



indústria automotiva sustentável na Malásia [2] e compósitos reforçados com fibras de kenaf (fibra do cânhamo do hibisco) para aplicações em materiais de construção [3].

O modelo industrial tradicional baseia-se no princípio da economia linear – “take, make and dispose” [4]. O crescimento populacional e a forma como os recursos vêm sendo explorados estão afetando diretamente o meio ambiente. Para garantir a existência de fontes de energia e de matéria prima para as gerações futuras, bem como a manutenção de todas as formas de vida no planeta, há necessidade de mudança na forma como esses recursos são explorados: da economia linear para a circular.

A economia circular pode ser definida como um sistema regenerativo no qual recursos utilizados, resíduos, emissões e perda de energia são minimizados por meio de diminuição, fechamento e estreitamento dos ciclos de energia e de material [5]. Na ótica da economia linear, um resíduo com fibra natural é visto apenas como resíduo e não possui valor de mercado. Na perspectiva da economia circular, esse material pode deixar de ser refugo e se tornar subproduto de um processo produtivo e, dessa forma, ser capitalizado.

Como o resíduo tem natureza mista, pois é constituído de material biodegradável (fibras naturais) e plástico não biodegradável, optou-se pelo desenvolvimento de um material durável e de alta performance. Desta forma, aumenta-se o ciclo de vida dos produtos fabricados com o novo material, diminuindo o fluxo de descarte na natureza [6].

Experimental

Materiais

Foi utilizado como matriz do compósito o polipropileno homopolímero reciclado cedido pela empresa Polikem, com MFI de 45 g/10min a 230 °C e com 2,16 kg de carga. O resíduo utilizado como reforço mecânico no compósito foi cedido pela empresa Tapetes São Carlos e possui composição aproximada de 40% em massa de fibras de juta e 60% em massa de PP. Foi utilizado como aditivo de reforço o nanocarbonato de cálcio (NC) WINNOFIL® SPT, com tamanho de partícula de 50-100 nm (informado pelo fabricante), cedido pela empresa IMERYS. Esse material possui tratamento superficial com ácido esteárico.

Métodos

Foram testadas 4 diferentes composições. A nomenclatura adotada e porcentagens em massa de cada componente presente na composição estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 - Composições e respectivas porcentagens em massa de cada componente

Composição	PP (%)	Resíduo (%)	NC (%)
PP	100	-	-
PPNC	90	-	10
PPR	50	50	-
PPRNC	40	50	10

Foi realizada medição de ângulo de contato (AC) no equipamento CAM 101 e software CAM 2008 versão 4.04, ambos da marca KSV Instruments. Para captura das imagens, foi utilizada câmera modelo DMK 21AF04 da marca The Imaging Source. Foram registradas 40 imagens de cada gota, num intervalo de 16 ms.

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM D638-10 na máquina de ensaio universal da marca Instron modelo 5969, utilizando o software para tratamento de dados Bluehill. Os ensaios foram realizados em duas velocidades diferentes para que fosse possível fraturar todos os corpos de prova dentro do limite de tempo estabelecido pela norma, que é de 30 s a 5 min de ensaio. Foram ensaiados pelo menos 5 corpos de prova de cada amostra.

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de degradação acelerada de acordo com a norma ASTM G151, à temperatura de 50°C, com exposição à radiação UV-A por um período de 22 h/dia,

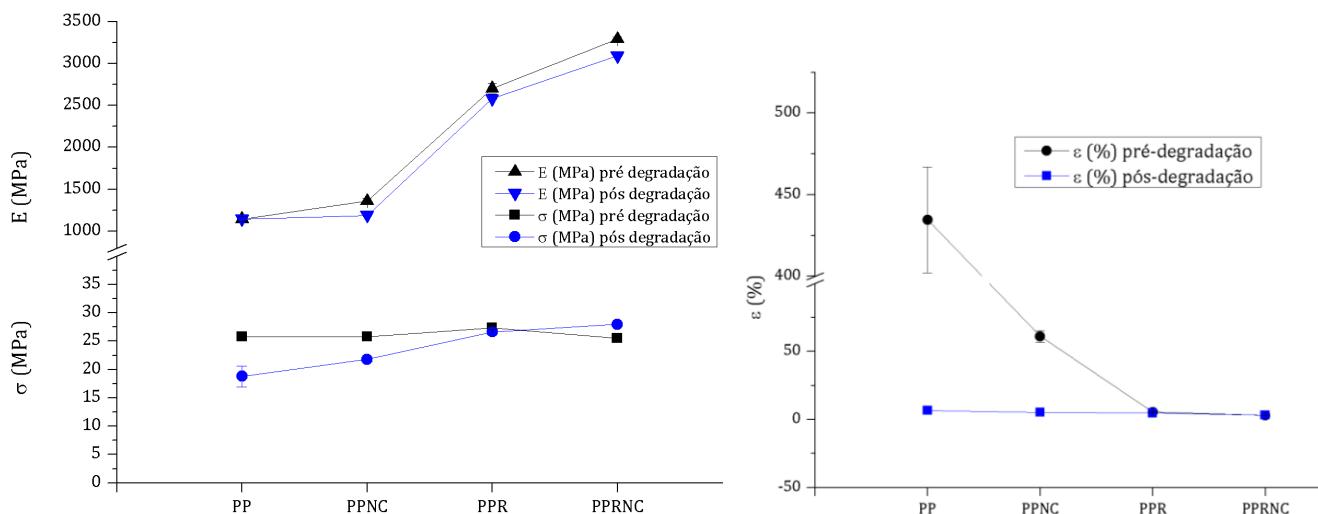
durante 30 dias, resultando num total de 660 h de exposição à radiação UV-A e 720 h de exposição à umidade e ao calor.

Por fim, foi realizado um estudo das aplicações comerciais desses compósitos para garantir que exista aplicabilidade comercial para estes materiais. Esse estudo foi feito por meio da avaliação de especialistas de diversas áreas, aplicando-se a metodologia do Technology Roadmapping (TRM). Foram realizados 3 workshops, nesta ordem: Tecnologia, Mercado e Produto. O workshop de tecnologia teve como objetivo sugerir melhorias nas tecnologias estudadas. O workshop de mercado teve como objetivos identificar, dimensionar e priorizar os potenciais mercados das tecnologias do primeiro workshop. O workshop de produto teve como objetivos identificar e priorizar produtos que podem ser fabricados com as tecnologias desenvolvidas no primeiro workshop.

Resultados e Discussão

A Fig. 1 mostra os resultados de tensão de escoamento (σ), módulo elástico (E) e deformação na ruptura (ε) médios e respectivos valores de desvio padrão para as 4 composições, pré e pós degradação.

Figura 1 – Resultados de módulo elástico, tensão de escoamento e deformação para as 4 composições

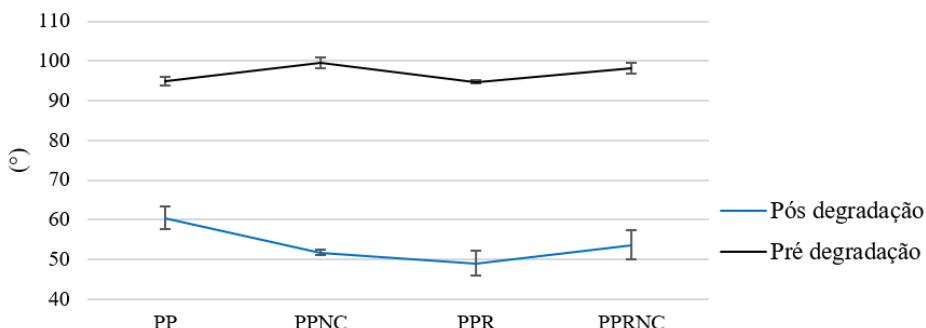


Analizando os resultados para tensão de escoamento pré degradação apresentados na Fig. 1, nota-se que não houve variação significativa para nenhuma das 4 composições, ou seja, tanto o reforço de fibra natural quanto o NC não modificaram a capacidade do material de suportar tensão sem que houvesse deformação plástica. Isso pode ter sido resultado de uma baixa adesão entre a fibra natural e a matriz. Na Fig. 1, nota-se também que a presença de fibra natural na matriz conferiu um aumento de 135 % no módulo elástico e uma diminuição de 435 % para 5 % na deformação na ruptura. O aumento do módulo elástico evidencia que a fibra de juta presente no resíduo atuou como reforço na matriz, como esperado. As fibras diminuem a capacidade de mobilidade entre as cadeias do polímero da matriz, o que faz com que o material se torne mais rígido (aumento de módulo) e menos ductil (queda da quantidade de deformação suportada até a ruptura). Quanto à composição PPNC, nota-se que houve aumento de 18 % no módulo elástico e queda de 435 % para 61 % na deformação na ruptura, resultados que eram esperados e são justificados pelo aumento das restrições à movimentação da matriz causado pela presença das nanopartículas. Analisando as propriedades mecânicas pós degradação, nota-se que a tensão de escoamento sofreu queda significativa apenas na composição PPNC, não apresentando grandes mudanças nas composições com fibra (PPR e PPRNC).

Quanto ao módulo elástico, as composições também não sofreram alterações significativas, sendo que a queda mais expressiva entre as composições com fibra natural foi de 10% (PPRNC). Ambos os resultados são considerados promissores, já que não é desejada a diminuição das propriedades mecânicas dos compósitos quando expostos às intempéries. A deformação suportada até a ruptura caiu significativamente para as composições sem fibra natural, como esperado. Já nas composições com fibra natural, a propriedade não apresentou queda expressiva. Este resultado também é considerado promissor: a diminuição da deformação na ruptura não é desejável, já que reflete em uma queda da tenacidade do material.

Os valores de AC pré e pós degradação estão apresentados na Fig. 2.

Figura 2 - Gráfico comparativo da medida de AC antes e depois do ensaio de degradação acelerada

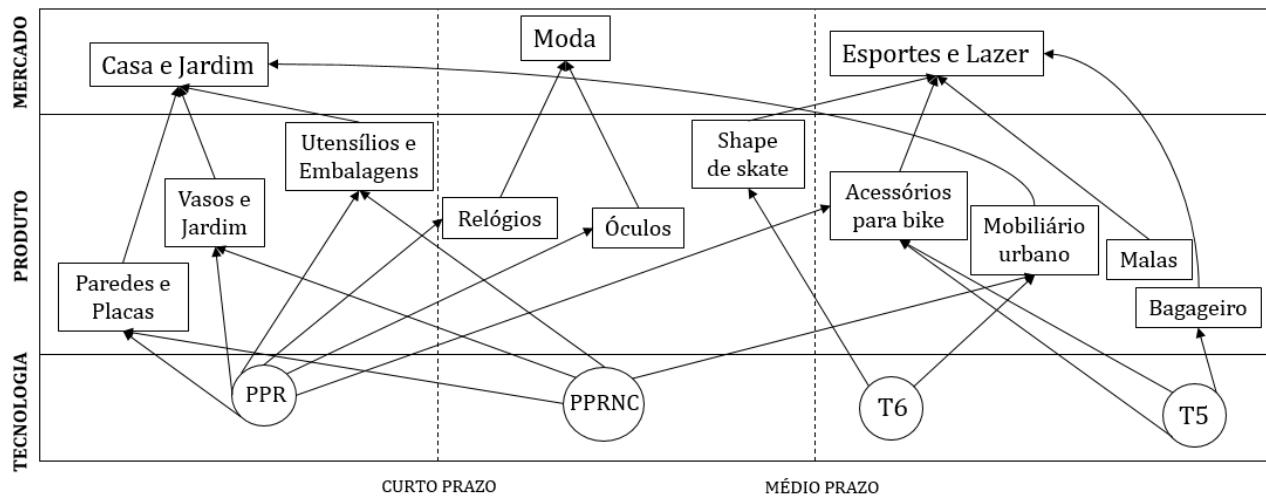


Todos os valores pré degradação estão acima de 90°, indicando que a molhabilidade de todas as superfícies não é favorável. Este resultado é muito relevante do ponto de vista comercial, já que na grande maioria das aplicações, não é desejável que a superfície do produto em questão absorva água. A amostra PPR foi a que obteve menor AC, como esperado. As fibras naturais são hidrofílicas e também possuem superfície irregular, facilitando a entrada da água pela superfície do material, nos pontos em que a fibra natural está exposta. A amostra PPNC apresentou AC superior ao do PP puro. Destaca-se o resultado obtido para a amostra PPRNC, que tem valor maior do que PPR e até maiores do que o PP puro, indicando que o NC atuou como agente impermeabilizante, como desejado. Nota-se uma queda expressiva em todos os valores de AC pós degradação, sendo que a maior queda foi de 50% e a menor de 30%. Para ângulos de contato da água menores de 90°C a molhabilidade da superfície é favorecida [7], o que fica evidente para todas as composições pós degradação. Este resultado era esperado, dado que a degradação se inicia na superfície dos corpos de prova, fazendo com que esta fique porosa e favoreça, desta forma, a entrada de água. O AC das composições com fibra natural pós degradação foi em média menor, já que estas possuem hemicelulose e celulose, estruturas que se degradam termicamente, e lignina, que se degrada sob radiação UV.

O resultado da análise de viabilidade comercial através do método do TRM encontra-se na Fig. 3. As tecnologias T5 (poliamida + fibra de carbono) e T6 (poliamida + NC) foram sugeridas durante o workshop de tecnologia. Para a tomada de decisão de qual tecnologia seria utilizada para fabricação de cada família de produto, foram utilizadas informações de propriedades das tecnologias (workshop 1) e vantagens e desvantagens de cada uma das famílias (informações discutidas durante o workshop 3). A cronologia foi realizada de acordo com o grau de complexidade das tecnologias: as menos complexas (considerando tanto a composição quanto o número de componentes) foram posicionadas no início (curto prazo), já que estas demandam menos recursos para serem processadas.

Durante o workshop de tecnologia não foram sugeridos aditivos específicos para os materiais porém, a partir da observação dos mercados e famílias de produtos, podem ser propostas algumas propriedades relevantes para dadas aplicações, tais como: retardante de chamas, estabilizantes anti-UV, agentes anti-estáticos, entre outros.

Figura 3 - Technology Roadmap resultante da aplicação do método



Conclusões

A utilização do NC foi eficiente, pois conseguiu-se maximizar a quantidade de resíduo (com utilização de partículas nanométricas) e as propriedades mecânicas e de impermeabilidade tiveram melhoras significativas. O compósito que apresentou melhores propriedades mecânicas sob tração e molhabilidade mais baixa foi o PPRNC. Sob degradação, o compósito PPRNC também teve o melhor desempenho médio. A aplicação do método do TRM permitiu a identificação de produtos que podem ser fabricados com as tecnologias estudadas na primeira etapa. Os materiais apresentaram propriedades, composições e possibilidades de processamento que se adequam a diversos produtos e mercados, demonstrando seu grande potencial comercial. A realização desta última etapa foi muito enriquecedora do ponto de vista acadêmico, dando ao trabalho um caráter interdisciplinar ao somar a avaliação das aplicações comerciais do material estudado, um resultado considerado de extrema importância pelas pesquisadoras.

Agradecimentos

À CAPES pelo auxílio financeiro, aos participantes dos workshops, à UFSCar e à Embrapa.

Referências

1. T. Townsend, J. Sette, Natural fibres and the world economy, *RILEM Bookseries*. 2016.
2. F.M. Al-Oqla, S.M. Sapuan, Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: Feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry, *J. Clean. Prod.* 2014, 66, 347–354.
3. N. Saba, M.T. Paridah, M. Jawaid, Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite: A review, *Constr. Build. Mater.* 2015, 76, 87–96.
4. E. Macarthur, Ellen Macarthur Towards a Circular Economy, *J. Ind. Ecol.* 2006, 10, 4–8.
5. M. Geissdoerfer, P. Savaget, N.M.P. Bocken, E.J. Hultink, The Circular Economy – A new sustainability paradigm?, *J. Clean. Prod.* 2017, 143, 757–768.
6. Y.S. Song, J.R. Youn, T.G. Gutowski, Composites : Part A Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites, *Compos. Part A*. 2009, 40, 1257–1265.
7. T. Zhao, L. Jiang, Contact angle measurement of natural materials, *Colloids Surfaces B Biointerfaces*. 2018, 161, 324–330.