

Desenvolvimento de Compósito de Policarbonato e Resíduos de Rochas Ornamentais para Utilização como Armações de Óculos

Development of Polycarbonate and Ornamental Rock Waste Composite for Use as Eyeglass Frames

Marceli do Nascimento da Conceição

Bolsista PCI, Eng. De Materiais, D.Sc.

Roberto Carlos da Conceição Ribeiro

Supervisor, Eng. Químico, D. Sc.

Resumo

Iniciativas de reciclagem ou utilização de resíduo sólido desempenham um papel crucial na redução da carga ambiental, minimizando resíduos sólidos e promovendo a reutilização eficiente de recursos. A transferência de tecnologia entre Centros de Pesquisa e indústria é vital para implementar descobertas científicas, resultando não apenas em avanços científicos, mas também na melhoria dos processos industriais. Em relação aos materiais poliméricos, o policarbonato destaca-se por sua transparência, resistência ao impacto e estabilidade dimensional sendo aplicável em setores. A formulação de compósitos particulados de baixo custo oferece uma solução econômica, aprimorando propriedades mecânicas. Portanto, o presente estudo teve como objetivo a incorporação de resíduos do beneficiamento do Mármore Bege Bahia (BB), com tamanho inferior a 20 μm , na matriz do policarbonato, visando à caracterização das alterações proporcionadas pelas partículas minerais. O resíduo foi processado por meio de separação granulométrica e desaglomeração. Foram gerados compósitos contendo 0, 2, 5, 8 e 10 % em massa de BB, sendo realizados testes mecânicos de tração, flexão e sonelelastic, além de ensaios reológicos. Os resultados indicaram que a tensão e alongamento máximo permaneceram dentro da média em até 5% de partículas. Os módulos elásticos medidos por sonelastic e flexão apresentaram ligeiro aumento, ideal para objetos que serão flexionados durante o uso. Por fim, houve redução da viscosidade complexa, ideal para confecção de objetos com pequenos detalhes.

Palavras-chave: resíduo de rocha ornamental; rocha ornamental; policarbonato.

Abstract

Recycling initiatives or the utilization of solid waste play a pivotal role in mitigating environmental impact by diminishing solid waste and fostering the efficient reuse of resources. The technology transfer between academia and industry is indispensable for the implementation of scientific discoveries, yielding not only scientific advancements but also enhancements in industrial processes. Concerning polymeric materials, polycarbonate stands out for its transparency, impact resistance, and dimensional stability, rendering it applicable across various sectors. The formulation of low-cost particulate composites provides an economical solution, refining mechanical properties. Thus, the current study aimed to incorporate fine mineral waste, with a size below 20 micrometers, into the polycarbonate matrix, with the objective of characterizing the alterations induced by the particles.

Particles derived from the cutting process of Beige Bahia marble slabs underwent solely particle size separation and deagglomeration. Following the formulation of distinct compositions (0, 2, 5, 8, and 10% of BB), mechanical tests (tensile, flexural, sonelastic) and rheological tests were conducted. The stress and maximum elongation remained within average values for up to 5% of particles. The elastic moduli measured by sonelastic and flexural tests exhibited a slight increase, ideal for objects subjected to flexion during usage. Lastly, there was a reduction in complex viscosity, ideal for the fabrication of objects with intricate details.

Keywords: dimension stone waste, ornamental rock, polycarbonate.

1. Introdução

O desenvolvimento de iniciativas destinadas à reciclagem vem sendo uma questão de responsabilidade das recentes pesquisas, dada a urgência em abordar resíduos e promover práticas sustentáveis. Tais esforços desempenham papel crucial na atenuação da carga ambiental, mediante a minimização da geração de resíduos sólidos e a promoção da reutilização de recursos. Após o desenvolvimento e otimização sobre o uso de resíduos sólidos a próxima etapa seria a implementação pela indústria e então comercialização dos produtos gerados. Assim, a transferência de tecnologia proveniente de pesquisas desempenha um papel crucial na integração entre o ambiente de pesquisa e a indústria, propiciando a implementação prática de descobertas científicas. Os resultados do trabalho realizado manifestam-se não apenas em avanços científicos, mas também na melhoria dos processos industriais e na promoção do desenvolvimento econômico sustentável.

O policarbonato (PC) é um polímero termoplástico valorizado por sua transparência, resistência ao impacto e estabilidade dimensional mesmo em temperaturas elevadas sem deformação significativa, sendo crucial em ambientes adversos. Destaca-se como material polimérico versátil em diversos setores industriais. Composto por unidades de carbonato combina rigidez e flexibilidade, sendo amplamente utilizado em eletrônicos ou em dispositivos médicos, ou seja, peças pequenas que se deseja manter um nível de detalhamento. Já a boa resistência ao impacto e estabilidade dimensional, tornando-o uma escolha na fabricação de objetos que se deseja preservar pequenos detalhes (GOHIL E JOSHI, 2022; MU et al. 2022).

Na indústria os aspectos visuais são um dos principais pilares na comercialização de produtos. Outro aspecto importante está na própria fabricação dos produtos e gastos envolvidos. Sendo o policarbonato um polímero de engenharia, sua processabilidade será mais difícil devido às características inerentes das macromoléculas. Dessa forma, um dos modos utilizados para a modificação da matriz polimérica ocorre pela formulação de materiais compósitos particulados. Estes oferecem vantagens combinando propriedades mecânicas superiores com custo acessível. A abordagem econômica viabiliza adoção em larga escala, destacando-se como solução eficaz e viável economicamente em diversas aplicações industriais.

O Brasil representa um dos principais fornecedores de rocha ornamental no âmbito mundial e, segundo a ABIROCHAS (2023) houve ainda um aumento significativo na exportação nos últimos anos. De outra forma, os resíduos gerados durante o beneficiamento decorrem em uma problemática que deve ser minimizada pela

comunidade científica (RIBEIRO E CONCEIÇÃO, 2011, RIBEIRO et al 2015 e RIBEIRO et al., 2023). Os resíduos gerados no beneficiamento das rochas ornamentais são oriundos das principais rochas como: mármore, calcários, ardósias, granitos, dentre outras pedras. Pedregulhos, fragmentos ou pó, representam uma questão relevante com implicações ambientais devido ao volume de gerado e por não apresentarem valor comercial são classificados como resíduo, que totalizam cerca de 80% do processo. Dessa forma, há necessidade de abordagens inovadoras e sustentáveis para lidar com o resíduo de rocha ornamental no cenário brasileiro, destacando a importância de estratégias eficazes para mitigar seus impactos ambientais e promover a gestão sustentável desses materiais.

2. Objetivos

O objetivo do presente trabalho foi aplicar os resíduos de rocha na matriz do PC atendendo a solicitação de uma empresa de produção de armações de óculos que indicou interesse na transferência de propriedade da PI221109118311. Foi realizada a incorporação do resíduo de rocha do Mármore Bege Bahia, com tamanho de partícula inferior a 20 μm , na matriz de policarbonato e então se verificou as modificações mecânicas que são proporcionadas pelas partículas minerais na matriz polimérica.

3. Material e Métodos

O PC foi fornecido pela empresa na qual está sendo realizada a transferência da tecnologia. O resíduo mineral é oriundo do beneficiamento Mármore Bege Bahia da região de Ourolândia na Bahia, que devido à sua granulometria ultrafina, foi apenas peneirado a úmido. Após o peneiramento as partículas, foram secas e desaglomeradas de modo que pelo menos 70% apresentassem tamanho de partícula de 20 μm . A uniformização do compósito foi conduzida utilizando o equipamento de mistura interna Haake Rheomix OS, fabricado pela empresa ThermoFisher, equipado com um reômetro de torque acoplado e um rotor tipo roller, operando a uma temperatura de 250 °C por cerca de 10 minutos. Inicialmente, o PC foi introduzido na câmara de mistura, seguido pela adição do resíduo de rocha após 3 minutos. Realizou-se um total de 5 misturas, com percentual mássico variando em 0, 2, 5, 8 e 10% em peso, denominadas PC00, PC02, PC05, PC08 e PC10, respectivamente. Simultaneamente, a reometria de torque foi executada para avaliar a processabilidade da mistura, monitorando o valor do torque do rotor durante o processo de homogeneização para análise do custo de produção. Repetiu-se o procedimento utilizando-se resíduos de ardósia e mármore a pedido da empresa.

Para produção dos corpos de prova, os mesmos foram secos e prensados em prensa Marconi, modelo MA 098/A400, a uma temperatura de 240 °C por 15 minutos. A etapa de resfriamento foi conduzida utilizando uma prensa hidráulica em temperatura ambiente por 10 minutos. Ao término do processo, foram obtidas placas com dimensões com 2 mm de espessura, as quais foram posteriormente cortadas em corpos de prova para os ensaios mecânicos e termográficos.

O teste de tração foi realizado na máquina EMIC modelo DL-3000, equipada com uma célula de carga de 100 kgf ou 1000 N, em corpos de prova com dimensões de 1,5 por 6,5 cm. A análise de flexão foi realizada em três

pontos de referência na máquina EMIC, empregando uma célula de carga de 100 kgf ou 1000 N. As amostras, caracterizadas por uma espessura média de 2 mm, uma largura média de 14 mm e um comprimento médio de 50 mm. Os ensaios mecânicos não destrutivos incluíram a determinação do módulo elástico por meio do teste de impulso de vibração longitudinal, utilizando o equipamento Sonelastic ® Stand Alone, conforme a norma ASTM E1876-22.

Quanto ao teste de reologia, foi executado utilizando um reômetro da marca Anton Paar, com um tempo de análise aproximado de 30 minutos a uma temperatura de 240 °C, empregando corpos de prova com dimensões de 2 por 2 cm.

4. Resultados e Discussão

Os resultados do ensaio mecânico estão representados de forma gráfica na Figura 1, tanto para a tensão na força máxima quanto para o alongamento na força máxima de ruptura (Figuras 1A e 1B, respectivamente). Verifica-se que a incorporação de 5% em massa de resíduo mineral não foi capaz de alterar significativamente as propriedades de tensão máxima e alongamento na força máxima e este padrão de comportamento é de interesse, uma vez que as partículas adicionadas conferem um aumento no módulo de rigidez e as características de alongamento foram preservadas, indicando uma resposta mecânica viável nessas condições.

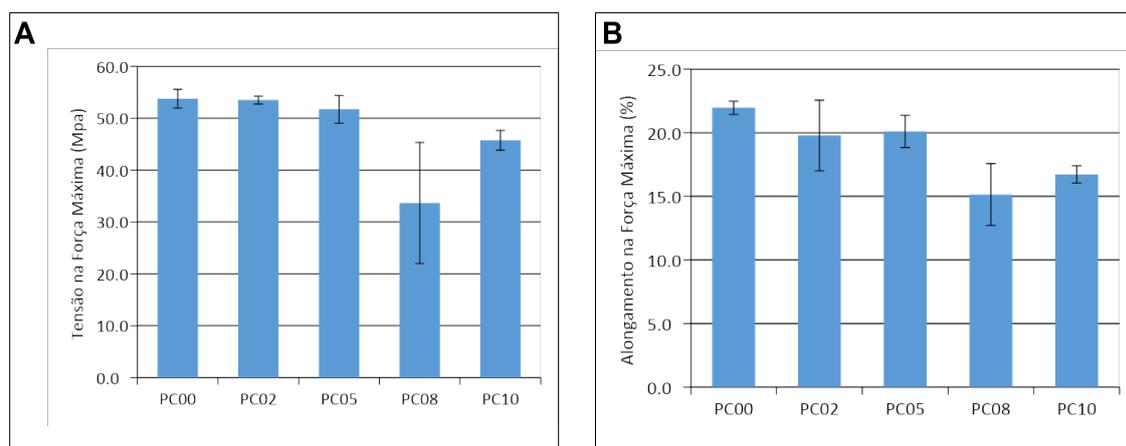


Figura 1. Tensão na força máxima (A) e alongamento na força máxima (B).

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados obtidos por meio da análise não destrutiva do módulo elástico no modo de flexão onde se observa uma correlação direta entre o incremento na concentração de resíduo mineral na matriz polimérica e o correspondente aumento nos valores do módulo elástico. Esse fenômeno indica que a introdução progressiva do resíduo mineral está associada a uma elevação na rigidez do compósito, contribuindo, por conseguinte, para uma maior resistência ao risco.

Tabela 1. Módulo elástico por análise não destrutiva.

Amostra	PC00	PC02	PC05	PC08	PC10
E(Mpa)	2,20 ± 0,11	2,20 ± 0,12	2,50 ± 0,07	2,61 ± 0,08	2,69 ± 0,09

Os resultados do ensaio de flexão de três pontos estão apresentados na Figura 2 onde está disposto o módulo elástico oriundo do ensaio de flexão (E_b). Os resultados permanecendo dentro da faixa média, com uma ligeira elevação na média das composições ensaiadas com o aumento mássico de partículas. Este padrão de comportamento é de particular importância, especialmente quando se considera a aplicação prática das peças que serão submetidas a tensão de flexão durante seu uso. Dado que um dos focos da presente investigação reside na transferência de tecnologia advinda da patente PI221109118311 para a indústria de fabricação de armação de óculos, torna-se imperativo que as hastes do compósito apresentem boas propriedades em termos de resistência à flexão.

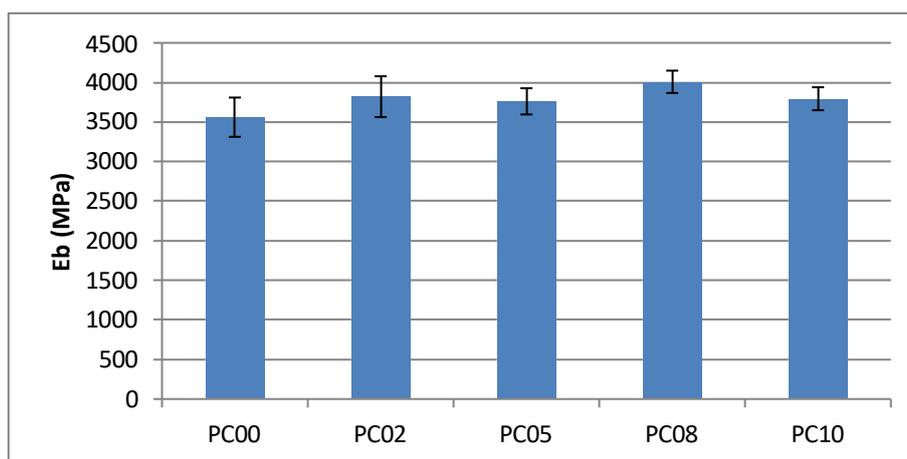


Figura 2. Ensaio de flexão em 3 pontos nas composições de PC00 a PC10.

As Figuras 3A-E apresentam os resultados de MEV das composições com 0, 2, 5, 8 e 10%, respectivamente, onde não se observaram que não há diferenças significativas entre as amostras compostas, indicando uma homogeneidade notável nas características morfológicas examinadas. As superfícies fraturadas exibiram um padrão de fratura típico de materiais rígidos, sugerindo uma resposta coesa do compósito em termos de integridade estrutural. Observou-se uma dispersão eficaz das partículas na matriz polimérica, o que pode ser atribuído à natureza química do policarbonato e das partículas carbonatadas.

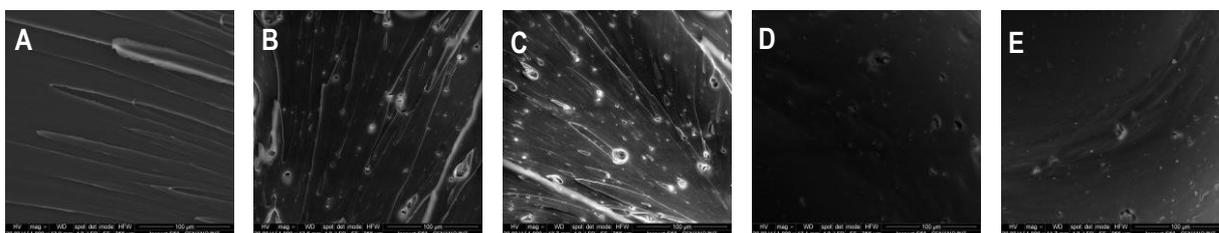


Figura 3. (a) MEV após fratura das amostras com 0% de carga, (b) 2% de carga, (c) 5% de carga, (d) 8% de carga e (e) 10% de carga mineral.

Na Figura 4 estão apresentados os resultados da viscosidade complexa tanto para o policarbonato (PC) puro quanto para os compósitos. Inicialmente ocorre um platô Newtoniano sem variação da viscosidade em diferentes taxas de cisalhamento. A amostra de PC apresentou na ordem de 2000 Pa.s, com 2 e 5% de BB foi na ordem de 1000 Pa.s-1 no platô newtoniano. Já as amostras com 8 e 10% esse valor foi na ordem de 200 Pa.s. A redução

da viscosidade mesmo em condições de baixas taxas de cisalhamento indica maior facilidade de preenchimento do molde de injeção (BARCZEWSKI E MYSIUKIEWICZ, 2018).

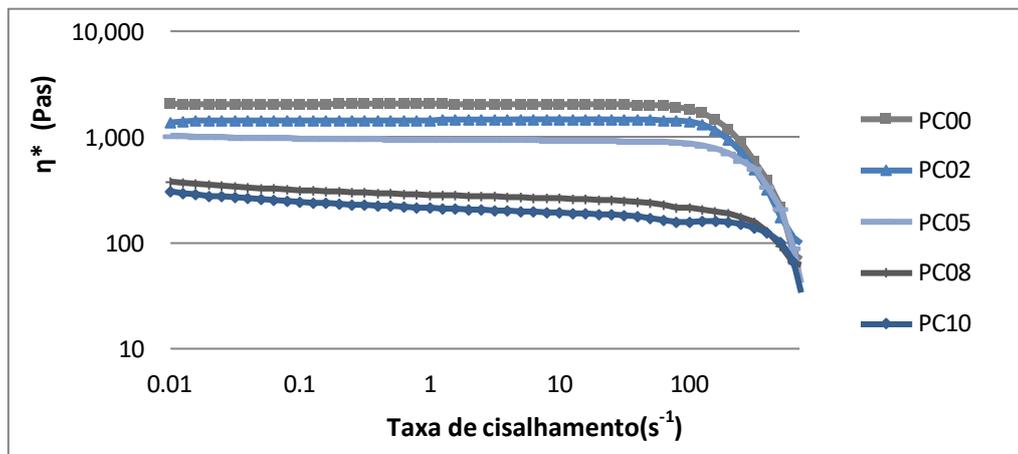


Figura 4. Viscosidade complexa das composições PC00 a PC10.

Na Figura 5-A, é possível visualizar a imagem da armação de óculos fabricada pela empresa utilizando o resíduo Bege Bahia. Nota-se que o produto exibe uma tonalidade que guarda semelhança com a do pó da rocha correspondente. A congruência na coloração sugere a ausência de oxidação do resíduo ao longo das fases de processamento, incluindo a extrusão, a fabricação dos *pellets* e a etapa de moldagem por injeção, destinada a conferir forma ao objeto de interesse. Já na Figura 5-B se observa as novas formulações geradas com diferentes resíduos para a realização de novos testes pela empresa.



Figura 5. Armação de óculos com resíduo BB (A) e novas composições produzidas com diferentes resíduos minerais para novos produtos (B).

5. Conclusão

Os resultados indicam que a adição de até 5% em massa de resíduo do Mármore bege Bahia na matriz do PC não impacta significativamente suas propriedades mecânicas. Porém, foi observado ligeiro aumento no módulo de flexão, uma característica muito importante para o produto final, mantendo a viabilidade técnica. A análise por MEV revela homogeneidade morfológica e superfícies fraturadas típicas de materiais rígidos e contribui para a compreensão da viabilidade técnica da incorporação de resíduos minerais na fabricação de compósitos de polycarbonato com resíduo mineral. A redução dos valores da viscosidade complexa de 2000 para 200 Pa.s

indicam menos custos energéticos durante o processamento da massa polimérica e mais facilidade de preenchimento de moldes de cavidades pequenas. O estudo destaca a importância das iniciativas de reciclagem e reutilização de resíduos sólidos na redução do impacto ambiental, enfatizando a transferência de tecnologia como um catalisador para avanços científicos e desenvolvimento econômico sustentável.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Núcleo de Inovação Tecnológica do CETEM, na pessoa da Dra. Monica Monerat pelos esforços nessa transferência de tecnologia, ao técnico Cleverson Fernandes do INT pelo apoio técnico. Ao Instituto Nacional de Tecnologia e à UERJ pela infraestrutura e ao CNPq pelo apoio financeiro.

7. Referências Bibliográficas

ABIROCHAS (2023) Balanço das exportações e importações de rochas janeiro a maio de 2023.

BARCZEWSKI, M. e MYSIUKIEWICZ, O. (2018) Rheological and Processing Properties of Poly(lactic acid) Composites Filled with Ground Chestnut Shell. *Polymer(Korea)*, vol. 42, no. 2, pp. 267-274. doi.org/10.7317/pk.2018.42.2.267.

GOHIL, M., JOSHI, G. (2022). "Perspective of polycarbonate composites and blends properties, applications, and future development: A review." In Altalhi, T., Inamuddin (Eds.), *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science* (pp. 393-424). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-323-99643-3.00012-7.

MU, X., JIN, Z., CHU, F., CAI, W., ZHU, Y., YU, B., SONG, L., & HU, Y. (2022). High-performance flame-retardant polycarbonate composites: Mechanisms investigation and fire-safety evaluation systems establishment. *Composites Part B: Engineering*, 238, 109873. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109873>.

RIBEIRO, R. C. C., OLIVEIRA, M. G. E VELOSO, F., (2015) Processo de formação de armações de óculos utilizando resíduos de pedra sabão e polipropileno, PI221109118311, INPI.

RIBEIRO, R. C. C., CONCEIÇÃO, M. N., BASTOS, D. C. E BASTOS, M. M.T., (2023) Processo para geração de cápsulas de café biodegradáveis contendo resíduos de rochas ornamentais como fontes de fertilizantes de solos, BR 10 2023 011665 5 INPI.

RIBEIRO, R. C. C., OLIVEIRA, M. G., ARRUDA, C. M. R, CARRISO, R. C. C E RIBEIRO, L., (2011) Processo de formação de compósitos poliméricos utilizando como carga resíduos gerados na lavra e no beneficiamento de mármore e calcários ornamentais, Patente depositada 221109118311, INPI.