

Polypropylene composites reinforced with alumina nanoparticles and short carbon fibers

Compósitos de polipropileno reforçados com nanopartículas de alumina e fibras curtas de carbono

Article Info:

Article history: Received 2023-01-01 / Accepted 2023-02-13 / Available online 2023-02-13

doi: 10.18540/jcecv19iss1pp15391-01e



João Lucas Alexandre Nunes Galvão Ferreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9646-6371>

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Brazil

E-mail: joaolucasgalvao@hotmail.com

Marisa Cristina Guimarães Rocha

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5155-3399>

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Brazil

E-mail: mrocha@iprj.uerj.br

Resumo

Nesse trabalho, materiais compósitos à base de polipropileno (PP) carregados com nanopartículas de alumina (Al_2O_3) e reforçados com fibras de carbono curtas (FC), foram desenvolvidos, visando a obtenção de materiais leves, com alta rigidez, resistência mecânica e estabilidade térmica, passíveis de serem processados em equipamentos comumente usados nas indústrias de polímeros e automotiva. Com essa finalidade, polipropileno foi processado com alumina, em teores definidos através de metodologia de superfície de resposta inserida no software Minitab, de forma a se avaliar o efeito da incorporação de alumina e do polipropileno graftizado com anidrido maleico (PP-g-AM) usado como compatibilizante em algumas amostras. Os compósitos que apresentaram as melhores propriedades mecânicas, no caso, compósitos híbridos PP/PP-g-AM/ Al_2O_3 foram usados como matriz e preparados utilizando teor de alumina de 6% m/m e teores de fibras de carbono variáveis, entre 10% m/m e 15% m/m. As propriedades dos materiais obtidos foram avaliadas através de diversas técnicas de caracterização como: ensaios mecânicos em tração, termogravimetria (TGA), calorimetria diferencial exploratória (DSC) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). No presente artigo serão apresentados os resultados do ensaio mecânico em tração. Foi obtido nesse trabalho materiais à base de polipropileno com rigidez e resistência mecânica superiores as apresentadas pelo polipropileno.

Palavras-chave: Polipropileno. Compósitos híbridos. Fibras de carbono. Superfície de resposta. Alumina.

Abstract

In this work, composite materials based on polypropylene (PP) reinforced with alumina nanoparticles (Al_2O_3) and short carbon fibers (SCF), were developed, aiming at obtaining light materials, with high rigidity, mechanical resistance and thermal stability, capable of being processed in the machinery conventionally used in the polymer industry. For this purpose, polypropylene was processed with alumina, at levels defined through the response surface methodology inserted in the Minitab software, in order to evaluate the effect of incorporating alumina and polypropylene grafted with maleic anhydride (PP-g-MA) used as a compatibilizer agent in the samples. The composite that presented the best mechanical properties, in this case, the hybrid composite PP/PP-g-MA/ Al_2O_3 was used as matrix. The new composites were prepared by filling this matrix with 6% wt. of alumina and variable contents of carbon fiber, between 10 wt% and 15 wt%. The tensile mechanical

properties of the materials were evaluated according to standardized techniques. The materials obtained showed stiffness and mechanical strength superior to that presented by polypropylene.

Keywords: Polypropylene. Hybrid composites. Carbon fibers. Response surface. Alumina.

1. Introdução

Compósitos são materiais que possuem dois ou mais constituintes quimicamente diferentes que em escala macroscópica possuem uma interface bem definida. Em geral, esses materiais possuem propriedades melhores que seus elementos constituintes (Marinucci, 2011). As propriedades desses materiais são função das propriedades das fases constituintes, suas concentrações relativas e forma, tamanho, distribuição e orientação das partículas na fase dispersa (Callister, 2002).

Recentemente, tem havido um crescente uso de compósitos termoplásticos poliméricos na indústria automotiva, pois tornam os carros mais leves e promovem maior eficiência energética no uso do combustível (Arao *et al.*, 2013). O custo, bem como a resistência desses materiais dependem do processo de fabricação. Apesar de seu alto desempenho mecânico, as fibras contínuas não podem ser processadas através de moldagem por injeção, o que dificulta a produção em massa desses compósitos (Arao *et al.*, 2013). Em consequência, há uma tendência crescente de utilização de fibras curtas como elementos de reforço em matrizes termoplásticas, devido à alta produtividade obtida através do processo de moldagem por injeção e à reciclabilidade. No entanto, esses materiais apresentam baixa rigidez e resistência, mesmo quando são utilizadas fibras de alta resistência, como as fibras de carbono. A resistência desses materiais é função do comprimento e teor das fibras, bem como da resistência ao cisalhamento interfacial, que é muito baixa entre as fibras de polipropileno e carbono. O uso de baixos níveis de compatibilizantes, como o polipropileno graftizado com anidrido maleico, pode melhorar a adesão interfacial entre o polímero e as fibras (Arao *et al.*, 2013).

Os nanocompósitos apresentam propriedades térmicas e mecânicas superiores às apresentadas pelos compósitos tradicionais com baixo teor de nanopartículas, geralmente inferior a 5%. A adição de nanopartículas a compósitos preenchidos com matrizes termoplásticas reforçadas com fibras é uma alternativa interessante para obter propriedades superiores sem alterar as condições de processamento, desde que haja uma boa distribuição e dispersão das nanopartículas entre as fibras. Além de melhorar as propriedades da matriz, as nanopartículas também afetam a adesão interfacial entre a carga e a matriz. Há relatos na literatura indicando que a incorporação de nanocargas melhora algumas propriedades de compósitos termoplásticos reforçados com fibras curtas (Arao *et al.*, 2013). A incorporação de nanopartículas de alumina ao termoplástico é uma estratégia utilizada para melhorar suas propriedades.

A alumina é uma cerâmica estrutural amplamente utilizada na indústria de materiais, devido ao seu baixo custo e propriedades, tais como: alta dureza e inércia química, excelentes propriedades dielétricas, resistência ao ataque de ácidos e bases em altas temperaturas, propriedades de isolamento elétrico e térmico, alta rigidez e resistência à fratura. É amplamente utilizado em aplicações que incluem implantes, peças com resistência à abrasão e em diversos tipos de revestimentos (Zhang *et al.*, 2012; Agrawal *et al.*, 2015).

A técnica de design de experimentos de mistura (do inglês – Design of Experiments -DOE) fornece um meio eficiente de determinar a formulação ideal de uma mistura específica. A resposta medida depende apenas das proporções relativas dos componentes na mistura (Burlein, 2010; Coscione *et al.*, 2005; Macedo, 2007; Neto *et al.*, 2010). O objetivo deste trabalho é desenvolver compósitos híbridos de polipropileno reforçado por nanopartículas de alumina e fibras curtas de carbono.

2. Materiais e Métodos

2.1 Materiais

- Polipropileno (PP, H503), MFI = 3,5 g/10 min – ASTM D1238 foi fornecido pela Braskem SA.
- O polipropileno graftizado com anidrido maleico (PP-g-MA, Polybond 3200), MFI = 115 g/10 min – ASTM D 1238, a 190 °C foi obtido da Chemtura Industria Química do Brasil.
- A alumina calcinada (Al₂O₃) em escala nanométrica (13 nm) foi fornecida pela SigmaAldrich.
- As fibras curtas de carbono oriundas da TohoTenaxAmerica sob o nome de Tenax®-A/J HT C804, com comprimento médio de 6 mm, diâmetro (D) de 7 µm, massa específica de 1,8 g/cm³ foram gentilmente doadas pela Parabor.
- O antioxidante Irganox 1010 FF foi fornecido pela BASF.
- O composto de estearato de cálcio, Atmer SA 1753, fornecido pela empresa Ciba Especialidades Químicas Ltda, foi utilizado como lubrificante no processamento em extrusora monorosca.

2.2 Metodologia

Planejamento experimental de misturas. O modelamento de misturas consiste em ajustar um modelo matemático polinomial a uma superfície de resposta que foi obtida segundo um planejamento experimental específico, conhecido como planejamento estatístico de misturas

. O teor de cada componente da mistura pode variar entre zero (0) e um (1), e a soma de todos os componentes é igual a um. A região experimental de uma mistura constituída por três componentes é um triângulo definido pelas coordenadas (0, 0, 1), (0, 1, 0) e (1, 0, 0). Os vértices do triângulo correspondem a cada um dos três constituintes da mistura. Os lados do triângulo correspondem às misturas binárias. Os pontos situados no interior do triângulo representam as misturas ternárias (Burlein, 2010; Coscione *et al.*, 2005; Macedo, 2007; Neto *et al.*, 2010).

Neste trabalho, o software Minitab 19 foi utilizado para o planejamento experimental das misturas. Este software também foi usado para descrever o comportamento mecânico de tração das amostras. Polipropileno, alumina e PP-g-AM foram representados pelas variáveis de entrada designadas como PP, alumina e PP-g-AM, respectivamente.

Os componentes da mistura foram submetidos às seguintes restrições: $0,88 \leq PP \leq 1,0$, $0 \leq alumina \leq 0,06$ e $0 \leq PP-g-AM \leq 0,06$. A Figura 1 mostra a região de interesse do projeto. Os círculos representam 9 misturas PP/PP-g-AM/Al₂O₃, que devem ser preparadas para dar uma superfície de resposta adequada usando uma equação polinomial de grau n.

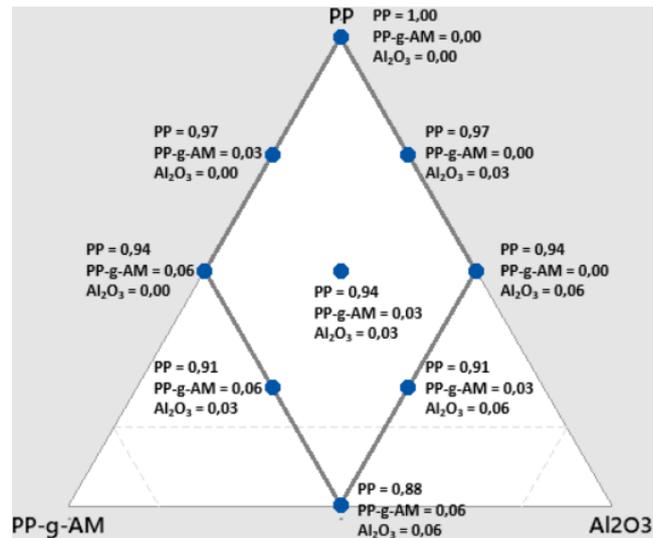


Figura 1 – Planejamento de experimentos vértices extremos.

A Tabela 1 apresenta a composição das misturas definidas pelo software Minitab.

Tabela 1 – Composição dos compósitos PP/PP-g-AM/Al₂O₃.

Código da mistura	PP / %	PP-g-AM / %	Al ₂ O ₃ / %
# 1	100	0	0
# 2	88	6	6
# 3	94	0	6
# 4	94	6	0
# 5	97	0	3
# 6	97	3	0
# 7	91	6	3
# 8	91	3	6
# 9	94	3	3

Preparação dos compósitos PP/PP-g-AM/Al₂O₃. Um concentrado de polipropileno carregado com 8 % de alumina foi preparado em extrusora monorosca AX Plástico, modelo 30:32 com diâmetro de 30 mm e razão comprimento (L) / diâmetro (D) = 32. O concentrado foi aditivado com o antioxidante (1% m/m do concentrado) e com o agente lubrificante (0,5% m/m do concentrado). O perfil de temperatura adotado da alimentação da extrusora até a matriz foi de 180/200/200/200/200°C. A velocidade da extrusora foi de 35 rpm. O material extrudado na monorosca foi colocado em estufa a 60 °C e posteriormente processado e diluído em extrusora de rosca dupla co-rotatória Leistritz, modelo ZSE18MAXX-40D, com velocidade de rotação de 500 rpm, taxa de alimentação de 5 kg/h e perfil de temperatura de 200/210/190/190/190/190/200/220/220/230°C. Essa diluição foi feita para atingir a proporção de componentes do planejamento de misturas (Tabela 1).

Determinação das propriedades mecânicas em tração. As propriedades de tração foram determinadas usando uma máquina de teste universal Shimadzu, modelo AG-X Plus com uma célula de carga de 5 kN. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM D 638, utilizando as dimensões do corpo de prova Tipo I. A velocidade da travessa móvel de 20 mm/min foi usada em todas as determinações. Os corpos de prova para os ensaios mecânicos foram obtidos por moldagem por injeção. A injetora utilizada foi a Arburg (IMA/UFRJ), modelo Allrounder 270 S. As seguintes condições de injeção foram usadas: perfil de temperatura – 160/175/185/195/205°C; pressão de injeção – 1200 bar; volume de comutação – 3 cm³; velocidade de injeção - 15 cm³/s; tempo de resfriamento do molde – 30 s; pressão de descarga de 600 bar e tempo de descarga de 2 s. Dez corpos de prova para cada amostra foram usados para obter os dados mecânicos. O módulo de elasticidade foi determinado através do método da secante aplicado no ponto de 2% de deformação.

3. Resultados

3.1 Propriedades mecânicas em tração

As propriedades mecânicas em tração do polipropileno e dos compósitos de PP/PP-g-AM/Al₂O₃ foram determinadas. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para o módulo de elasticidade, resistência à tração e tenacidade.

Tabela 2 – Propriedades em tração do polipropileno e dos compósitos PP/PP-g-AM/Al₂O₃.

Código da mistura (PP/PP-g-AM/Al ₂ O ₃ / %)	Módulo de Elasticidade / MPa	Resistência à Tração / MPa	Tenacidade / MJ/m ³
# 1 – (100/0/0)	881 ± 39	33.9 ± 0.3	14 ± 0.5
# 2 – (88/6/6)	961 ± 69	35.7 ± 0.3	17 ± 3.1
# 3 – (94/0/6)	867 ± 69	32.7 ± 0.7	38 ± 8.9
# 4 – (94/6/0)	870 ± 28	34.2 ± 0.4	16 ± 1.5
# 5 – (97/0/3)	830 ± 63	33.1 ± 1.2	29 ± 5.8
# 6 – (97/3/0)	972 ± 49	35.3 ± 0.4	13 ± 1.1
# 7 – (91/6/3)	983 ± 16	35.2 ± 0.2	18 ± 0.5
# 8 – (91/3/6)	1254 ± 109	35.2 ± 0.1	19 ± 1.2
# 9 – (94/3/3)	1026 ± 80	35.1 ± 0.4	17 ± 1.2

Os resultados mostram que o módulo de elasticidade aumenta somente com a incorporação conjunta de alumina e anidrido maleico, sendo esse efeito mais evidente quando o teor de PP-g-AM incorporado ao compósito PP/Al₂O₃ foi de 3% (amostras #8 (91/3/6)% e #9 (94/3/3)%). A alumina é uma carga mineral rígida que restringe a mobilidade das cadeias poliméricas e ao ser adicionada em conjunto com o compatibilizante, promoveu esse aumento. Este resultado foi encontrado em outros trabalhos (Akil *et al.*, 2006; Li; Li; Xie, 2016; Pedrazzoli *et al.*, 2014a, 2014b; Mai *et al.*, 2001; Silva *et al.*, 2012; Streller *et al.*, 2008; Zhao; Li, 2005).

Quando a alumina foi adicionada de forma isolada ao polipropileno, sem a presença do agente compatibilizante (amostras #3 (94/0/6)% e #5 (97/0/3)%), não houve aumento do módulo de

elasticidade. Esse resultado confirma a importância da adição do anidrido maleico para se obter propriedades desejáveis dos compósitos PP/Al₂O₃.

É fato reconhecido que o módulo de elasticidade dos compósitos poliméricos carregados com carga particulada é função da área da superfície de contato entre a carga e a matriz (Eiras; Pessan, 2009). Os resultados indicam, supondo que houve a incorporação da alumina nos teores desejados, que houve aglomeração da alumina, reduzindo de forma significativa a área de contato entre o polipropileno e as partículas de alumina.

Os resultados obtidos também mostram que existe um efeito sinérgico no módulo de elasticidade, quando PP-g-AM é incorporado à matriz de polipropileno. Esse efeito se tornou mais evidente na amostra #8, PP/ PP-g-AM/Al₂O₃ (91/3/6)%, que apresentou um aumento de 42% no módulo de elasticidade. Como o módulo não depende das interações interfaciais entre a carga e o polímero, se pode presumir que o anidrido maleico promove a dispersão das partículas de alumina proporcionando um aumento da área da superfície de contato entre o polipropileno e a alumina.

A Figura 2 mostra a superfície de resposta derivada do desenho estatístico realizado para avaliar o efeito da variação na composição dos compósitos sobre o módulo de elasticidade.

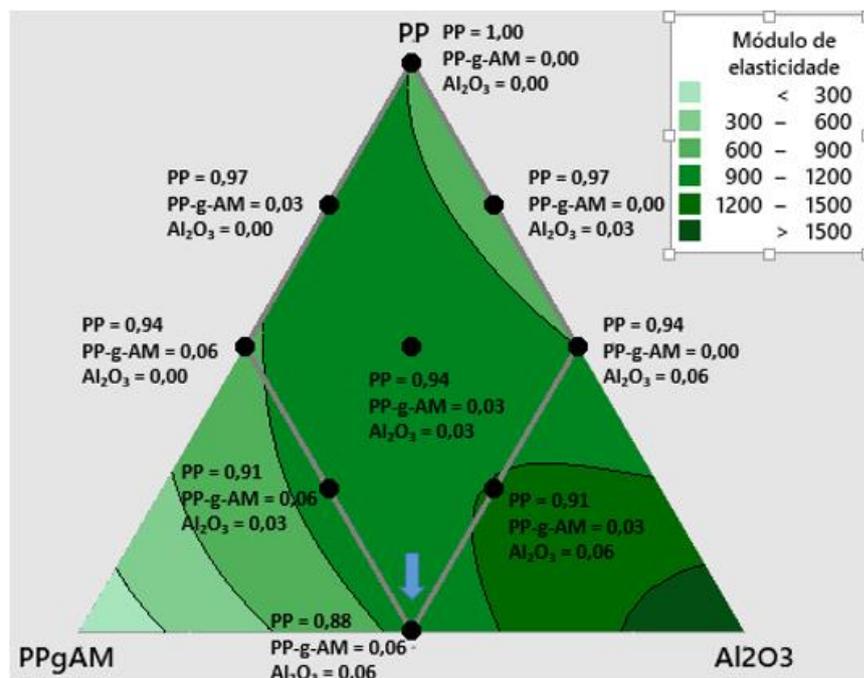


Figura 2 – Ilustração da superfície de resposta para o módulo de elasticidade (Minitab - opção proporção de componentes).

É possível observar que valores mais altos de módulo de elasticidade são obtidos pelas misturas ternárias (PP/PP-g-AM/Al₂O₃), ou seja, quando o agente compatibilizante é incorporado aos compósitos PP/Al₂O₃. De acordo com a Fig. 2, para a mesma proporção de alumina (6%), o módulo de elasticidade é alto, tanto para a composição formulada com 3% de anidrido maleico quanto para a formulada com o teor de 6% de compatibilizante. Porém, com 3% de anidrido maleico se obtém o valor de módulo de elasticidade mais elevado. Sendo assim, optou-se por selecionar a amostra com o menor teor de anidrido maleico para a continuidade dos estudos visando uma redução de custos e a obtenção de valores mais altos de módulo.

Existe uma concentração ótima de anidrido maleico para que o módulo tenha um valor mais alto. Ao analisar a coordenada do ponto marcado com a seta azul, correspondente a composição PP/PP-g-AM/Al₂O₃ (0,88/0,06/0,06) é possível observar que o deslocamento desse ponto na base para esquerda há uma tendência de o módulo diminuir e para a direita desse ponto, há uma tendência de um aumento do módulo com o aumento do teor de alumina. Este gráfico também demonstra que

a incorporação do PP-g-AM é fundamental para a obtenção de compósitos PP/Al₂O₃ com valores de módulo mais elevados.

Analisando novamente a Tabela 2, é possível observar que a incorporação de alumina na concentração de 6% (amostra #3 – (94/0/6)%) promoveu um decréscimo da resistência à tração. Tendência ao decréscimo da resistência à tração foi também observado ao se adicionar 3% (amostra #5 – (97/0/3)%) de alumina ao PP. Resultados similares foram observados em outros trabalhos (Akil *et al.*, 2006; Pedrazzoli *et al.*, 2014b; Plentz *et al.*, 2006; Mai *et al.*, 2001). Os autores atribuíram a redução da resistência à tração do polipropileno com a incorporação da alumina, a baixa adesão interfacial que favorece a descolagem das partículas de alumina da matriz. No entanto, a incorporação de PP-g-AM em conjunto com Al₂O₃ (amostras #2 – (88/6/6)%, #7 – (91/6/3)%, #8 – (91/3/6)%, #9 – (94/3/3)%) resultaram em aumento da resistência dos materiais. Esse resultado demonstra que o PP-g-AM atua como agente compatibilizante dos compósitos PP/Al₂O₃ melhorando a adesão interfacial entre a carga e a matriz (Pérez *et al.*, 2013) e de acordo com os resultados de módulo de elasticidade dos materiais em estudo, promovendo a dispersão das partículas de alumina. A adição do compatibilizante no teor de 3% ao polipropileno contribui para o aumento da resistência à tração. Esse resultado deverá ser avaliado com maior profundidade. Uma das hipóteses é que a incorporação do compatibilizante promova o aumento da cristalinidade ou modifique a forma dos cristais do polipropileno.

Considerando o erro envolvido na determinação da resistência à tração, a incorporação do teor de 3 e 6% do compatibilizante à mistura de PP/Al₂O₃ são suficientes para obter o valor ótimo dessa propriedade. O aumento da resistência à tração da amostra #8 (91/3/6)% foi de cerca de 3,8% em comparação com a do polipropileno.

A superfície de resposta derivada do planejamento estatístico efetuado pelo Minitab para avaliar o efeito da variação da composição das misturas sobre a resistência à tração do polímero puro e das misturas PP/PP-g-AM/Al₂O₃ é apresentada na Figura 3.

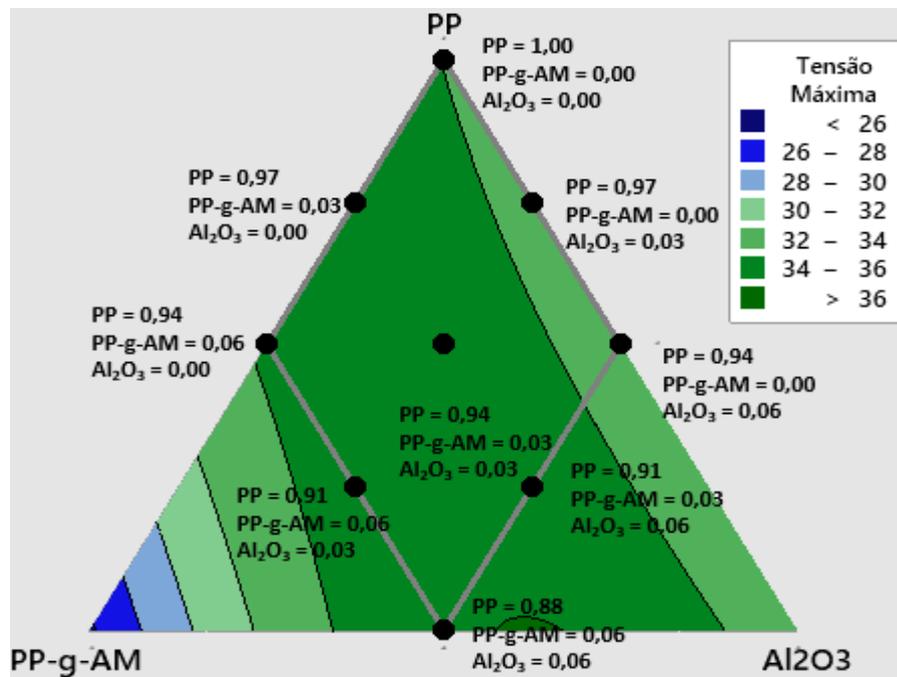


Figura 3 – Ilustração da superfície de resposta para resistência à tração (Minitab - opção proporção de componentes).

Através da superfície de resposta para a resistência à tração é possível observar que valores mais baixos são obtidos quando a alumina é incorporada ao polímero, sem a adição do agente compatibilizante, que é essencial para a obtenção de resistência. A Figura 3 mostra que nas misturas ternárias os valores de resistência à tração são similares. A análise mostrou que os pontos escolhidos

para o projeto de misturas se situam dentro da região com valores mais altos de resistência a tração. A adição do compatibilizante até um dado teor ao polipropileno não promove a redução da resistência à tração do polímero. Esse resultado deverá ser avaliado com maior profundidade.

No que diz respeito aos resultados de tenacidade apresentados na Tabela 2, foi observado um valor de desvio padrão relativamente elevado para os experimentos com carga de alumina sem a utilização do compatibilizante (#3 – (94/0/6)% e #5 – (97/0/3)%). O fato de não ter sido usado o compatibilizante nas amostras #3 e #5 pode ter gerado corpos de prova com propriedades não muito similares entre si, ou seja, pouco homogêneos. Nas demais amostras o desvio foi muito baixo, o que demonstra uma homogeneidade dos corpos de prova de cada uma das demais amostras.

Os resultados obtidos mostram que a incorporação da alumina ao PP e na mistura PP/PP-g-AM promove um aumento da tenacidade. Se a baixa adesão interfacial entre a alumina e o polipropileno fosse levada em consideração, a tenacidade decresceria com o aumento do teor da carga inorgânica, uma vez que a falha poderia ocorrer na interface e causar a ruptura prematura do material. Esse resultado não foi observado nesse trabalho. Uma possível explicação seria que devido as baixas concentrações de alumina utilizadas, os vazios causados durante o processo de descolagem da carga da matriz estivessem situados longe uns dos outros. A presença de vazios altera o estado de tensão dentro do material na vizinhança das partículas, aliviando a tensão e reduzindo a tendência de propagação de trincas. Dessa forma, um mecanismo envolvendo a formação de bandas de cisalhamento ocorreria, levando o material a absorver maior quantidade de energia. De qualquer forma, esse efeito se reduziria com o aumento do teor de alumina, uma vez que a distância interpartículas média diminuiria com o aumento do teor de alumina (Lins; Rocha, 2018). Os desvios padrão elevados associados à determinação da tenacidade dificultam a interpretação dos dados. A amostra #8 (91/3/6)%, selecionada como matriz para o desenvolvimento dos compósitos híbridos, por apresentar rigidez e resistência adequada aos objetivos desse trabalho, apresentou aumento no valor de tenacidade de 32% em relação ao PP.

A superfície de resposta derivada do planejamento estatístico efetuado pelo Minitab para avaliar o efeito da variação da composição das misturas na tenacidade do polímero e dos compósitos PP/Al₂O₃ é apresentada na Figura 4.

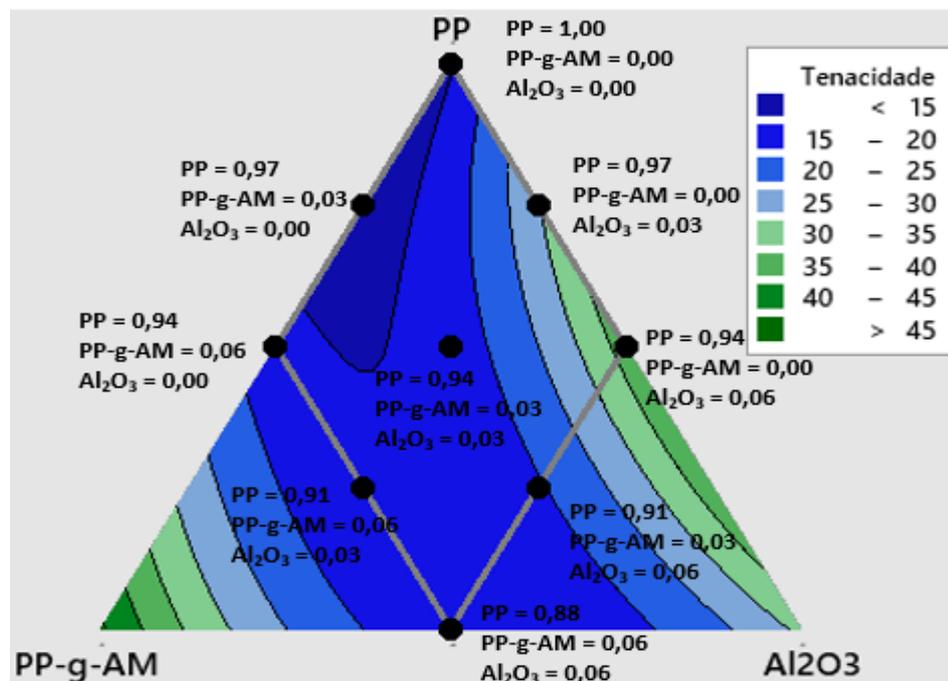


Figura 4 – Ilustração da superfície de resposta para tenacidade (Minitab - opção proporção de componentes).

É possível observar através da análise da Figura 4 que os melhores valores de tenacidade são encontrados quando há a incorporação de alumina na mistura.

Propriedades mecânicas dos compósitos híbridos. Após a escolha de formulação do compósito de polipropileno reforçado com nanopartículas de alumina, a ser utilizado como matriz no desenvolvimento do compósito híbrido - amostra #8 (91/3/6)% - a fibra de carbono foi incorporada ao sistema nas concentrações de 10 e 15%.

A incorporação do elemento de reforço (fibra de carbono) a amostra #8 (91/3/6)% em teor de 10% e de 15% proporcionou um aumento do módulo de elasticidade em tração, de cerca de 25% e de 37%, respectivamente, em relação ao da amostra #8 (91/3/6)%. Em relação ao polipropileno, o aumento foi de 78% e 95%. O aumento do módulo se deve a maior rigidez da fibra de carbono.

A incorporação do elemento de reforço (fibra de carbono) nos teores de 10% e 15% à amostra #8 (91/3/6)% proporcionou um aumento na resistência à tração de cerca de 16% e de 17%, respectivamente em relação a amostra #8. Em relação ao PP, o aumento da resistência à tração foi de 20% ao se adicionar 10% de FC e de 22% ao se adicionar 15% de FC à amostra #8. O aumento da resistência à tração pode estar relacionado a uma transferência de tensão, entre reforço e matriz polimérica, mais eficiente, causada pela adição de fibras de carbono (Lins, 2017).

A redução da tenacidade dos compósitos híbridos com a incorporação de teor de 10% e de 15% de fibra de carbono, em relação a apresentada pela amostra #8 (91/3/6)%, foi de 78% e de 85%, respectivamente. Em relação ao polipropileno, a redução foi de 71% e de 80%, respectivamente. Essa perda de tenacidade pode estar associada ao aumento da rigidez promovido pela adição de fibras de carbono resultando em um material mais rígido. Diante disso, a incorporação de um teor mais baixo de fibra de carbono à matriz pode ser uma solução para não haver um decréscimo tão significativo da tenacidade.

4. Conclusão

O compósito PP/PP-g-AM/Al₂O₃ – (91/3/6) %, foi o que apresentou a melhor combinação de propriedades mecânicas, sendo adotado como matriz para o desenvolvimento de compósitos híbridos. Esse material apresentou valores de módulo de elasticidade, resistência à tração e de tenacidade em torno de 42%, 3,8% e 32%, respectivamente, superiores às apresentadas pelo polipropileno. Esse material, reforçado com 10% e 15% de fibras curtas de carbono, gerou compósitos híbridos, cujos valores de módulo de elasticidade em tração e de resistência à tração, respectivamente, 25% e 16% com a incorporação de 10% de FC, e de 37% e 17% com a incorporação de 15% de FC, superiores aos apresentados pela matriz.

Essas propriedades mecânicas, entretanto, foram obtidas ao custo da redução da tenacidade, que decresceu cerca de 78% e de 85%, com a incorporação de 10% e 15% de fibras de carbono à matriz. Sendo assim, os materiais obtidos podem ser utilizados em aplicações que requeiram leveza, alta produtividade, rigidez e resistência e nas quais a tenacidade sob aplicação de uma carga estática não seja uma propriedade de desempenho requerida.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano (IMA) e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio ao projeto.

Referências

- Agrawal, A., & Satapathy, A. (2014). Thermal and dielectric behaviour of polypropylene composites reinforced with ceramic fillers. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(1), 103–112. <https://doi.org/10.1007/s10854-014-2370-8>
- Akil, H. M., Lily, N., Razak, J. A., Ong, H., & Ahmad, Z. A. (2006). Effect of various coupling agents on properties of alumina-filled PP Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25(7), 745–759. <https://doi.org/10.1177/0731684406062068>
- Arao, Y., Yumitori, S., Suzuki, H., Tanaka, T., Tanaka, K., & Katayama, T. (2013). Mechanical properties of injection-molded carbon fiber/polypropylene composites hybridized with nanofillers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 55, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.08.002>
- Burlein, G. A. D., & CPF:80411673734. (2010, February 5). *Avaliação Das propriedades de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), Poli(3-Hidroxibutirato) (PHB) e de Suas Misturas com torta de Mamona*. BDTD. Retrieved February 2, 2023, from <https://www.bdttd.uerj.br:8443/handle/1/8046>
- Callister, W. D. (2002). *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução*. LTC.
- Coscione, A. R., Andrade, J. C., & May, G. M. (2005). O modelamento Estatístico de Misturas: Experimento Tutorial USANDO Voltametria de Redissolução Anódica. *Química Nova*, 28(6), 1116–1122. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422005000600029>
- Eiras, D., & Pessan, L. A. (2009). Mechanical properties of polypropylene/calcium carbonate nanocomposites. *Materials Research*, 12(4), 517–522. <https://doi.org/10.1590/s1516-14392009000400023>
- Li, B., Li, R., & Xie, Y. (2016). Properties and effect of preparation method of thermally conductive polypropylene/aluminum oxide composite. *Journal of Materials Science*, 52(5), 2524–2533. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0546-8>
- Lins, S. A. B., & CPF:01610440692. (2017, August 24). *Desenvolvimento de Compósitos Híbridos de Polietileno carregados com alumina E reforçados com fibra de vidro*. BDTD. Retrieved February 3, 2023, from <https://www.bdttd.uerj.br:8443/handle/1/8037>
- Lins, S. A., Rocha, M. C., & d’Almeida, J. R. (2018). Mechanical and thermal properties of high-density polyethylene/alumina/glass fiber hybrid composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 32(11), 1566–1581. <https://doi.org/10.1177/0892705718797391>
- Macedo, R. M. P. R. de. (2007, May 2). *Aplicação da Metodologia de planejamento de experimentos para formulação de Massas Cerâmicas Para Telhas*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte: Página inicial. Retrieved February 13, 2023, from <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/12873>
- Mai, K., Li, Z., Qiu, Y., & Zeng, H. (2001). Mechanical properties and fracture morphology of Al(OH)₃/polypropylene composites modified by PP grafting with acrylic acid. *Journal of Applied Polymer Science*, 80(13), 2617–2623. <https://doi.org/10.1002/app.1373>
- Marinucci, G. (2011). *Materiais compositos polimericos: Fundamentos e tecnologia*. Google Books. Retrieved February 13, 2023, from https://books.google.com/books/about/Materiais_Compositos_Polimericos.html?id=y87BuAAACAAJ
- Neto, B. B., Scarminio, I. S., & Bruns, R. E. (2010). *Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento Na Ciência e Na Indústria*. Bookman.
- Pedrazzoli, D., Khumalo, V. M., Karger-Kocsis, J., & Pegoretti, A. (2014). Thermal, viscoelastic and mechanical behavior of polypropylene with synthetic boehmite alumina nanoparticles. *Polymer Testing*, 35, 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2014.03.003>
- Pedrazzoli, D., Tuba, F., Khumalo, V. M., Pegoretti, A., & Karger-Kocsis, J. (2013). Mechanical and rheological response of polypropylene/boehmite nanocomposites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(3), 252–265. <https://doi.org/10.1177/0731684413505787>

- Plentz, R. S., Miotto, M., Schneider, E. E., Forte, M. M., Mauler, R. S., & Nachtigall, S. M. (2006). Effect of a macromolecular coupling agent on the properties of aluminum hydroxide/PP composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 101(3), 1799–1805. <https://doi.org/10.1002/app.23558>
- Pérez, E., Alvarez, V., Pérez, C. J., & Bernal, C. (2013). A comparative study of the effect of different rigid fillers on the fracture and failure behavior of polypropylene based composites. *Composites Part B: Engineering*, 52, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.03.035>
- Silva, G. D. A., Alves, K. G. B., Almeida, Y. B., Sanguinetti, R. A., & Yadava, Y. P. (2012). Effect of alumina ceramic powder dispersion on mechanical properties of polypropylene polymers. *Materials Science Forum*, 727-728, 1729–1733. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.727-728.1729>
- Streller, R. C., Thomann, R., Torno, O., & Mülhaupt, R. (2008). Isotactic poly(propylene) nanocomposites based upon Boehmite nanofillers. *Macromolecular Materials and Engineering*, 293(3), 218–227. <https://doi.org/10.1002/mame.200700354>
- Zhang, S., Ke, Y., Cao, X., Ma, Y., & Wang, F. (2011). Effect of al₂o₃ fibers on the thermal conductivity and mechanical properties of high density polyethylene with the absence and presence of compatibilizer. *Journal of Applied Polymer Science*. <https://doi.org/10.1002/app.35579>
- Zhao, H., & Li, R. K. (2005). Crystallization, mechanical, and fracture behaviors of spherical alumina-filled polypropylene nanocomposites. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 43(24), 3652–3664. <https://doi.org/10.1002/polb.20654>