RECICLAGEM MECÂNICA DE COMPÓSITOS PLÁSTICOS MATRIZ PVC E FIBRA POLIÉSTER: AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES E POTENCIAL DE REUTILIZAÇÃO

MECHANICAL RECYCLING OF PVC MATRIX AND POLYESTER FIBER PLASTIC COMPOSITES: EVALUATION OF PROPERTIES AND REUSE POTENTIAL

José Afonso Correia Junior, Fabiano Caio José

Faculdade de Tecnologia SENAI Mario Amato, Curso Tecnólogo em Polímeros
E-mail para contato: fabiano.jose@sp.senai.br

RESUMO – A crescente demanda por soluções sustentáveis impulsiona a reciclagem de compósitos. Este estudo avaliou a viabilidade da reciclagem mecânica de resíduos de PVC/poliéster, visando desenvolver formulações com resíduo pós-consumo e pós-industrial. O objetivo foi analisar o impacto da reciclagem nas propriedades mecânicas. A metodologia envolveu moagem, formulação e produção de corpos de prova (injeção/calandragem). Testes de tração, compressão, dureza e densidade foram realizados. Teores intermediários de compósito reciclado (20-30 PCR) otimizaram resistência e equilíbrio estrutural. A reciclagem mecânica se mostrou viável, mantendo propriedades aceitáveis, com potencial para aplicações diversas. Estudos futuros devem otimizar a interação matriz-fibra.

Palavras-chave: Reciclagem, Compósitos, PVC, Poliéster, Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT – The growing demand for sustainable solutions drives the recycling of composites. This study evaluated the feasibility of mechanical recycling of PVC/polyester waste, aiming to develop formulations with post-consumer and post-industrial waste. The objective was to analyze the impact of recycling on mechanical properties. The methodology involved grinding, formulation and production of test specimens (injection/calendering). Tensile, compression, hardness and density tests were performed. Intermediate contents of recycled composite (20-30 PCR) optimized strength and structural balance. Mechanical recycling proved to be viable, maintaining acceptable properties, with potential for diverse applications. Future studies should optimize the matrix-fiber interaction.

Keywords: Recycling, Composites, PVC, Polyester, Mechanical Properties.

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação ambiental e a busca por alternativas sustentáveis têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem para diversos materiais, com destaque para os polímeros (Shiino; Rezende, 2020). A vasta gama de aplicações dos polímeros, desde embalagens até componentes estruturais, torna a gestão de seus resíduos um desafio crucial para a sustentabilidade. Dentre estes, os materiais compósitos de matriz polimérica, como os formados por Policloreto de Vinila (PVC) e fibra de poliéster, apresentam um desafio particular devido à complexidade de sua composição e à dificuldade de separação de seus componentes (Moura; Morais; Magalhães, 2010).

Apesar dos avanços em tecnologias de reciclagem de PVC (Rodolfo JR.; Tsukamoto, 2024), impulsionados por regulamentações e pela crescente demanda por materiais reciclados (ABIPLAST, 2024), a reciclagem de compósitos PVC/poliéster ainda é limitada, conforme observado por Piva, Bahiense Neto e Wiebeck (1999) a adoção de tecnologias de reciclagem no ainda enfrenta desafios significativos. A falta de processos eficientes para separar a fibra do PVC, a presença de aditivos e a dificuldade em garantir a qualidade do material reciclado geram acúmulo em aterros e perda de recursos valiosos (Silva; Mendes, 2021). As pesquisas mais recentes apontam para a necessidade de desenvolver tecnologias economicamente viáveis e que garantam a manutenção das propriedades do material reciclado, abrindo novas oportunidades para o reaproveitamento destes materiais (Vinylplus®, 2024).

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade da reciclagem mecânica (Spinacé; De Paoli, 2005), de resíduos de compósitos PVC/poliéster, desenvolvendo formulações com diferentes teores de material reciclado (pós-consumo e pós-industrial) e analisando o impacto nas propriedades mecânicas (tração, compressão, dureza, densidade) do produto final. A pesquisa visa promover a reutilização destes resíduos, reduzir o impacto ambiental e contribuir para o desenvolvimento de soluções sustentáveis para a indústria de polímeros.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa experimental, buscando avaliar a viabilidade da reciclagem mecânica de resíduos de compósitos de PVC e fibra de poliéster. A metodologia abrangeu as seguintes etapas:

2.1 Materiais:

- Resíduo de compósito matriz PVC e fibra poliéster pós consumo (PCR): Obtido como doação da Cooperativa Plastcooper, proveniente de resíduos pós-consumo.
- Resíduo de PVC pós industrial (PIR): Obtido como doação da Cooperativa Plastcooper, proveniente de resíduos pós-industriais.

2.2 Preparação dos Materiais:

2.2.1 Moagem: O resíduo de compósito PCR foi moído em moinho de facas Primotecnica P2-001, equipado com peneira de 9,5 mm, até obtenção de partículas menores. O resíduo PIR já foi recebido moído.

2.2.2 Formulações: Foram preparadas 7 formulações, variando a proporção de resíduo PVC PIR e resíduo Compósito PCR (em massa PCR partes por cem partes de resina): 100/0, 100/10, 100/20, 100/30, 100/40, 100/50 e 0/100 (última formulação resíduo compósito PCR puro).

2.2.3 Mistura: Os componentes de cada formulação foram homogeneizados em um misturador Mecanoplast M-175-VAR, com rotação de 600 a 1300 RPM, seguido de resfriamento em resfriador Mecanoplast RH-350 (130 RPM).

2.2.4 Granulação: As misturas foram granuladas em uma extrusora monorosca Miotto GRAN 90:25 (L/D 25,2), com perfil de temperatura de 155°C a 180°C, seguida de resfriamento em banho de água e corte em granulador Sagec SG 210.

2.3 Obtenção dos Corpos de Prova:

2.3.1 Injeção: Corpos de prova para os ensaios de dureza e compressão foram moldados por injeção em injetora Semeraro, utilizando um molde de múltiplas cavidades. Os parâmetros de injeção foram otimizados para garantir a uniformidade das amostras.

2.3.2 Calandragem: Mantas para os ensaios de tração e rasgo foram obtidas por calandragem em calandra de laboratório com cilindros aquecidos a 150°C e rotação de 30 RPM (cilindro dianteiro) e 20 RPM (cilindro traseiro). Corpos de prova foram cortados das mantas calandradas utilizando facas de estampo seguindo as normas ASTM D412 e ASTM D624.

2.4 Caracterização:

2.4.1 Dureza Shore A: Realizada em durômetro Bareiss BS 61 II, seguindo a norma ASTM D2240.

2.4.2 Densidade: Determinada por meio de balança analítica, seguindo a norma ASTM D792.

2.4.3 Resistência à Tração: Realizada em máquina de ensaio universal Kratos TRCv61300-USB, seguindo a norma ASTM D412 DIE, com velocidade de 500 mm/min.

2.4.4 Resistência ao Rasgo: Realizada em máquina de ensaio universal Kratos TRCv61300-USB, seguindo a norma ASTM D624, com velocidade de 500 mm/min.

2.4.5 Resistência à Compressão: Realizada em máquina de ensaio universal Kratos TRCv61300-USB, seguindo a norma ASTM D695, com velocidade de 1,3 mm/min.

A escolha dos métodos de ensaio e equipamentos foi baseada nas normas técnicas aplicáveis e na disponibilidade de recursos. A metodologia adotada visa fornecer dados robustos e comparáveis para avaliar o impacto da reciclagem nas propriedades dos compósitos PVC/poliéster.

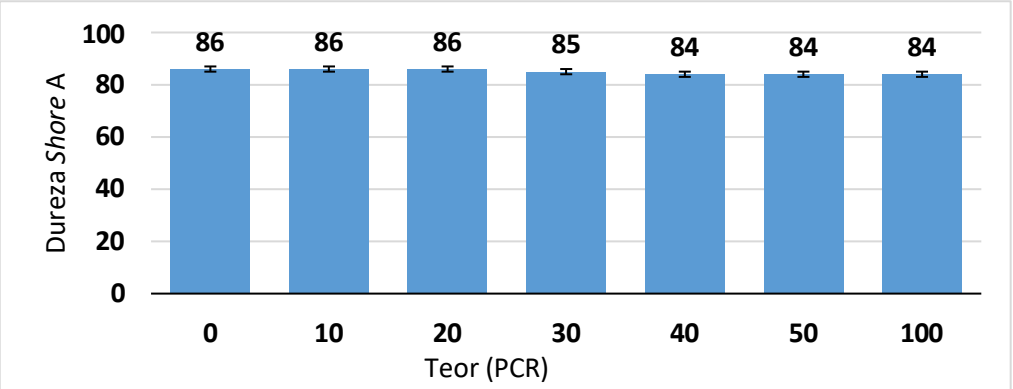
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização revelaram o impacto da reciclagem mecânica e da variação na proporção de resíduo de compósito (PCR) nas propriedades dos materiais.

3.1 Dureza Shore A:

Os valores de dureza Shore A apresentaram pouca variação entre as formulações, oscilando entre 84 e 86, resultados apresentados no Gráfico 1.

Gráfico 1: Dureza Shore A.

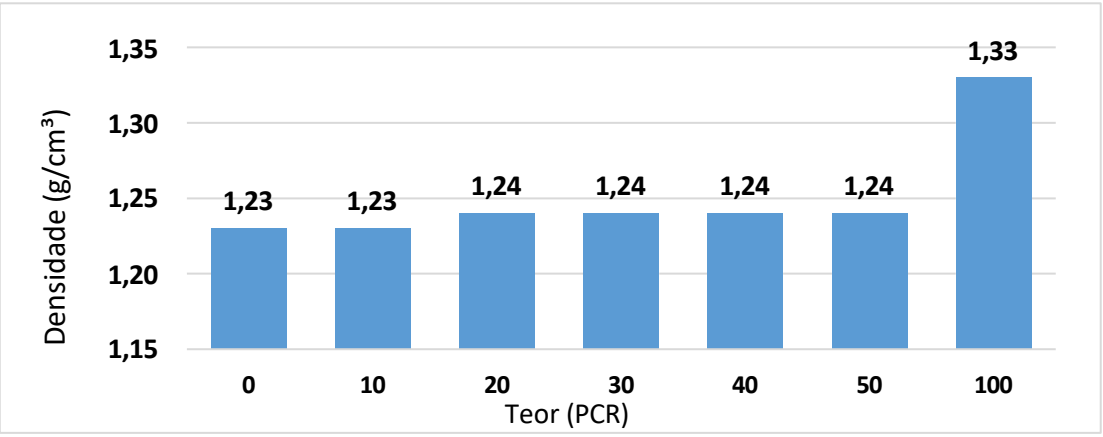


A adição de PCR não alterou significativamente a resistência à penetração, indicando que o processo de reciclagem não compromete a estrutura do PVC a ponto de influenciar a dureza. Este resultado sugere que a plastificação do PVC foi mantida, conforme discutido por Rodolfo JR.; Nunes; Ormanji (2006).

3.2 Densidade:

A densidade aumentou gradualmente com a adição de PCR, variando de 1,23 g/cm³ (0 PCR) a 1,24 g/cm³ (20-50 PCR) e atingindo 1,33 g/cm³ (100 PCR), resultados vistos no a Gráfico 2.

Gráfico 2: Resultados das densidades das formulações.



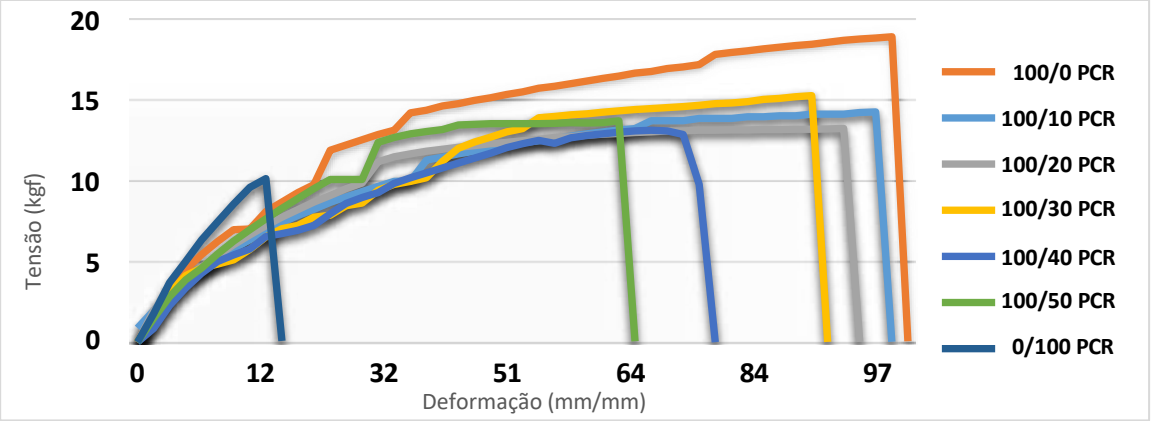
Este aumento reflete a maior densidade da fibra de poliéster presente no resíduo de compósito, corroborando a teoria da ASTM (2024) sobre a relação entre densidade e composição. Segundo Canevarolo JR. (2006), a história termomecânica de materiais amorfos,

como o PVC, pode ser inferida pela densidade. Dessa forma, observa-se que as misturas e os processos de reciclagem realizados não comprometeram a qualidade do compósito de PVC com fibra de poliéster. As formulações não resultaram em diminuição da densidade, indicando que não houve perda de plastificantes, o que é desejável, já que tal perda poderia afetar negativamente as propriedades mecânicas da matriz de PVC e características físicas, como o aumento indesejado da dureza conforme Rodolfo JR.; Nunes; Ormanji (2006).

3.3 Resistência à Tração:

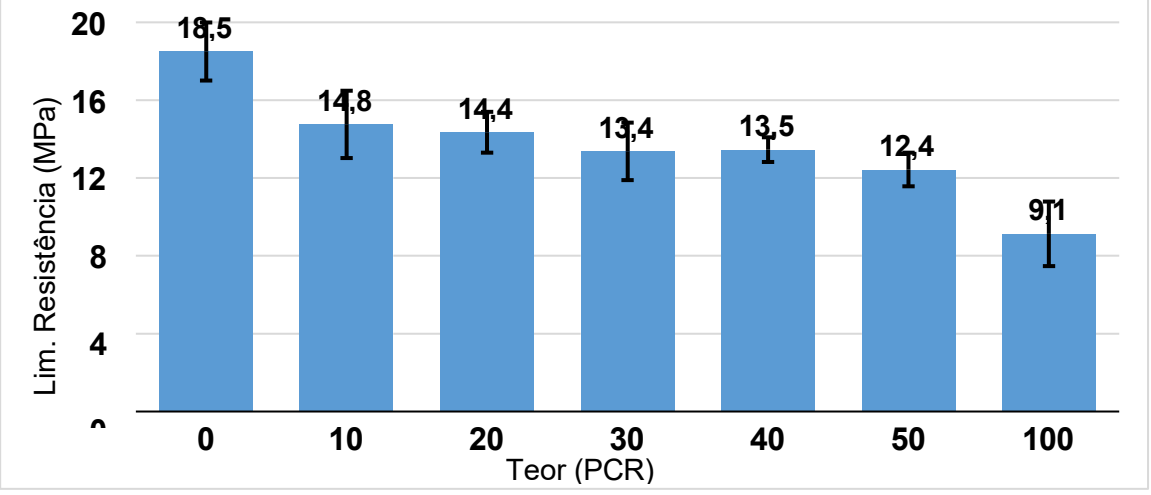
A resistência à tração apresentou uma tendência de diminuição com o aumento do teor de PCR, conforme apresentado no Gráfico 3.

Gráfico 3:Curvas de Tensão e Deformação.



A formulação com 30 de PCR exibiu o melhor desempenho (15,2 kgf), enquanto a formulação com 100 de PCR apresentou o menor valor (10,0 kgf). Este comportamento sugere que a adição de PCR, em proporções adequadas, pode melhorar a interação matriz-fibra, aumentando a resistência.

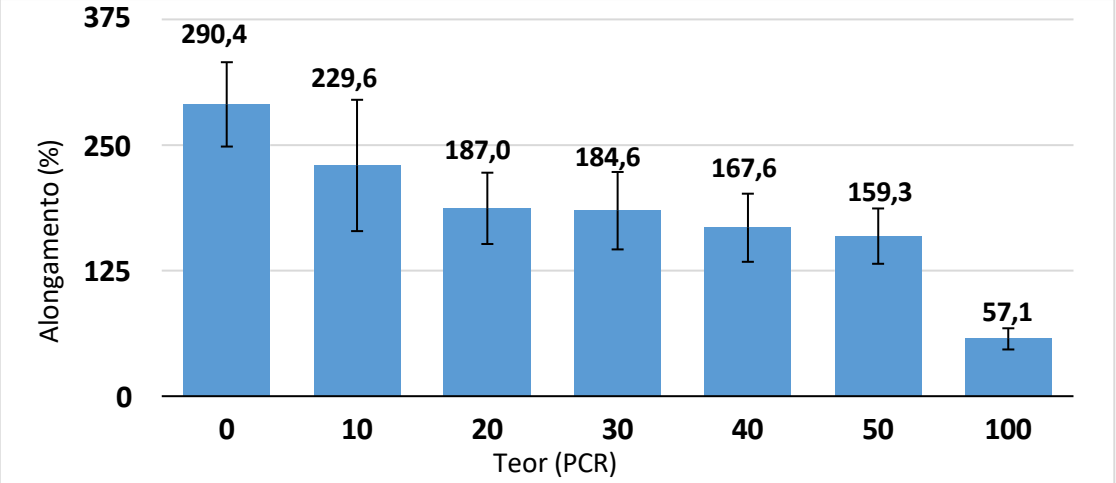
Gráfico 4:Limite de resistência em função dos teores.



No entanto, teores elevados de PCR podem levar à saturação da matriz, prejudicando a distribuição de tensões e reduzindo a resistência, conforme discutido por Rabello (2000). O limite de resistência à tração seguiu uma tendência semelhante, diminuindo gradativamente com o aumento de PCR vide apresentado no Gráfico 4. O PVC PIR puro obteve o maior valor (18,5 MPa), enquanto a formulação 0/100 PCR atingiu apenas 9,1 MPa. Essa redução é atribuída à diminuição da interação matriz-fibra e à maior concentração de fibras curtas que, em excesso, comprometem a transferência eficiente de carga.

O alongamento na ruptura diminuiu com o aumento do teor de PCR conforme apresentado no Gráfico 5.

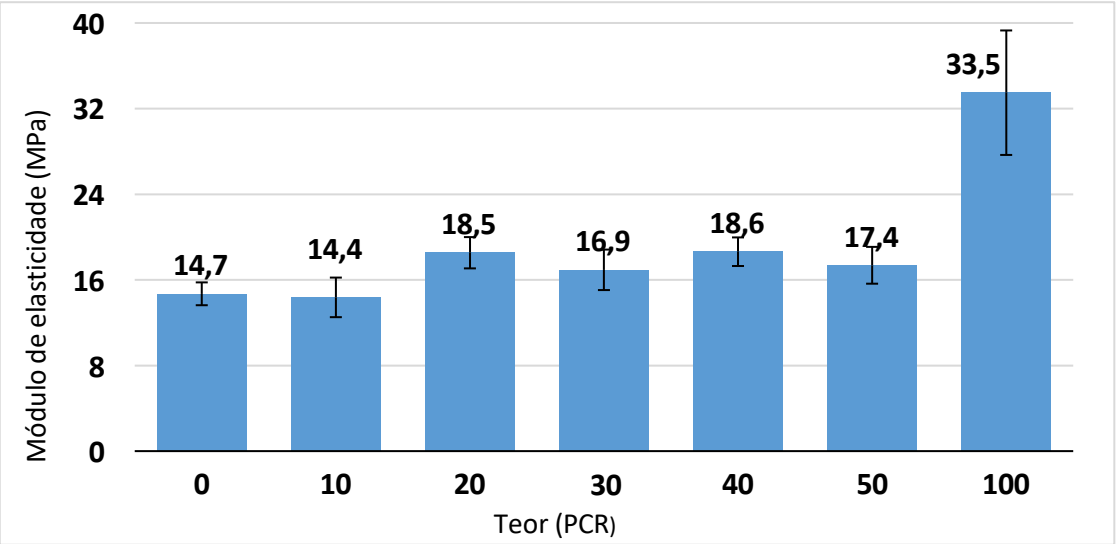
Gráfico 5: Resultados alongamento e função do aumento dos teores.



O PVC PIR puro alcançou o maior valor de alongamento (290,4%), enquanto o 0/100 PCR teve apenas 57,1%. Isso evidenciou que conforme Rabello (2000) fala a respeito da sua presença de fibras que limita a deformação da matriz, os menores valores de capacidade de deformação foram dos materiais com altos teores de fibra, devido à natureza mais rígida da fibra de poliéster.

O módulo de elasticidade aumentou com o aumento do teor de PCR conforme apresentado no Gráfico 6, resultados indicam maior rigidez do material.

Gráfico 6: Módulo de elasticidade.

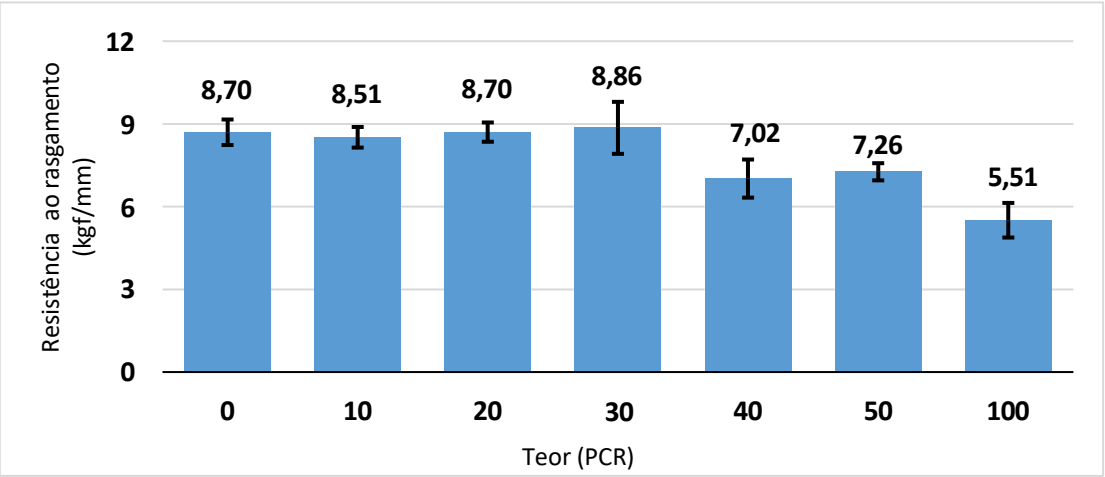


O PVC PIR puro apresentou 14,7 MPa, enquanto o 0/100 PCR atingiu 33,5 MPa.

3.4 Resistência ao Rasgo:

A resistência ao rasgo apresentou uma tendência de aumento para as formulações de 10 a 30 PCR, com a formulação com 30 PCR exibindo o maior valor (8,86 kg/mm), conforme mostra Gráfico 7.

Gráfico 7: Resistência ao rasgo.

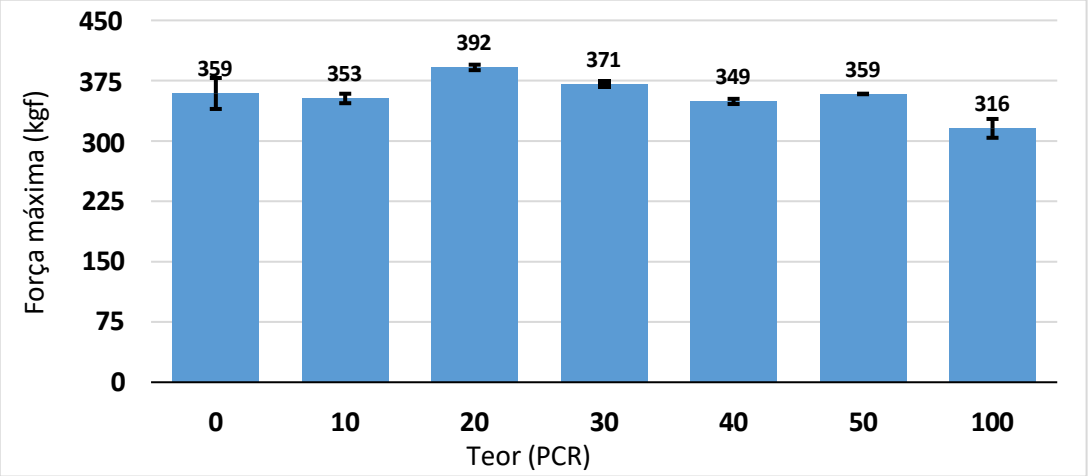


A partir de 40 PCR, houve uma redução na resistência ao rasgo, indicando que a saturação da matriz com fibras pode dificultar a propagação do rasgo.

3.5 Resistência à Compressão:

As formulações com 20 e 30 PCR apresentaram os maiores valores de resistência à compressão (392 kgf e 371 kgf, respectivamente), indicando que teores intermediários de PCR otimizam a resistência à compressão conforme aprestado no Gráfico 8.

Gráfico 8: Força máxima a compressão.



A formulação com 100 PCR apresentou o menor valor (316 kgf), sugerindo que a alta concentração de fibras pode comprometer a capacidade de suportar cargas compressivas.

Os resultados obtidos demonstram que a reciclagem mecânica de compósitos PVC/poliéster é viável, mas a proporção de resíduo reciclado deve ser cuidadosamente controlada para otimizar as propriedades mecânicas. Teores intermediários de PCR (20-30) parecem oferecer um bom equilíbrio entre resistência, rigidez e capacidade de deformação. A adição excessiva de PCR pode levar à saturação da matriz, prejudicando a interação matriz-fibra e comprometendo o desempenho do material.

Esses achados estão em consonância com a literatura, que destaca a importância da interface matriz-fibra para o desempenho de compósitos (Callister; Rethwisch, 2018). A otimização da interação entre os componentes é crucial para garantir a transferência de tensões e a resistência do material.

Apesar das limitações da reciclagem mecânica, como a dificuldade em separar completamente os componentes e a potencial degradação das propriedades do material, este estudo demonstra que é possível obter compósitos reciclados com desempenho aceitável para diversas aplicações. A reciclagem mecânica se apresenta como uma alternativa promissora para reduzir o impacto ambiental dos compósitos PVC/poliéster e promover a economia circular.

4 CONCLUSÃO

Em conclusão, este estudo demonstrou a viabilidade da reciclagem mecânica de compósitos PVC/fibra de poliéster, com teores intermediários de resíduo reciclado (20-30) otimizando as propriedades mecânicas. A reciclagem mecânica se apresentou como uma alternativa promissora para a gestão de resíduos e a promoção da economia circular, mantendo um equilíbrio entre desempenho e sustentabilidade. Agradecemos aos professores do curso técnico do SENAI Mario Amato e dos professores da Faculdade de Tecnologia SENAI Mario Amato pelo apoio e orientação, na pessoa do coordenador técnico, senhor Fabiano Caio José. Trabalhos futuros devem explorar a otimização da interação matriz-fibra, a adição de aditivos compatibilizantes e a avaliação do desempenho em aplicações específicas, visando maximizar o potencial de reutilização destes materiais.

5 REFERÊNCIAS

ABIPLAST. PERFIL 2023 - Associação Brasileira da Indústria do Plástico. Disponível em: https://www.abiplast.org.br/. Acesso em: 8 nov. 2024.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D2240 - Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness. Disponível em: https://www.astm.org/standards/d2240. Acesso em: 13 nov. 2024.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D412 - Standard Test Method for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension. Disponível em: https://www.astm.org/standards/d412. Acesso em: 13 nov. 2024.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D624 - Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers. Disponível em: https://www.astm.org/standards/d624. Acesso em: 11 nov. 2024.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D695: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. Disponível em: https://www.astm.org/standards/d695. Acesso em: 28 nov. 2024.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D792 - Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. Disponível em: https://www.astm.org/standards/d792. Acesso em: 29 nov. 2024.

Bahiense, M. N.; Piva, A. M.; Wiebeck, H. A reciclagem de PVC no Brasil. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 9, n. 4, pp. 195-200, 1999. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0104-14281999000400032. Acesso em: 21 maio 2024.

Callister JR., W. D.; Rethwisch, D. G. Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma

Introdução. 9ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

Canevarolo JR., S. V. Ciência dos Polímeros: Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros. São Paulo: Artliber, 2006.

Europe. Plastics - the Fast Facts 2023. Disponível em: https://www.plasticseurope.org/. Acesso em: 7 nov. 2024.

Moura, M. F. S. F.; Morais, A. B.; Magalhães, A. G. Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico. Publindústria, Edições Técnicas, 2010.

Rabello, M. S. Aditivação de Polímeros. São Paulo: Artliber, 2000.

Rodolfo JR., A.; Nunes, L. R.; Ormanji, W. Tecnologia do PVC. 2ª ed. São Paulo: ProEditores Associados Ltda., 2006.

Rodolfo JR., A.; Tsukamoto, C. T. Restrições ao PVC: O que se Pode Esperar para o Futuro. Plástico Moderno, São Paulo, 2024, ed. 591. 10, p. 46-47, out. 2024. Disponível em: https://pvc.org.br/wp-content/uploads/2024/10/artigo_restricoes_PVC.pdf. Acesso em: 7 nov. 2024.

Shiino, M. Y.; Rezende, M. C. Materiais compósitos: desafios da reciclagem e reúso. São Paulo: UNESP, 2020, pp. 163-185. Disponível em: https://books.scielo.org/id/7cnwy/pdf/vilanova-9786557140093-08.pdf. Acesso em: 16 jun. 2024.

Silva, J.; Mendes, R. Economia Circular dos Materiais Compósitos: Transformar Desperdício em Oportunidade. Porto: INEGI, 2021. Disponível em: https://www.inegi.pt/. Acesso em: 6 nov. 2024.

Spinacé, M. A. S.; De Paoli, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. Química Nova, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005.

Vinylplus®. Discover PVC. Disponível em**: https://www.vinylplus.eu/about-us/discover-pvc/. Acesso em: 08. nov. 2024.

Vinylplus®. Progress Report 2024. Disponível em: https://www.vinylplus.eu/resources/progress-report-2024/. Acesso em: 08. nov. 2024.