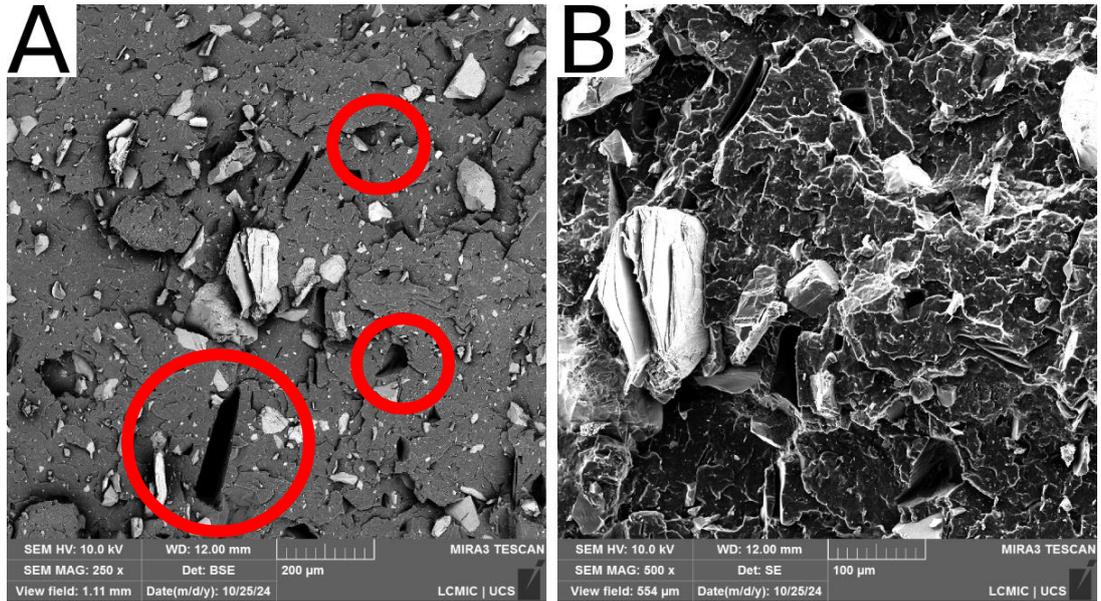
Figura 14: Morfologia granito-PP com 20% de carga, 250x (A) e 500x (B).



Fonte: O autor, 2024.

Na Figura 15, a presença de vazios tornou-se ainda mais frequente em comparação às figuras 13 e 14, um aspecto importante observado foi a grande disparidade no tamanho e formato dos grãos de granito, que parecem estar menos imersos na matriz polimérica, com alguns grãos agora claramente expostos.

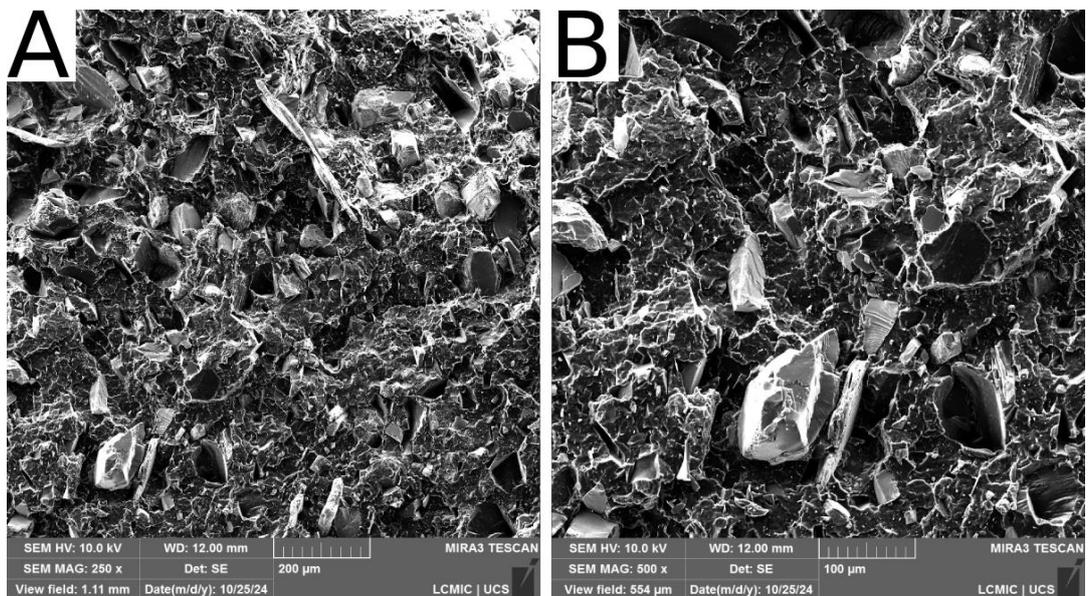
Figura 15: Morfologia granito-PP com 30% de carga, 250x (A) e 500x (B).



Fonte: O autor, 2024.

Na Figura 16, com 40% de pó de granito incorporado à matriz de polipropileno, a presença de vazios tornou-se mais pronunciada no material, provavelmente devido ao aumento no teor de carga.

Figura 16: Morfologia granito-PP com 40% de carga, 250x (A) e 500x (B).



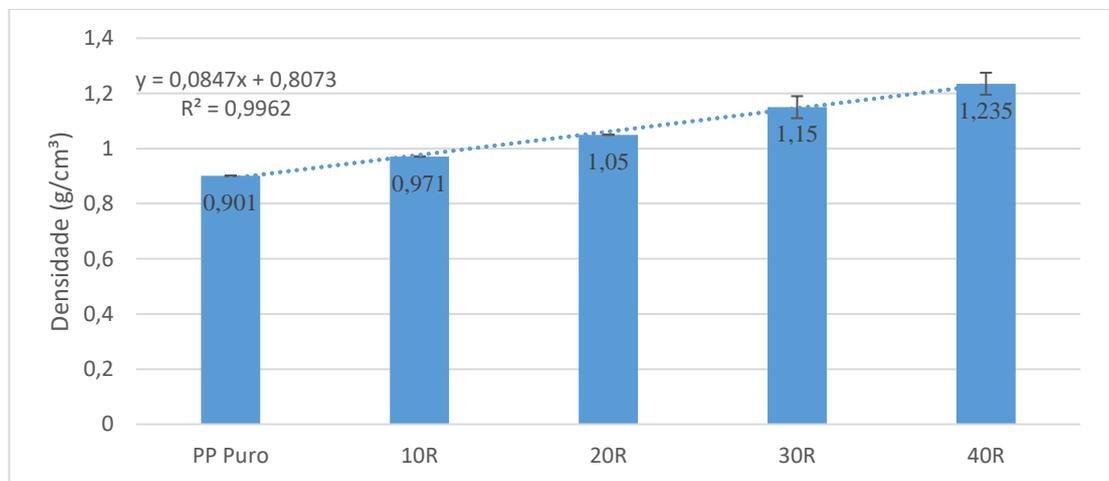
Fonte: O autor, 2024.

À medida que a carga de pó de granito aumenta, a baixa adesão entre o granito e o polipropileno se torna cada vez mais evidente, com o surgimento de falhas, como a presença de vazios e fraca adesão polímero/carga, comprometendo a integridade do material.

#### 5.4 DENSIDADE

Na Figura 17, são apresentados os valores de densidade do polipropileno (PP) e dos compósitos poliméricos com adição de pó de granito.

Figura 17: Densidade dos materiais.



Fonte: O autor, 2024.

A análise do gráfico com a adição de uma linha de tendência linear gerou a equação 3:

$$Y = 0,0847x + 0,8073 \quad (3)$$

Onde: Y = densidade (g/cm³) e x = percentual de pó de granito adicionado como reforço de carga (%). A fórmula foi validada apenas para os percentuais de concentração de pó de granito estudados neste trabalho, não tendo sido validada para outras faixas de concentração.

Obteve-se um  $R^2 = 0,996$ , o que indica uma relação entre a concentração de pó de granito e a densidade.

Observa-se que, com o aumento da carga de pó de granito, todos os compósitos apresentaram um aumento na densidade em relação ao PP. Materiais com conteúdo mineral, como o pó de granito, tendem a ter densidade superior à do polipropileno, o que explica o aumento da densidade nos compósitos com a adição dessa carga. A amostra A40, com 40% de pó de granito, apresentou o maior aumento em comparação às demais, com uma densidade de

aproximadamente  $1,24 \text{ g/cm}^3$ , enquanto a densidade do PP é de  $0,9 \text{ g/cm}^3$ , resultando em um aumento de 37%.

## 5.5 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos desempenham um papel importante na caracterização dos materiais, permitindo a avaliação das propriedades em diferentes condições de aplicação. Para o compósito de polipropileno com pó de granito, os ensaios de resistência à tração, flexão, abrasão e impacto fornecem informações sobre o comportamento estrutural e a durabilidade do material. O ensaio de resistência à tração (5.5.1) permite avaliar a capacidade do compósito de suportar forças de alongamento. A resistência à flexão (5.5.2) analisa a resistência do material sob cargas de flexão, simulando condições de curvatura. A resistência à abrasão (5.5.3) mede a capacidade do compósito de resistir ao desgaste superficial, essencial para aplicações em ambientes de alta fricção. Já o ensaio de resistência ao impacto (5.5.4) verifica a capacidade de absorção de energia em situações de choque, determinando a resiliência do material a danos súbitos. Esses ensaios são fundamentais para compreender e otimizar o desempenho do compósito nas mais diversas aplicações.

### 5.5.1 Resistência à tração

Na Tabela 8 são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de resistência à tração, incluindo os valores médios e os desvios padrão do PP e dos compósitos poliméricos que foram reforçados com a adição de pó de granito.

Tabela 8: Propriedades mecânicas obtidas no ensaio de resistência à tração.

Amostras	Alongamento (%)	Resistência a tração (MPa)	Redução da resistência a tração (%)	Módulo de tração (MPa)	Aumento do módulo de tração (%)
PP Puro	$19,82 \pm 0,53$	$34,65 \pm 0,52$	-	$554,09 \pm 36,02$	-
10R	$16,60 \pm 0,29$	$31,93 \pm 0,38$	-7,8%	$642,50 \pm 20,06$	16,0%
20R	$14,08 \pm 0,36$	$28,77 \pm 0,29$	-17,0%	$705,07 \pm 24,67$	27,2%
30R	$12,20 \pm 0,33$	$26,43 \pm 0,09$	-23,7%	$787,92 \pm 25,75$	42,2%
40R	$9,77 \pm 0,17$	$23,49 \pm 0,37$	-32,2%	$854,45 \pm 19,99$	54,2%

Fonte: O Autor, 2024.

A adição de pó de granito aos compósitos resultou em uma diminuição no percentual de alongamento desses materiais. Esse efeito é esperado, uma vez que o pó de granito funciona limitando a mobilidade das cadeias da matriz polimérica de polipropileno. Conforme a quantidade de pó de granito aumenta, a resistência à tração diminuiu, enquanto o módulo de tração foi incrementado.

Quanto ao módulo de tração, os compósitos contendo pó de granito apresentaram valores mais altos que os do PP. Esse comportamento ocorre porque o pó de granito possui maior rigidez em comparação à matriz polimérica. Observou-se que o módulo de tração aumentou à medida que o teor de pó de granito foi elevado, o que se deve à rigidez adicional conferida pelas partículas de granito.

Para a concentração de 40% em massa de pó de granito, observou-se um aumento no módulo de tração, com uma melhoria aproximada de 54% em comparação ao PP. Esse incremento evidencia a elevada rigidez do pó de granito, que atua como um reforço eficiente. Entretanto, teores muito altos de pó de granito podem comprometer a interação entre as partículas e a matriz, como sugerido pelos resultados obtidos com 40% de carga. A maior concentração de pó pode dificultar a dispersão e adesão, o que pode ocasionar uma redução na resistência à tração, embora o módulo de tração continue a aumentar. A morfologia observada na Figura 16 para a amostra com 40% de carga corrobora essa afirmação.

No trabalho de Arruda (2014), o teste de tração dos compósitos de polipropileno com carga de granito, apresentou resultados significativos sobre a tensão de escoamento, deformação específica de ruptura e o módulo elástico. A incorporação de resíduo de granito à matriz polimérica gerou uma redução da tensão de escoamento nos compósitos sem compatibilizante, o que indica uma menor capacidade de suportar tensões máximas.

No entanto, a adição do compatibilizante polipropileno *graftado* com anidrido maleico (PP-MA), não resultou em uma diminuição da tensão de escoamento, sugerindo que o PP-MA atua de forma eficaz para promover a aderência entre o resíduo de granito e o polímero, preservando a resistência do compósito. Os resultados ressaltam a importância do uso de compatibilizantes para manter as propriedades mecânicas dos compósitos, mesmo com altos teores de carga mineral, como demonstrado pelo comportamento dos compósitos com 40% e 50% de carga.

Melo (2013), nos resultados obtidos no ensaio de tração indicaram que a adição do pó de concha ao PEAD, mesmo com diferentes granulometrias e concentrações, apresentou resultados limitados quanto à melhora das propriedades mecânicas.

### 5.5.2 Resistência à flexão

Na Tabela 9, são apresentados os dados de deformação, resistência à flexão e módulo de flexão para o PP e para os compósitos contendo pó de granito como reforço. Observa-se que a deformação dos compósitos diminuiu com a adição do pó de granito ao PP.

Tabela 9: Propriedades mecânicas obtidas no ensaio de resistência à flexão.

Amostras	Deformação (%)	Resistência a flexão (MPa)	Redução da resistência a flexão (%)	Módulo de flexão (MPa)	Aumento do módulo de flexão (%)
PP Puro	7,25 ± 0,21	41,43 ± 0,45	-	1366,76 ± 39,89	-
10R	6,43 ± 0,12	41,20 ± 0,68	-0,54%	1641,42 ± 47,88	20,10%
20R	6,32 ± 0,35	40,42 ± 0,63	-2,42%	1839,48 ± 79,87	34,59%
30R	5,95 ± 0,26	40,23 ± 0,48	-2,90%	1988,14 ± 390,59	45,46%
40R	5,24 ± 0,38	37,80 ± 0,54	-8,76%	2470,60 ± 100,62	80,76%

Fonte: O Autor, 2024.

Com a inclusão de pó de granito, verificou-se uma diminuição na resistência à flexão dos compósitos. Esse decréscimo pode ser atribuído à fraca adesão entre o polipropileno (PP) e o pó de granito, o que afeta negativamente as propriedades mecânicas do compósito, como foi observado nas micrografias das Figuras 13, 14, 15 e 16.

Por outro lado, o módulo de flexão dos compósitos apresentou um aumento considerável em comparação com o PP. A adição de 40% de pó de granito resultou em um incremento de aproximadamente 80% no módulo de flexão, em relação ao PP, evidenciando a contribuição significativa do reforço mineral para a rigidez do compósito.

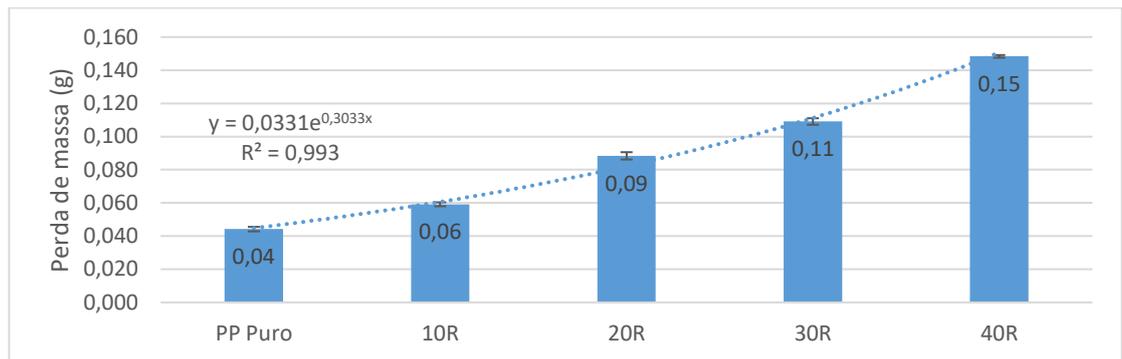
Arruda (2014) observou que a incorporação de resíduos de mármore Bege Bahia ao polipropileno resultou em um aumento significativo no módulo de elasticidade dos compósitos quando compatibilizada com PP-MA.

Com base nos resultados de Melo (2013), observou-se que os compósitos poliméricos reforçados com partículas apresentaram comportamento mecânico distinto sob flexão, dependendo da granulometria das partículas incorporadas. No ensaio de flexão, Melo verificou que os compósitos com partículas mais finas (325 mesh) apresentaram um aumento significativo no módulo de elasticidade e na tensão máxima em relação à matriz polimérica pura.

### 5.5.3 Resistência à abrasão

A Figura 18 apresenta a perda de massa dos resultados do ensaio de abrasão realizado em compósitos de polipropileno (PP) incorporado com diferentes teores de pó de granito, variando de 10%, 20%, 30% e 40%.

Figura 18: Perda de massa em função do compósito e polipropileno puro.



Fonte: O autor, 2024.

A análise do gráfico, adicionando uma linha tendência exponencial, resultou na equação 4:

$$Y = 0,0331 e^{0,3033x} \quad (4)$$

Em que: Y representa a perda de massa (g) e x corresponde à porcentagem de pó de granito adicionado como reforço de carga (%). A fórmula foi validada exclusivamente para os percentuais de concentração de pó de granito analisados neste estudo, não tendo sido testada ou validada para outras faixas de concentração.

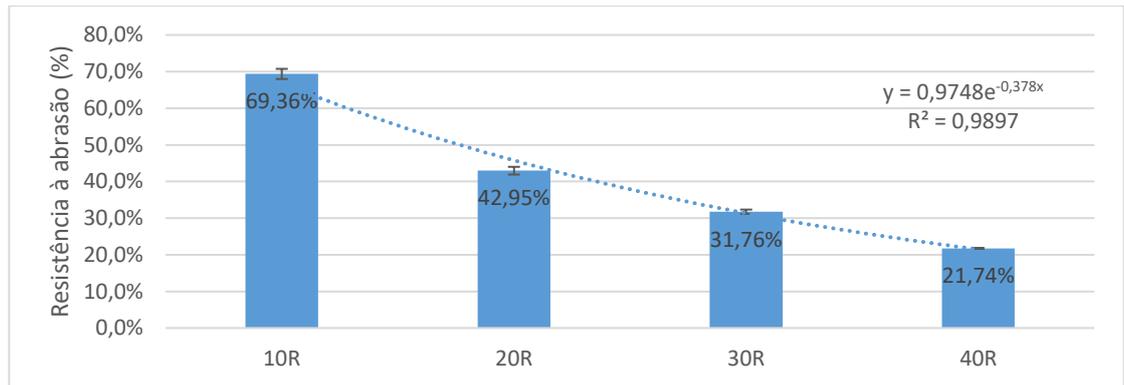
Obteve-se um  $R^2 = 0,993$ , o que revela uma relação entre a concentração de pó de granito e a perda de massa do compósito durante o ensaio de abrasão. O valor próximo de 1,0 indica que a equação exponencial se ajusta bem aos dados experimentais, demonstrando que o aumento da perda de massa segue uma tendência clara e consistente à medida que a quantidade de pó de granito aumenta.

Em termos práticos, isso implica que, conforme mais pó de granito é incorporado, o compósito se torna progressivamente mais vulnerável ao desgaste, o que pode ser atribuído à fraca adesão entre o pó de granito e o polipropileno, como mencionado anteriormente. Isso reforça a observação de que a adição de pó de granito, embora tenha um efeito de reforço na carga, compromete a resistência à abrasão do material de forma significativa, especialmente

nas maiores concentrações. A adição de 40% de pó de granito resultou em um aumento na perda de massa de aproximadamente 236% em comparação ao polipropileno.

A Figura 19 apresenta a resistência à abrasão em função da incorporação dos teores de 10%, 20%, 30% e 40% de pó de granito.

Figura 19: Resistência à abrasão em função do compósito e polipropileno puro.



Fonte: O autor, 2024.

A interpretação do gráfico, com a inclusão de uma linha de tendência exponencial, gerou a equação 5:

$$Y = 0,9748 e^{-0,3783x} \quad (5)$$

Onde:  $Y$  = Resistência à abrasão (%);  $x$  = pó de granito adicionado como reforço de carga (%), fórmula válida somente para os percentuais estudados.

Foi obtido um valor de  $R^2 = 0,987$ , o que indica correlação entre a concentração de pó de granito e a resistência à abrasão durante o ensaio de abrasão.

O índice de resistência à abrasão apresentou uma diminuição com o aumento do teor de pó de granito nos compósitos. Conforme a quantidade de pó de granito foi aumentando, a resistência ao desgaste superficial dos compósitos decaiu de forma expressiva.

Esse comportamento pode ser explicado pela interação entre o pó de granito e o polipropileno. A falta de adesão adequada entre o pó de granito e a matriz polimérica provavelmente comprometeu a integridade estrutural e a resistência superficial do compósito. A presença do pó de granito, que não interagiu de maneira satisfatória ao polímero, pode ter favorecido a formação de fraturas e pontos vulneráveis, tornando o material mais suscetível ao desgaste.

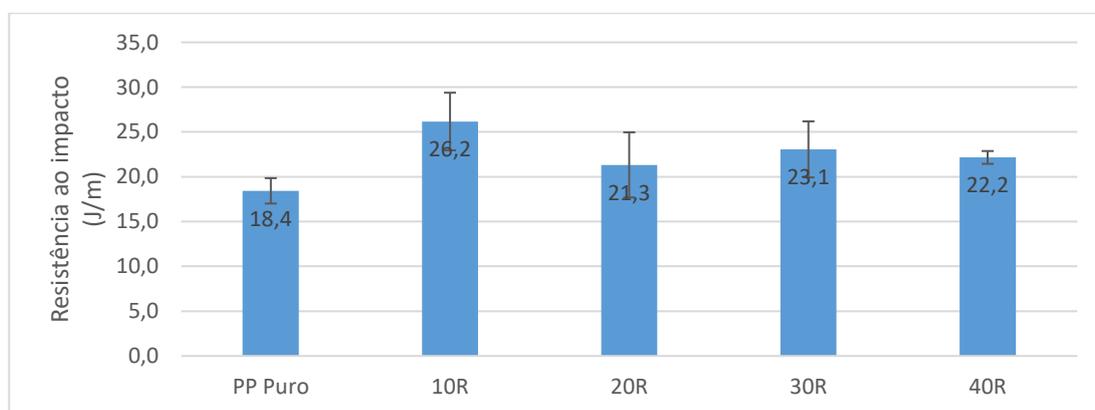
A incorporação de pó de granito em compósitos reforçados com fibras naturais e sintéticas melhora significativamente a resistência à abrasão, indicando que a presença do reforço com pó de granito contribuiu para um aumento na resistência ao desgaste. O estudo utilizou concentrações de pó de granito variando entre 2% e 8% em massa, reforçando a importância da fração de massa no desempenho dos compósitos (GAUTAM et al. 2023).

O uso de argila organofílica nacional no desenvolvimento de compósitos de poli (metacrilato de metila) (PMMA) resultou em melhorias significativas na resistência à abrasão. Em particular, observou-se que a adição de 1% em peso de argila organofílica proporcionou uma melhor dispersão da carga, atuando como reforço e resultando em um menor índice de desgaste. Por outro lado, com 3% de argila, houve aumento da resistência à abrasão, mas acompanhado de um comportamento mais frágil devido à formação de aglomerações. Esse comportamento foi atribuído à transição dos mecanismos de desgaste, de microsulcamento no PMMA puro para microlascamento nos compósitos com argila. A pesquisa demonstrou que a eficiência da dispersão da argila foi essencial para alcançar propriedades otimizadas, como maior dureza e resistência ao desgaste, sem comprometer a transparência dos compósitos desenvolvidos. Assim, o objetivo de obter um material mais resistente à abrasão com equilíbrio de propriedades mecânicas foi alcançado (ARIMATEIA, 2014).

#### 5.5.4 Resistência à impacto

Na Figura 20, são apresentados os resultados da resistência ao impacto dos compósitos produzidos. Observa-se que, à medida que o teor de pó de granito foi incrementado, a resistência ao impacto variou de forma não linear.

Figura 20: Resistência ao impacto.



Fonte: O autor, 2024.

O compósito com 10% de pó de granito (10R) obteve um aumento na resistência ao impacto, alcançando 26,2 J/m, em comparação com o PP, que apresentou 18,4 J/m. No entanto, os compósitos com 20%, 30% e 40% de pó de granito (20R, 30R e 40R) apresentaram uma redução na resistência ao impacto, com valores de 21,3 J/m, 23,1 J/m e 22,2 J/m, respectivamente.

A variação na resistência ao impacto está relacionada à interação entre o pó de granito e a matriz do polipropileno. A presença de vazios e grãos de pó de granito expostos, resultantes de uma adesão insatisfatória entre os dois materiais, pode ter contribuído para essa diminuição. Além disso, o aumento da carga de pó de granito parece ter conferido maior rigidez aos compósitos, o que, por vez, resultou em uma menor capacidade de absorção de energia durante o impacto, refletindo uma redução na ductilidade do material.

A incorporação de resíduo de mármore na matriz de polipropileno resulta em uma diminuição na resistência ao impacto dos compósitos. A carga de mármore não contribui positivamente para a melhoria das propriedades de resistência ao impacto do compósito de polipropileno, ao contrário, houve uma redução na performance dos materiais testados (ARRUDA, 2014).

A resistência ao impacto é influenciada por diversos fatores, incluindo a natureza e o tratamento das cargas utilizadas. Em seus ensaios, Melo observou que o compósito apresentou uma redução na resistência ao impacto ao incorporar cargas não tratadas, especialmente quando estas apresentavam granulometria mais grosseira. Essa diminuição foi atribuída à menor interação entre as partículas de carga e a matriz polimérica.

Além disso, Melo destacou que, mesmo com o uso de partículas tratadas quimicamente, como com agentes de acoplamento, a resistência ao impacto não superou a do polímero puro. Esses resultados indicam que a rigidez dos compósitos tende a aumentar com a incorporação de cargas, mas a resistência ao impacto pode ser comprometida pela adesão interfacial insuficiente, reforçando a necessidade de considerar fatores como o tratamento superficial e a granulometria das partículas (MELO, 2013).

## 6 CONCLUSÃO

A análise MEV revelou que a distribuição do pó de granito nas amostras foi heterogênea, com grãos de tamanhos e formas variados, devido ao processo de peneiramento. Essa irregularidade resultou em uma dispersão desigual na matriz de polipropileno, com áreas de grãos expostos e formação de crateras. A baixa adesão entre o pó de granito e o polipropileno, evidenciada nas micrografias, comprometeu a coesão dos materiais, afetando negativamente as propriedades mecânicas do compósito. Quanto maior o teor de pó de granito, mais acentuadas eram as falhas estruturais, especialmente com 40% de carga, onde a adesão foi mais prejudicada.

A densidade dos compósitos aumentou com a adição do pó de granito, que possui maior densidade que o polipropileno, com um incremento de até 37% nas amostras com 40% de carga. Nos ensaios mecânicos, o aumento do pó de granito reduziu o alongamento e a resistência à tração, devido à fraca adesão entre os componentes. Por outro lado, o módulo de tração aumentou, demonstrando que o pó de granito contribuiu para a rigidez do material, embora comprometa a transmissão eficiente de forças.

Na resistência à flexão, observou-se maior rigidez com a adição de pó de granito, refletida no aumento do módulo de flexão, mas com queda progressiva na resistência, especialmente em concentrações elevadas, devido à adesão insuficiente. Nos ensaios de abrasão, a perda de massa aumentou com a carga mineral, evidenciando menor resistência ao desgaste. A resistência ao impacto mostrou um aumento inicial com 10% de pó de granito, seguido de queda nas concentrações mais altas, associada às falhas estruturais e fraca adesão.

Em síntese, o pó de granito aumentou a rigidez dos compósitos, elevando os módulos de tração e flexão, mas comprometeu propriedades como resistência à tração, flexão, abrasão e impacto nas maiores concentrações. Assim, a aplicação deve ser cuidadosamente balanceada para evitar prejuízos à integridade e durabilidade do material.

## **7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

Para futuros trabalhos, recomenda-se a realização de uma moagem e peneiramento para obter material mais finos, a fim de obter uma granulometria menor e mais compatível com o polipropileno, facilitando a interação entre os componentes. Além disso, a introdução de um agente de acoplamento pode ser uma alternativa promissora para melhorar a adesão entre o pó de granito e o PP, promovendo melhor interação na interface, o que pode resultar em um compósito com propriedades de resistência mais equilibradas e satisfatórias.

## REFERÊNCIAS

Abirochas. **O Setor Brasileiro de Rochas Ornamentais - Informe 05/2018**. 2018. Disponível em: [https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2022/01/Informe\\_05\\_2018\\_Setor\\_de\\_Rochas\\_Ornamentais\\_c.pdf](https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2022/01/Informe_05_2018_Setor_de_Rochas_Ornamentais_c.pdf). Acesso em: 26 de maio de 2024.

ANJOS, Igor P. Dos **ANÁLISE DA VIABILIDADE MECÂNICA DA REDUÇÃO DE PESO DO COMPARTIMENTO DE CARGA DE UMA PICK-UP PELA SUBSTITUIÇÃO DE PAINÉIS METÁLICOS POR POLÍMEROS REFORÇADOS**. 2018. TCC (Pós Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas. Belo Horizonte. 2018.

ARIMATÉIA, R. R. et al. **USO DE ARGILA ORGANOFÍLICA NACIONAL NO DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM MELHORES PROPRIEDADES ABRASIVAS**. 2014. 58º Congresso Brasileiro de Cerâmica – Universidade Federal de Campina Grande; Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Campina Grande. 2014.

ARRUDA, Camila M. R. **APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS COMO CARGA PARA A FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA**. 2014. TCC (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2014.

ASTM. D256: *Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics*. 2004.

ASTM. D3878: *Standard terminology for composite materials*. 2016. DOI: 10.1520/D3878-16

ASTM. D5963: *Standard Test Method for Rubber Property—Abrasion Resistance (Rotary Drum Abrader)*. 2022. DOI: 10.1520/D5963-22

ASTM. D638: *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. 2010. DOI: 10.1520/D0638-10

ASTM. D790: *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. 2003.

ASTM. D792: *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*. 2013. DOI: 10.1520/D0792-13.

AZEVEDO, Hélio C. A. et al. **Tecnologia de Rochas Ornamentais Pesquisa, Lavra e Beneficiamento**. Rio de Janeiro: Editora CETEM/MCTI. 2013.

BRASKEM. Polipropileno H 103 - Folha de Dados. Revisão 14 (Fev/18). Disponível em: <https://www.braskem.com.br/cms/Principal/produto/download?id=L4X5S67M/OQ=&folhadados=true>. Acesso em: 14 dez. 2024.

CATTO, Matheus A. Z. **A EVOLUÇÃO DA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA BRASILEIRA (1956-2014)**. 2015. Tese (Graduação em Relações Internacionais) – Faculdade de Ciências Econômicas da UFRGS, Porto Alegre, 2015.

CHIODI, Denise K.; FILHO, Cid C. **Balanco do Setor Brasileiro de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2023**. 2024. Disponível em: [https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2024/03/Informe-01\\_2024-Balanco-2023.pdf](https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2024/03/Informe-01_2024-Balanco-2023.pdf). Acesso em: 26 de maio de 2024.

GAUTAM, Vikash. et al. *Investigation on dry abrasion wear of natural and synthetic fiber reinforced polymer composites filled with stone waste*. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785323044632>. Acesso em: 26 de maio de 2024.

GOMES, Dennys E. B.; MEDINA, Heloísa V. **Reciclagem de Automóveis: Estratégias, práticas e perspectivas**. Rio de Janeiro: Editora CETEM/MCT. 2003.

HATSCHBACH, Ricardo Niemeyer; NAVEIRO, Ricardo Manfredi. **Panorama da reciclagem de componentes no setor automobilístico**. 2003. Seminário (Encontro Nacional de Engenheiros de Produção) – UFRJ, Ouro Preto, 2003.

HEMAIS, Carlos A. **Polímeros e a Indústria Automobilística**. 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/M7SMYkKWh9kmqPGd4D8mhLg/?lang=pt>. Acesso em 24 de maio de 2024.

JONES, Daniel R. et al. **A Máquina que Mudou o Mundo**. 10 ed. São Paulo: Editora Campus. 2004.

KOLTZ, Alan Frizzo. **Avaliação do Uso de Fibras do Bagaço de Cana de Açúcar e da Coroa do Abacaxi Como Carga de Reforço Em Compósitos**. 2023. TCC (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul UCS. Bento Gonçalves. 2023.

LINS, F. A. F. et al. **Setor de Transformação de Não Metálicos**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos/anuario-estatitico-2021-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos-ano-base-2020.pdf>. Acesso em: 26 de maio de 2024.

MEDINA, Heloísa Vasconcellos de. **Inovação em Materiais na Indústria Automobilística**. Rio de Janeiro: Editora CETEM/MCT. 2001.

MELO, Patricia M. A. **Compósitos Particulados de Polietileno de Alta Densidade E Concha de Molusco: Efeito do Teor e da Granulometria**. 2013. Tese (Pós-graduação em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2013.

NETO, João C. F. O. **Análise e Perspectivas do Mercado de Polipropileno**. 2021. TCC (Bacharel em Engenharia Química) – Univesidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2021.

Plastivida. **Os plásticos**. Disponível em: <http://plastivida.org.br/index.php/conhecimento/35-os-plasticos?lang=pt>. Acesso em: 20 de maio de 2024.

Plastivida. **Reciclagem**. Disponível em: <http://plastivida.org.br/index.php/conhecimento/19-reciclagem?lang=pt>. Acesso em: 20 de maio de 2024.

SANTOS, Jefferson. **Caracterização de Resíduos de Rochas Ornamentais: Aplicação de Conceitos Mecanoquímicos**. 2016. Tese (Mestrado em Química / Físico-Química) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2016.

SILVA, João F. M. G. **Pré-impregnados de Matriz Termoplástica: Fabrico e Transformação por Compressão a Quente e Enrolamento Filamentar**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto. Portugal. 2005.

TORRES, Luis N. M. **Estudo e Fabrico de Estrutura de Veículo Automóvel em Compósito**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto. Portugal. 2016.