

RELAÇÃO DA INTERAÇÃO DOS MINERAIS PRESENTES EM ROCHAS ORNAMENTAIS COM PP NA GERAÇÃO DE ARMAÇÃO DE ÓCULOS

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE INTERACTION OF MINERALS PRESENT IN ORNAMENTAL ROCKS WITH PP IN THE GENERATION OF EYEGLOSS FRAMES

Filippe Jorge Santos de Araújo

Aluno de Graduação em Química, IFRJ

Período PIBIC/CETEM: agosto de 2025 – julho de 2026

fjsaraujo@gmail.com

Roberto Carlos da Conceição Ribeiro

Orientador, Professor Engenheiro Químico, D.Sc.

rcarlos@cetem.gov.br

Daniele Cruz Bastos

Coorientadora, Engenheira Química, D.Sc.

dbastos@uerjzo.br

Nuria Fernández Castro

Coorientadora, Engenheira de Minas, D.Sc.

ncastro@cetem.gov.br

RESUMO

O presente trabalho avaliou a interação entre minerais presentes em resíduos de rochas ornamentais e o polipropileno (PP), visando sua aplicação na produção de armações de óculos. Foram estudados resíduos provenientes de granito, mármore, pedra-sabão e calcário sedimentar, contendo como principais fases minerais quartzo, feldspato, talco, calcita e dolomita. O PP utilizado apresentou índice de fluidez de 11 g/10 min e densidade de 0,90 g/cm³, enquanto os resíduos foram processados em partículas inferiores a 0,149, 0,044 e 0,020 mm, utilizando-se 10% em massa de carga mineral. As análises químicas indicaram aproximadamente 60% de SiO₂ e 20% de Al₂O₃ no granito, 50% de SiO₂ e 20% de MgO na pedra-sabão, enquanto os resíduos carbonáticos apresentaram teores superiores a 50% de CaO no calcário e aproximadamente 30% de CaO e 20% de MgO no mármore. Os melhores resultados de resistência ao impacto foram obtidos com granito, cerca de 40 J/m, seguido do mármore (33 J/m) e do calcário e pedra-sabão (30 J/m). Na flexão, pedra-sabão apresentou 130 MPa e calcário 120 MPa. A modelagem molecular indicou interação favorável para todos os minerais, destacando-se feldspato (8,21 J) e quartzo (10,44 J), em comparação ao PP isolado (19,78 J).

ABSTRACT

This study evaluated the interaction between minerals present in ornamental rock residues and polypropylene (PP), aiming at their application in the manufacture of eyeglass frames. Residues from granite, marble, soapstone, and sedimentary limestone were investigated, containing quartz, feldspar, talc, calcite, and dolomite as the main mineral phases. The PP used exhibited a melt flow index of 11 g/10 min and a density of 0.90 g/cm³, while the residues were processed to particle sizes below 0.149, 0.044, and 0.020 mm, using a mineral residue content of 10 wt.%. Chemical analyses indicated approximately 60% SiO₂ and 20% Al₂O₃ in the granite residue, 50% SiO₂ and 20% MgO in the soapstone residue, whereas the carbonate residues presented CaO contents above 50% in the limestone and approximately 30% CaO and 20% MgO in the marble. The highest impact resistance was obtained for the granite-containing composite, approximately 40 J/m, followed by marble (33 J/m) and limestone and soapstone (30 J/m). Regarding flexural strength, the soapstone composite exhibited 130 MPa, while the limestone

composite reached 120 MPa. Molecular modeling indicated favorable interactions for all mineral/PP systems, with the lowest potential energy values obtained for feldspar (8.21 J) and quartz (10.44 J), compared with 19.78 J for isolated PP. These results demonstrate that the mineralogical composition strongly influences the mechanical performance and interfacial interaction of the composites, supporting the potential reuse of ornamental rock residues in polymeric materials.

1. INTRODUÇÃO

Em quarto lugar na produção mundial de rochas ornamentais em 2025 e com produção de mais de 10 milhões de toneladas, a perspectiva do Brasil é aumentar 45% dessa produção em apenas oito anos (ABIROCHAS, 2025). No entanto, atrelado a essa produção, observa-se a geração de uma quantidade significativa de resíduos (Figura 1), gerados durante o corte e o beneficiamento das rochas, que podem acarretar grandes impactos ambientais além de problemas econômicos para o setor, que tem como grande desafio o reaproveitamento racional desses resíduos, tornando-o um subproduto economicamente viável para sua comercialização.



Figura 1: Resíduos gerados na lavra e no beneficiamento do Mármore Bege Bahia.

Atualmente, existem diversos estudos para a aplicação desses resíduos em vários setores industriais, como na produção de cerâmica, de papel, de cosméticos, como fertilizantes, dentre outros. Nesse contexto, aparece a indústria polimérica, que utiliza, anualmente, toneladas de cargas minerais para a geração de compósitos poliméricos, visando à redução de custos e melhora em suas propriedades mecânicas (LIMA, 2007). Baseado nisso, esse setor seria um possível nicho para absorção dos resíduos de rochas em seu processamento.

A escolha correta da matriz polimérica e da carga, bem como a proporção entre ambas é fundamental e, as características finais do produto dependerão das propriedades desses materiais. O tamanho, a forma, bem como sua aderência a matriz são características importantes para serem avaliadas na carga (TRINDADE et al., 2004)

2. OBJETIVOS

Verificar como a interação dos minerais (quartzo, feldspato, talco, calcita e dolomita) presentes em resíduos gerados no corte de rochas ornamentais com o polipropileno afeta o comportamento mecânico do compósito gerado para geração de armações de óculos, pois o CETEM assinou uma transferência tecnológica de sua patente com uma grande empresa do setor e se tornam necessários estudos mais aprofundados nesse setor.

3. METODOLOGIA

3.1 Origem dos Materiais

O polipropileno utilizado apresenta índice de fluidez 11g/10min e densidade 0,90 g.cm⁻³. Já os resíduos, são oriundos do corte das seguintes rochas ornamentais: um calcário sedimentar do Ceará, um mármore do Espírito Santo, uma pedra sabão de Minas Gerais e um granito do Espírito Santo. Tais resíduos serão identificados com as seguintes nomenclaturas, respectivamente, RCS, RM, RPS, RG.

3.2 Análise Química e Mineralógica dos Resíduos

A determinação da composição química e mineralógica dos resíduos foi realizada pela Coordenação de Análises Minerais (COAM) do CETEM.

3.3 Tratamento dos Resíduos

Os mesmos foram pulverizados e peneirados à úmido até a obtenção de tamanhos de partícula inferiores a 0,149 mm, 0,044 mm e 0,020 mm. Após o peneiramento, os resíduos foram secos em estufa a 70 °C por 24 horas e, em seguida, desagregados.

3.4 Processamento dos Compósitos Poliméricos

O processamento dos compósitos foi realizado por meio da extrusora dupla-rosca, com L/D=26, com velocidade de 200 r.p.m. e zonas de temperatura compreendidas entre 165 e 230 °C. O teor dos resíduos utilizado foi 10%, em massa, e cada compósito foi moldado por injeção em máquina *Battenfeld* a 230°C.

3.4.1 Comportamento Mecânico dos Compósitos

O ensaio de flexão em três pontos foi realizado segundo a norma ASTM D 790 e o ensaio de resistência ao impacto de acordo com a norma ASTM D 256.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análises Química e Mineralógica

Na Figura 2 estão apresentados os resultados da análise química dos resíduos, onde se pode verificar que o resíduo de granito apresenta altos teores de sílica, cerca de 60%, possivelmente associado às estruturas do quartzo e do feldspato, além de cerca de 20% de alumina, possivelmente associada, também, à estrutura do feldspato. O resíduo de pedra sabão apresenta altos teores de sílica (50%) e óxido de magnésio (20%), típicos da estrutura desse tipo de rocha. Os resíduos carbonáticos apresentam altos teores de óxido de cálcio, no entanto o calcário sedimentar apresenta mais de 50% desse elemento e o mármore apenas 30%, visto que o teor de óxido de magnésio corresponde a 20%.

Na Figura 3 estão apresentados os resultados da análise mineralógica que corroboram os resultados da análise química, uma vez que o resíduo de granito apresentou picos de quartzo e do feldspato albita, o resíduo de pedra sabão apresentou picos de talco, o resíduo de calcário sedimentar apresentou picos de calcita e o mármore apresentou picos de calcita e dolomita.

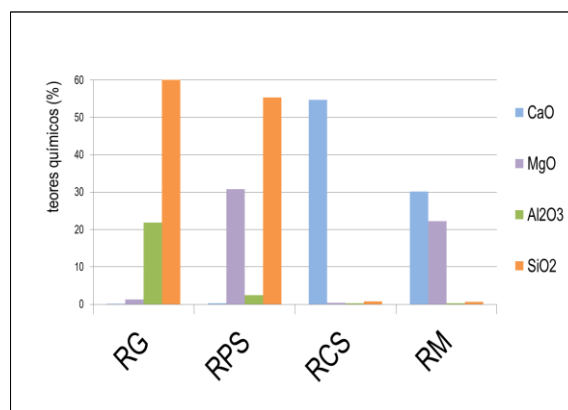


Figura 2: FRX dos resíduos.

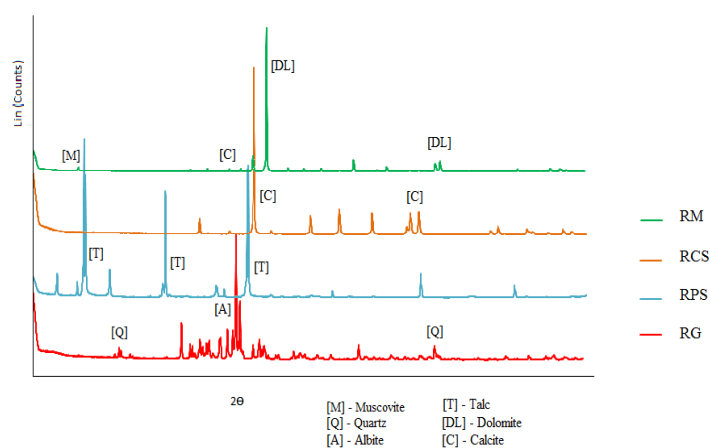


Figura 3: DRX dos resíduos.

4.2 Avaliação Mecânica dos Compósitos

A Figura 4 apresenta os resultados da resistência ao impacto dos compósitos onde se pode observar que o menor tamanho de partícula do resíduo (0,02 mm) favorece o aumento da resistência mecânica dos compósitos, independente do tipo de resíduo, visto que o aumento da área superficial propicia maior interação com o polipropileno, refletindo nos maiores valores de resistência ao impacto. Baseado nisso, as discussões serão baseadas nos compósitos onde o tamanho de partícula é 0,02 mm. Com isso, quando se compara os melhores desempenhos entre os compósitos, verifica-se que aqueles formados com resíduos de granito apresentaram maiores valores, em torno de 40 J.m, visto que a elevada concentração de sílica aumenta a dureza do compósito. O compósito contendo resíduo de mármore apresenta a segunda maior resistência ao impacto (33J.m), possivelmente pela presença de dolomita, que é um mineral que confere maior dureza ao compósito, se comparado à calcita, presente no compósito de calcário sedimentar, que apresentou um desempenho em torno de 30 J.m, assim como a pedra sabão, visto que o mineral talco não é responsável em conferir aumento de resistência mecânica.

Na Figura 5 apresentam-se os resultados de módulo de resistência à flexão dos compósitos, onde se observa que os compósitos formados por pedra sabão obtiveram os maiores valores (130 MPa), em função das características do mineral talco, que confere menor dureza e maior flexibilidade ao compósito. O mesmo ocorre com o compósito formado por calcário sedimentar, onde a baixa dureza da calcita confere maior resistência à flexão ao compósito (120 MPa). Em relação aos demais compósitos, RG e RM, observa-se uma diminuição da resistência à flexão, devido a presença de minerais quartzo e dolomita, que conferem maior dureza e menor flexibilidade ao compósito.

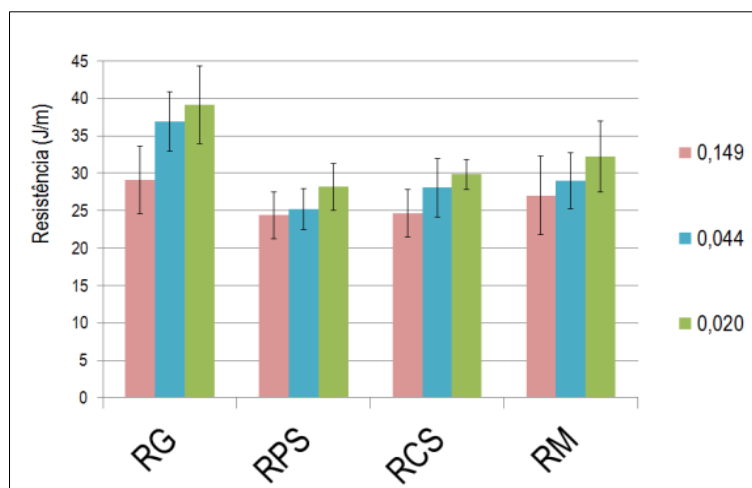


Figura 4: Resistência ao Impacto Izod.

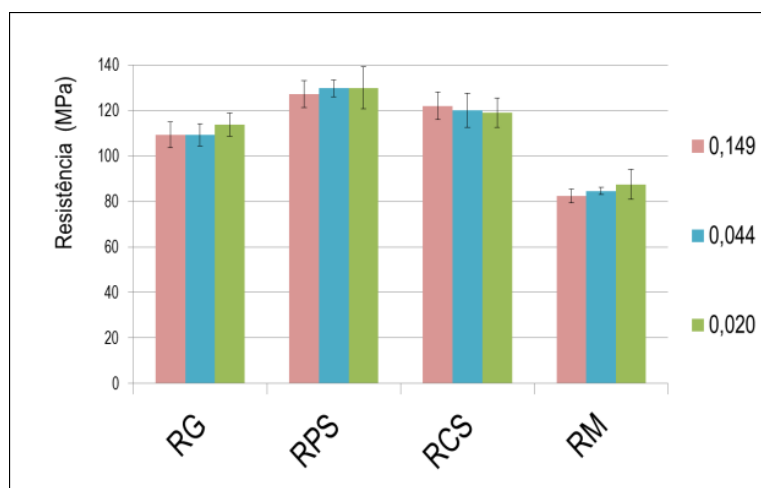


Figura 5: Módulo da resistência à flexão.

4.3 Avaliação da Interação Mineral/PP por Modelagem Molecular

Os resultados obtidos no processo de interação PP/Mineral estão apresentados na tabela 1, onde se pode observar que todos os sistemas apresentaram valores de energia potencial inferiores ao valor apresentado pelo PP isolado (19,78 J), indicando que a interação é favorável. Os menores valores obtidos foram na interação do PP com o feldspato (8,21 J) e com quartzo (10,44J) indicando melhores interações com esses minerais, possivelmente, devido às ligações intermoleculares do tipo pontes de hidrogênio, realizadas entre os hidrogênios do PP e os oxigênios desses minerais. No entanto, verifica-se que a presença do alumínio, elemento altamente polarizante, na estrutura do feldspato, contribui no fortalecimento da ligação com o PP. Tais ligações intermoleculares estão diretamente relacionadas com a maior resistência mecânica do compósito. Em relação à interação com os demais minerais com o PP, não se observa a geração preferencial de pontes de hidrogênio, mas sim de ligações dipolo-dipolo. A presença dos carbonatos, extremamente volumosos, dificultam essa interação, porém o magnésio, com menor raio, se comparado ao cálcio, apresenta papel importante na interação com PP. Os efeitos de penetração da blindagem molecular da estrutura da dolomita são mais favorecidos, pois os orbitais 3s do magnésio encontram-se com menor energia que os orbitais 4d do cálcio presente na calcita. No entanto, a sua complexação na estrutura do talco, impede qualquer tipo de ligação intermolecular nesse sítio de interação ou penetração de blindagem.

Tabela 1: Energia potencial dos sistemas PP/minerais.

Sistema	Energia Potencial (J)	Sistema	Energia Potencial (J)
PP/Quartzo	10,44	PP/Calcita	16,87
PP/ Feldspato	8,21	PP/Dolomita	13,94
PP/Talco	14,45		

Pôde-se concluir que cada mineral apresenta interação diferenciada com o PP e tal interação refletirá em suas propriedades mecânicas. Dessa forma, conhecendo-se previamente a composição mineralógica de um resíduo, pode-se utiliza-lo com mais precisão na formulação de um compósito.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro, ao CETEM e à Uerj, campus Zona Oeste pela infraestrutura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais, Informe 06/2025, São Paulo - SP, Brasil.

LIMA, A. B. T., Aplicações de Cargas Minerais em polímeros. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. 2007.

TRINDADE, T., ESTEVES, A. C. e TIMMONS, A. B. Nanocompósitos de matriz polimérica – Química Nova, V. 27, N° 5, 2004.