

Processamento e caracterização de um compósito granular obtido por reciclagem mecânica

Manufacturing and characterization of a particulate composite obtained from mechanical recycling

Rafael de Sá Santos¹, Ingrid Ariani Belineli Barbosa¹, William Marcos Muniz Menezes¹, Heide Heloise Bernardi¹

RESUMO

Este trabalho propõe um método de reciclagem mecânica de nível laboratorial e experimental para rebarbas de material compósito de resina epóxi e fibra de carbono oriundas de manufaturas e que seriam descartadas. O método escolhido consiste em processar as rebarbas dentro de uma câmara de processamento utilizando uma mini retífica. Análises em MEV, fração volumétrica (granulometria) e testes mecânicos foram realizados. O pó obtido após a reciclagem mecânica resultou em uma mistura não homogênea e pode ser utilizado em acabamento superficial de compósitos e na fabricação de compósitos granulares.

Palavras-chave: Compósito; Fibra de Carbono; Reciclagem Mecânica.

ABSTRACT

This work introduces an experimental method in mechanical recycling for carbon fiber-reinforced epoxy-resin burr originated from manufacturing process. The recycling process consists of a manufactured plastic chamber and a Dremel300® rotary tool. MEV analysis, volume fraction and tensile test characterized the powder acquired from the process. The powder produced is not homogeneous and it is indicated for surface finishing and manufacture of particulate composites.

Keywords: Composite; Carbon Fiber; Mechanical Recycling.

¹Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Prof. Jessen Vidal – São José dos Campos (SP) – Brasil

Correspondence author: Rafael de Sá Santos. Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos – Prof. Jessen Vidal - Avenida Cesare Mansueto Giulio Lattes, 1350 – CEP: 12247-014 – São José dos Campos (SP) – Brasil

E-mail: desa_desenha@hotmail.com

Received: 28/02/2017 **Approved:** 22/03/2017

INTRODUÇÃO

Materiais compósitos têm sido largamente utilizados na indústria aeronáutica. Devido à grande empregabilidade, há a necessidade de encontrar um destino final para os descartes dos materiais compósitos através da reciclagem. Boa parte dos materiais compósitos de matriz polimérica é termorrígido, o que torna o processo de reciclagem mais complexo quando comparado aos de matrizes termoplásticas.

Material Compósito

Material compósito pode ser definido como uma combinação de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, que resulta em um novo material com propriedades melhores e que não se encontraria nestes mesmos materiais separadamente⁽¹⁾.

Os dois constituintes de um material compósito são a matriz e o reforço. A matriz pode ser de material cerâmico, metálico ou polimérico. Matrizes poliméricas apresentam baixas resistência e rigidez quando comparadas as outras matrizes, porém, apresentam menor custo de fabricação. Matrizes cerâmicas apresentam altas resistência e rigidez, porém, são frágeis, enquanto a matriz metálica apresenta resistência e rigidez intermediárias, mas, são altamente dúcteis e possuem melhor estabilidade térmica quando comparada a outras matrizes. O reforço é usualmente uma fibra contínua, descontínua ou até mesmo um particulado. As fibras mais comumente utilizadas são: fibra de vidro, aramida ou carbono e provêm resistência e rigidez ao compósito⁽²⁾.

Termorrígidos e termoplásticos

As matrizes poliméricas podem ser termoplásticas ou termorrígidas. Termoplásticos fundem por aquecimento e sofre solidificação por resfriamento, por outro lado, os termorrígidos quando aquecidos, sofrem reação química e se transformam em massa infusível e instável dificultando a sua reciclagem⁽²⁾.

Reciclagem de termorrígidos

Devido às ligações cruzadas em suas cadeias, compósitos termorrígidos não podem ser remodelados. Além disso, possui como desvantagens alto custo financeiro e contaminação. Processos de reciclagem indicados para este tipo de material são pirólise, reciclagem mecânica, química e energética⁽³⁾.

Para a reciclagem de um compósito de matriz polimérica termorrígida, a reciclagem mecânica pode ser uma boa alternativa. Esta reciclagem baseia-se na redução das peças rejeitadas e lascas de processos a um tamanho de partícula que depende da aplicação que se destina. Além de sua simplicidade, o processo de reciclagem mecânica necessita de menos tecnologia, e aproveita ao máximo tanto a matriz quanto o reforço produzindo a menor quantidade de resíduos poluentes. Em contrapartida, este método de reciclagem destrói as fibras, limitando assim a reutilização do material. Uma das vantagens desse tipo de reciclagem é que não gera gases que podem ser prejudiciais ao meio ambiente, como na pirólise. Na reciclagem química as substâncias utilizadas

e resultantes do processo devem ser armazenadas e captadas corretamente, exigindo maiores cuidados⁽⁴⁾.

Portanto, este trabalho tem como objetivo utilizar uma câmara laboratorial, projetada para este fim, para processar as rebarbas de um compósito de fibra de carbono com matriz polimérica, transformando-o em um pó e reutilizando-o para a fabricação de um compósito granular e na fabricação de um protótipo para uma possível aplicação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Na manufatura de peças de compósitos com matriz polimérica reforçada com fibra de vidro, de carbono ou aramida, é comum a produção de refugo, principalmente nas peças fabricadas por laminação manual. O material é gerado pelo processo de furos, rasgos, cortes de rebarbas e cortes de portas que são efetuados no processo de acabamento das peças, com isso, além deste material a retirada do mesmo gera um pó que também é constituído pelo compósito.

Material

O material utilizado neste artigo veio do processo de acabamento de peças de aeronaves não tripuladas de compósito de carbono, cujas características são: rebarbas de compósitos de matriz polimérica de epóxi de baixa viscosidade *Araldite®* LY 5052 com catalizador *Aradur®* 5052, reforçada com carbono C200P 3K TR30S (200 g/m²) (Fig. 1).

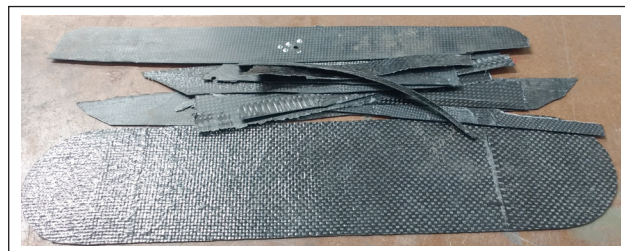


Figura 1: Rebarbas utilizadas do compósito de carbono.

Métodos

O método de reciclagem empregado foi mecânico, o qual consistiu em reduzir as rebarbas (60,2 g) a um pó, podendo assim ser utilizado na fabricação de outros compósitos. Todo o processamento foi realizado dentro de uma câmara (Fig. 2) para que o material processado não se dissipasse no ar, contaminando assim o ambiente.



Figura 2: Câmara de processamento fabricada

Além do pó obtido no processamento mecânico, também foi coletado o pó gerado pelo corte das rebarbas. No entanto, devido ao pó oriundo do corte possuir grande quantidade de impurezas, este tem características diferentes do pó processado, restringindo o seu uso. O material obtido foi analisado para definir suas características físicas e mecânicas, sendo também fabricadas peças para analisar sua aplicação. Na Fig. 3, pode-se observar o fluxograma que exemplifica as atividades desenvolvidas durante este trabalho.

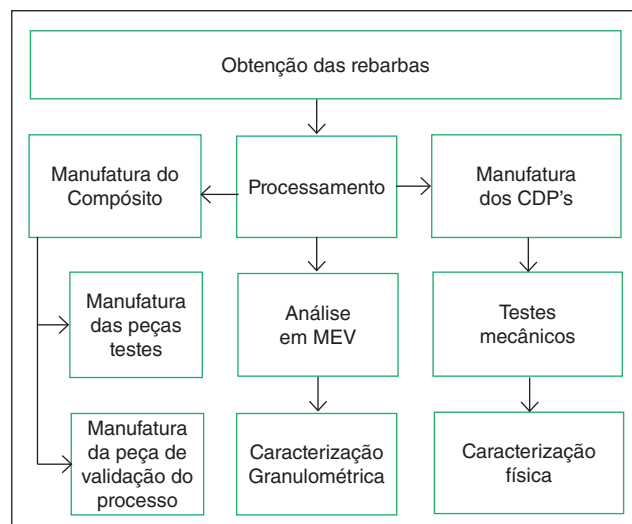


Figura 3: Fluxograma do processo dos CDP's (corpos de prova)

Construção da câmara

Para a elaboração da câmara de processamento foi escolhido um tamanho adequado, com espaço para a mão do operador e a ferramenta, necessário para se realizar o trabalho. Foi escolhido para a construção da câmara um engradado de plástico PET de 12 litros, com 30 cm de largura, 40 cm de comprimento e 15 cm de altura, e com uma tampa com duas travas. Para dar acesso a mão do operador e a ferramenta ao interior do engradado foram cortadas duas cavidades ovais em uma das laterais do engradado. Em uma das cavidades foi colada uma luva de látex para possibilitar ao operador a manipulação da peça a ser processada, sem que este entre em contato com o pó gerado. Na outra cavidade foi colado um filme plástico flexível para proteger a ferramenta de trabalho, concedendo boa mobilidade e evitando o contato desta com o material obtido.

Para melhorar a vedação, foi diminuída a folga da tampa do engradado, uma vez que a tampa não pode ficar com espaços, pois o pó gerado pelo processo pode escapar, e nem ser selada totalmente, pois ficaria difícil de abrir a câmara sem perturbar o pó em seu interior fazendo este se dissipar. Assim, também se evita o escape do pó devido à diferença de pressão gerada pela manipulação da ferramenta dentro da câmara.

Processamento e armazenamento do material

O processamento de redução das rebarbas foi realizado em quatro etapas:

- A câmara foi instalada em um local adequado e com boa iluminação. A câmara foi aberta, inseridas seis peças e então a tampa foi fechada.
- Utilizando uma máquina da marca *Dremel 300®* com um cilindro abrasivo foi feito o desgaste da rebarba obtendo-se o pó do compósito. No entanto, cada rebarba processada resultou em um pedaço de aproximadamente 1 cm² não processado, já que é a área mínima de manipulação para a peça ser processada. Esse processo foi realizado para todas as seis peças, e ao inserir novas peças na câmara a tampa foi aberta com cuidado, já que o pó gerado pelo processo se dissipava com facilidade no ar.
- Após o processamento de todas as rebarbas a câmara ficou em repouso (15 min) antes de ser aberta, para que todo o pó presente no ar precipitasse, evitando a dispersão do pó.
- Com o auxílio de um pincel de 1½ polegadas com cerdas macias todo o material processado foi recolhido e armazenado em um pote plástico de polipropileno de 250 ml que foi pesado em uma balança com resolução de 0,1 g. O pó processado e as sobras foram pesados para se determinar a eficiência do processo.

Análise do pó processado

A caracterização microestrutural do pó obtido através do processo mecânico de reciclagem foi feita utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV). A análise foi feita usando um microscópio modelo *VEGA3 TESCAN* da *Shimadzu* no modo de elétrons secundários.

Foram analisadas duas amostras do mesmo material, uma foi utilizada para um dimensionamento inicial das partículas encontradas e a outra para determinar a fração volumétrica das partículas através da contagem manual de pontos. Assim, o procedimento utilizado foi o da norma ASTM E 562-02⁽⁵⁾ adaptada, usando uma imagem geral com ampliação de 80 vezes e cinco campos da amostra com ampliação de 500 vezes, grade quadrada de 49 pontos e fração do volume de 20%, o que resulta em uma acuracidade relativa de 33%. No entanto, as imagens captadas foram também utilizadas para pré-determinar uma classificação para os tipos de partículas encontradas nas micrografias, podendo assim, definir a proporção de cada partícula na amostra. Após a análise da fração volumétrica das partículas, foi mensurado o tamanho destas, para assim definir a granulometria de cada uma.

Teste mecânico

Para os testes mecânicos, foram fabricados corpos de prova (CDP's) de compósito granular, de acordo com uma adaptação da norma ASTM D3039-14⁽⁶⁾ para ensaios de tração e compressão, sendo três utilizando o pó processado e 3 usando carga de aerossil (carga utilizada em colagem de compósitos) para cada teste. Foi utilizada a proporção volumétrica, segundo Campbell⁽²⁾, de 40% para compósito granulado, que foi misturado com resina epóxi

5052, obtendo-se assim o compósito a ser testado. O ensaio de tração e compressão foi efetuado para analisar a resistência do material quando submetido a cargas axiais no sentido longitudinal do CDP's. Os ensaios mecânicos foram realizados em uma máquina de ensaios universal, a temperatura ambiente com velocidade de deformação de 2 mm/min.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de corte das rebarbas gerou um pó com uma grande quantidade de impurezas, já que o processo não foi feito em um ambiente controlado, obtendo-se 39,8 g de pó de compósito de carbono junto com partículas de pó de tinta, madeira, desmoldante e massa de acabamento. Devido à grande quantidade de partículas estranhas, o pó com impurezas não foi utilizado para análise já que poderia mascarar ou comprometer os resultados.

No processamento das 60,2 g de rebarbas dentro da câmara foram produzidos 53,7 g de um pó fino sem impurezas (Fig. 4) e 6 g de sobras não processadas. Sendo assim, o aproveitamento do processo foi de 89,2% e as 0,5 gramas faltantes representam a quantidade de material dissipada ao retirá-lo de dentro da câmara, e do pó que ficou impregnado nas paredes.

A sobra de material é igual para cada peça processada, já que consiste na área mínima para manipular a peça. Com isso, utilizando o maior tamanho possível das rebarbas, tem-se uma menor quantidade de partes de rebarbas e consequentemente menos sobras não processadas. E com a utilização de um processamento automático a eficiência do processo aumentaria, diminuindo também o tempo de processo.

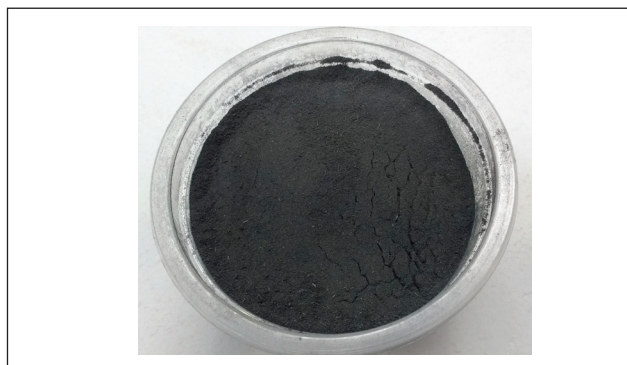


Figura 4: Pó do compósito de carbono após o processamento mecânico.

A Fig. 5 mostra a micrografia da primeira amostra do pó coletado sem impurezas. Pode-se observar (Fig. 5A) que o processamento mecânico gerou uma mistura heterogênea do pó, assim, foi utilizada uma classificação geral para as partículas, como aglomerados e fibras, com aglomerados que variam de 150 μm a 500 μm e fibras de 25 μm a 500 μm . Além disso, nos aglomerados maiores observa-se a interação da fibra de carbono com a resina epóxi a qual não foi separada pelo processo de desgaste (Fig. 5B). No entanto, devido às dimensões das partículas

obtidas, pode-se inferir que o processo de reciclagem mecânica utilizado foi eficiente para se obter um pó do material compósito.

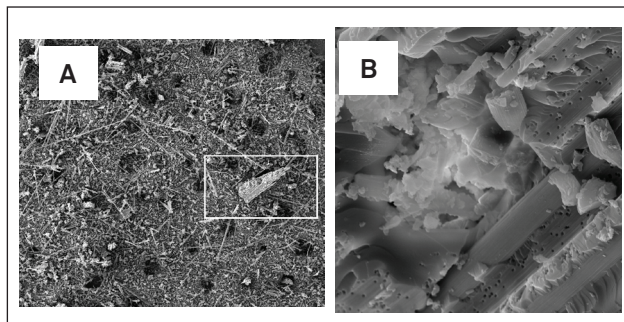


Figura 5: (A) Pó do compósito de fibra de carbono e (B) detalhe da figura 5a.

Na Fig. 6 pode-se observar a segunda amostra com ampliação de 80 vezes e um dos cinco campos da amostra com ampliação de 500 vezes. Com isso as partículas foram classificadas em aglomerado, fibras longas, partículas grosseiras e partícula fina.

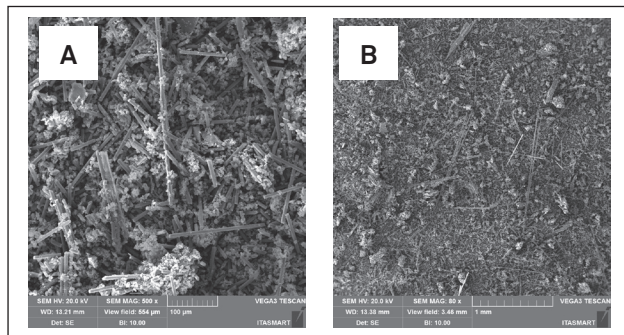


Figura 6: (A) Imagem geral da amostra e (B) imagem do campo.

Os cinco campos analisados foram quadriculados, para se obter os 49 pontos (Fig. 7), os pontos foram catalogados nas classificações já determinadas, para se obter a fração volumétrica de cada tipo de partícula.

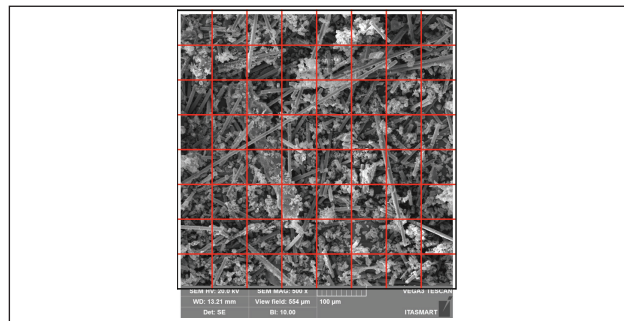


Figura 7: Imagem de um campo da amostra quadriculado.

Na Tabela 1 pode-se verificar a média da porcentagem de cada partícula em cada campo da amostra analisada.

Observa-se que na amostra o pó de carbono analisado mesmo possuindo outros tipos de partículas ainda é constituído em sua maior parte por partículas finas, $63 \pm 7,3\%$ da amostra.

Utilizando os dados das medidas das partículas de cada campo foi elaborada uma tabela com a média e o desvio de cada tipo de partícula em relação ao campo analisado, os dados podem ser visualizados na Tabela 2.

Os dados da tabela mostram que as partículas maiores possuem um desvio acima de 29%, enquanto as partículas menores possuem uma menor variação dimensional, menor que 22%, enquanto na partícula fina este valor não chega aos 18%.

Foi analisado também o aerosil e a Fig. 8A mostra um aglomerado destas partículas, da ordem de 100 μm . Porém, uma ampliação (Fig. 8B) indica que o aglomerado é formado por partículas menores, de 2 μm a 30 μm .

Para um melhor controle do tamanho das partículas do pó pode ser utilizada uma separação com peneiras. Desta maneira, se obterá um tamanho padrão de partículas possibilitando a fabricação de compósitos com tamanhos pré-determinados de partículas.

Neste trabalho o processo efetuado foi experimental, porém pode ser escalonado para nível industrial com o uso de um maquinário com capacidade de processamento automático, podendo reciclar toda rebarba produzida por uma empresa.

A utilização deste processo transforma material que seria descartado em matéria prima, podendo ser utilizado em

processos de manufatura, como *hand lay-up* (acabamento) e injeção. Assim, o material de alto custo que seria descartado pode ser reutilizado, diminuindo as perdas das empresas.

Os testes mecânicos realizados foram utilizados para caracterizar o compósito granular obtido e definir suas características mecânicas e as possibilidades de uso do material; assim, foram realizados ensaios de tração e compressão. Os resultados podem ser observados da Tabela 3, possibilitando uma comparação do granulado reciclado e com a adição do aerosil, que é um tipo de carga muito utilizada na fabricação de peças e produtos de compósitos.

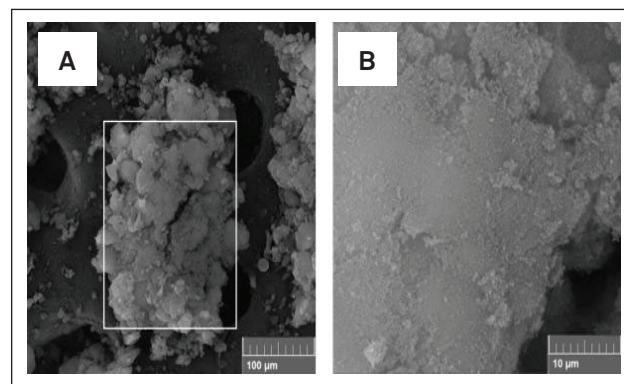


Figura 8: (A) Pó do aerosil e (B) detalhe.

Tabela 1: Fração Volumétrica obtida através da amostra indicada na Fig. 7.

Fração Volumétrica				
Campo	Aglomerado	Fibra Longa	Partícula Grosseira	Partícula Fina
1	0,102	0,143	0,143	0,612
2	0,061	0,204	0,122	0,612
3	0,041	0,061	0,122	0,776
4	0,082	0,082	0,245	0,592
5	0,184	0,061	0,184	0,571
Média	0,094	0,110	0,163	0,633
Desvio	0,049	0,056	0,047	0,073

Tabela 2: Granulometria das partículas

Granulometria (μm)				
Campo	Aglomerado	Fibra Longa	Partícula Grosseira	Partícula Fina
1	350,0	226,4	45,7	19,5
2	196,7	325,5	50,0	29,2
3	140,0	260,0	73,3	32,1
4	132,5	146,3	40,4	22,2
5	140,6	163,3	58,3	28,8
Média (μm)	191,9	224,3	53,6	26,4
Desvio (μm)	82,3	65,3	11,5	4,7

Tabela 3: Testes Mecânicos do granulado reciclado e com a adição do aerosil

Teste	CDP de Carbono (kN)	Desvio	CDP de Aerosil (kN)	Desvio
Tração	1,6	0,19	1,55	0,2
Compressão	4,5	0,74	2,2	0,79

PROTÓTIPO DE APLICAÇÃO

Para validar o processo, foram fabricadas peças para teste (Fig. 9A), utilizando-se a mesma proporção de pó de carbono na fabricação do compósito granular para os testes mecânicos. As peças de teste serviram para verificar acabamento externo e processo de cura. Foram utilizados dois moldes para as peças de testes: um para verificar acabamento superficial e outro para verificar a capacidade de copiar superfícies. Após a cura as peças foram retiradas do molde, limpas e em seguida foi feita uma inspeção visual. Foi observado que o compósito granular reproduziu com fidelidade a superfície das peças propiciando um bom acabamento superficial (Fig. 9B), e o desmolde das peças foi efetuado sem dificuldades.

Para a fabricação da peça final foi escolhida uma peça funcional, para avaliar melhor o uso do material em um processo de manufatura. Foi escolhido um mancal para um eixo de 3/8 polegadas, por ser um material já disponível para teste, sendo definida a manufatura de duas peças para apoiar o eixo em dois pontos e verificar o encaixe das peças neste.

Foi utilizado o desenho da peça feito em CAD para se construir 2 moldes do mancal, em madeira e plástico, e foram adicionados inserts para produzir os furos de fixação e do eixo evitando

processos após o desmolde da peça, com a ressalva que o molde foi feito manualmente (Fig. 10A).

Os mancais depois de desmoldados precisaram de retrabalho para que fossem retiradas as rebarbas, as partes afiadas devido a geometria da própria peça. Diferentemente das peças de teste o desmolde destas foi dificultado devido aos inserts dos furos já que estes não possuíam ângulo de desmoldagem. Mesmo assim, o desmolde do resto da peça foi realizado com a mesma facilidade das anteriores (Fig. 10B). Os dois mancais não apresentaram nenhum defeito nos furos dos eixos e de fixação, sendo notadas algumas marcas que são apenas reprodução das emendas dos moldes.

Os mancais foram montados e testados com o eixo acoplado a estes, e com uma alavanca de madeira o eixo foi rotacionado, conferindo a precisão e alinhamento dos furos, obtendo-se um resultado positivo, já que o teste não identificou problemas de alinhamento ou de folga (Fig. 10C).

Portanto, a reciclagem do material compósito de fibra de carbono, além de se mostrar um processo viável, o pó produzido para a fabricação de um compósito granular pode ser aplicado na fabricação de mancais.

Os resultados dos testes mostram que os CDP's do compósito com granulado de carbono submetidos a cargas de tração e

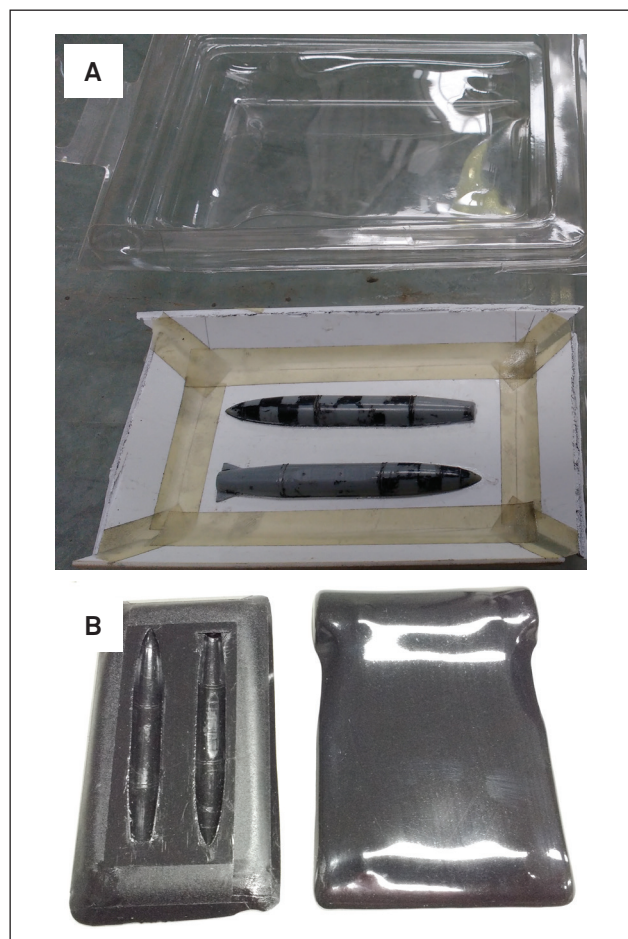


Figura 9: (A) Moldes de teste e (B) peças desmoldadas

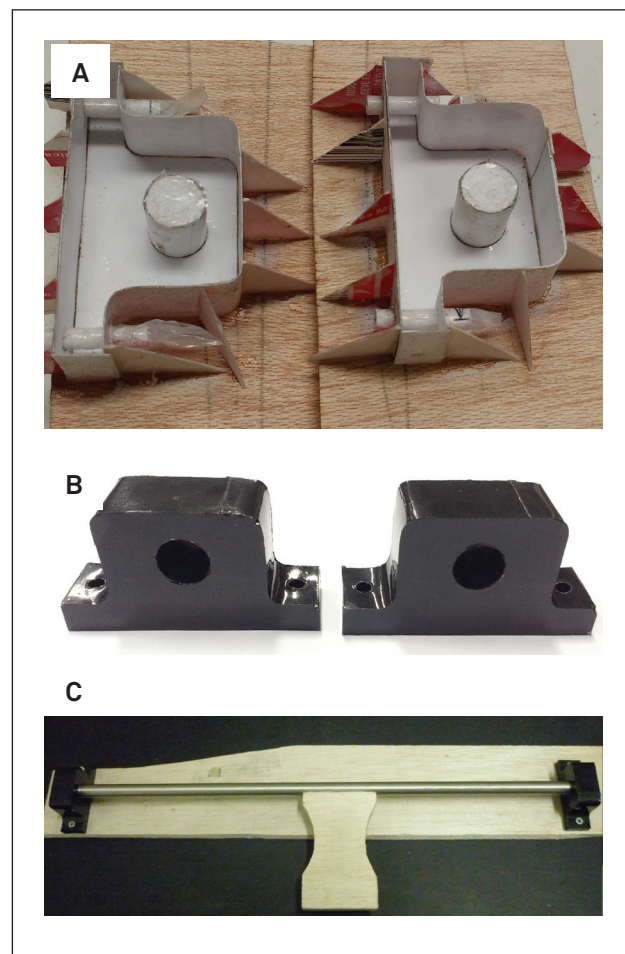


Figura 10: (A) molde dos mancais; (B) mancais desmoldados e (C) testes dos mancais.

compressão suportaram uma média de carga maior que os CDP's com granulado de aerosil, além de cargas bem maiores em compressão que em tração. Mesmo obtendo-se valores de cargas maiores em tração, o granulado de carbono apresenta resultados bem próximos ao de granulado de aerosil. Em contrapartida, a grande diferença entre os resultados de compressão no teste do granulado de carbono e do granulado de aerosil é devido à maior interação das partículas de carbono com a resina.

Com a análise dos resultados obtidos foi possível comparar o material desenvolvido com outros materiais através do cálculo do módulo de elasticidade em tração, obtendo-se um valor de 6,3 GPa, ou seja, o material obtido pode ser comparado ao Nylon 6 que possui um módulo de elasticidade a tração de 2,6 GPa⁽⁷⁾. Assim, o compósito obtido por ser utilizado em outras aplicações, como na fabricação de peças de pouca solicitação estrutural, mas que necessitam de uma maior estabilidade dimensional, ou para criar uma superfície mais rígida sobre outros materiais poliméricos menos resistentes.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- a. O processo de reciclagem mecânica apresentado resultou em um pó que pode ser utilizado para acabamento superficial de compósitos e na fabricação de peças de compósito granular.
- b. Para o processamento das rebarbas, o processo de reciclagem escolhido é economicamente viável; que, em outros processos o gasto seria muito maior para se obter um produto que não poderia ser empregado em peças de alto valor.
- c. O processo elaborado neste trabalho pode ser escalonado para um processamento automático, aumentando a eficiência do processo e diminuindo o tempo de processamento.
- d. O pó obtido por desgaste mecânico resultou em uma mistura não homogênea.
- e. O compósito granular fabricado a partir do material reciclado possui características mecânicas melhores em compressão do que em tração.
- f. O material obtido pode ser facilmente empregado em processos de manufatura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Materiais e Processos do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) pela utilização do MEV.

REFERENCES

1. ASTM, 1987. AMERICAN SOCIETY FOR THECNICAL AND METHOD. Standard Test Method for Tensile Properties of plastics (Metric). ASTM 1987. (D3878-15).
2. CAMPBELL, F. C. Introduction to Composite Materials. In: CAMPBELL, F. C. Structural Composite Materials. USA: ASM International®, Cap. 1, p. 1-30, 2010.
3. PICKERING, S. Recycling and Disposal of Thermoset Composites. Nottingham: University of Nottingham, 2013.
4. PICKERING, S., HORNSBY, P. Polymer Composites: Recycling and Energy Recovery. Materials World, p. 426-427, 1995.
5. ASTM, 2002. AMERICAN SOCIETY FOR THECNICAL AND METHOD. ASTM E 562-02: Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count. United States: Astm Internacional, 2002. 7 p.
6. ASTM, 1987. AMERICAN SOCIETY FOR THECNICAL AND METHOD. Standard Test Method for Tensile Properties of plastics (Metric). ASTM 1987. (D3039-14).
7. OBERG, E., JONES, F. D., HORTON, H. L., RYFFEL, H. H. 27th Edition Machinery's Handbook. Industrial Press Inc. New York, p. 416, 2004.