

# Atributos de compósitos termoplásticos com detritos plásticos e vegetais

Bernardo Zandomenico Dias

Universidade Federal do Espírito Santo, Laboratório de Planejamento e Projetos, Vitória, Espírito Santo, Brasil  
[bernardozdias@gmail.com](mailto:bernardozdias@gmail.com)

João Luiz Calmon

Universidade Federal do Espírito Santo, Department of Civil Engineering, Vitória, Espírito Santo, Brasil  
[calmonbarcelona@gmail.com](mailto:calmonbarcelona@gmail.com)

Cristina Engel de Alvarez

Universidade Federal do Espírito Santo, Laboratório de Planejamento e Projetos, Vitória, Espírito Santo, Brasil  
[cristina.engel@ufes.br](mailto:cristina.engel@ufes.br)

**ABSTRACT:** This research aimed to investigate the implication in resistance to mechanical stress, water absorption, discoloration, oxidation and flammability, of inserting plastic and wood waste into the formulation of thermoplastic composites. The method used consisted of analysis of scientific papers published in the *Scopus* and *Web of Science* databases, prioritizing research published after the year 2000. Papers were grouped according to the type of composite analyzed (virgin or recycled, and with or without wood waste) and as to the properties studied. The result is an overview of the knowledge about some basic characteristics of the material verifying, e.g., that composites made from recycled polymers tend to discolor like those manufactured with virgin polymers, but have reduced resistance to oxidation what affects their useful life.

**RESUMO:** Esta pesquisa objetivou investigar a implicação na resistência aos esforços mecânicos, na absorção de água, na descoloração, na oxidação e na inflamabilidade, da inserção de resíduos plásticos e vegetais na formulação de compósitos termoplásticos. O método utilizado consistiu da análise de trabalhos científicos publicados nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, priorizando pesquisas divulgadas após o ano 2000. Os trabalhos foram agrupados quanto ao tipo de compósito analisado (virgem ou reciclado, e com ou sem resíduos vegetais) e quanto às propriedades estudadas. O resultado é um panorama do conhecimento atual a respeito de algumas características básicas do material verificando-se, por exemplo, que compósitos fabricados com polímeros reciclados tendem a descolorir de forma semelhante aos fabricados com polímeros virgens, porém têm a resistência à oxidação reduzida, o que afeta sua vida útil.

## 1 INTRODUÇÃO

Já empregados na construção civil para a confecção de pisos, mesas e bancos, por exemplo, os compósitos termoplásticos apresentam um grande potencial de absorção de resíduos, como os de origem plástica e vegetal, trazendo consigo a expectativa de reduzir a quantidade de lixo destinada aos aterros e de materiais virgens necessários à produção de novos componentes (Kazemi-Najafi et al. 2006).

Conforme Klyosov (2007), nos Estados Unidos, na produção de compósitos termoplásticos com madeira, ou Wood-Plastic Composites (WPCs), são amplamente empregados, a fim de substituir parte da matriz polimérica virgem, resíduos de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), de Polipropileno (PP) e de Poli(Cloreto de Vinila) (PVC). Geralmente, resinas poliméricas produzidas a partir de resíduos plásticos, provenientes do lixo urbano, custam menos que resinas virgens, sendo a redução do custo final dos produtos um dos principais atrativos para o uso de resíduos plásticos (Adhikary et al. 2008).

Por sua vez, cargas vegetais são empregadas em larga escala em compósitos termoplásticos principalmente para substituir parte da matriz polimérica, variando algumas características do compósito para melhor, enquanto outras para pior, e barateando o produto final (Klyosov 2007). Segundo o autor, as cargas vegetais mais empregadas nos WPCs fabricados no Estados Unidos são: farinha de madeira, serragem e casca de arroz, sendo que estas cargas são tipicamente resíduos da indústria madeireira e da agroindústria.

Há também cargas vegetais que possuem o papel de melhorar consideravelmente algumas características mecânicas do compósito, que são as chamadas cargas reforçadoras (Azwa et al. 2013). Entre elas estão as fibras de cânhamo, juta, sisal e algodão. Estas cargas muitas vezes são resíduos de processos industriais, entretanto, devido à pouca quantidade existente ou ao elevado custo, ainda não são empregadas em larga escala (Klyosov 2007).

De modo geral, o emprego de resíduos plásticos e vegetais na produção de compósitos termoplásticos já ocorre em escala comercial. Porém, algumas de suas implicações ainda não são conhecidas ou não estão totalmente compreendidas, o que pode acarretar na escolha de um compósito com determinada composição para locais ou usos para os quais ele não seria recomendado, além de levar a comportamentos do material aos quais não se esperava.

## **2 OBJETIVO**

O objetivo da pesquisa, que faz parte de um trabalho maior, foi investigar a implicação na resistência aos esforços mecânicos, na absorção de água, na descoloração, na oxidação e na inflamabilidade, da inserção de resíduos plásticos e vegetais na formulação de compósitos termoplásticos.

## **3 METODOLOGIA**

A primeira etapa do trabalho consistiu da busca por pesquisas científicas, realizada nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, priorizando trabalhos publicados após o ano 2000. Para isso foram adotadas palavras-chave como “wood plastic composites”, “polymer oxidation”, “wood plastic UV”, “wood plastic composites water absorption”, “wood plastic composites flammability”, “recycled composites”, “recycled composites oxidation”, e “recycled polymer water absorption”. As buscas foram feitas entre novembro de 2013 e julho de 2014, selecionando-se 23 títulos, em idioma inglês e português, sendo alguns de revisão de literatura e outros experimentais. Os trabalhos foram posteriormente agrupados quanto ao tipo de compósito analisado (virgem ou reciclado, e com ou sem cargas vegetais) e quanto às propriedades estudadas (resistência aos esforços mecânicos, absorção de água, descoloração, oxidação e inflamabilidade). Em seguida, foram feitas a análise das pesquisas selecionadas e as considerações a respeito da concordância ou discordância dos resultados encontrados em cada uma, além de possíveis explicações para as diferenças verificadas.

## **4 RESULTADOS**

Agruparam-se os resultados segundo o tema estudado – resistência aos esforços mecânicos, absorção de água, descoloração, oxidação e inflamabilidade –, conforme a seguir detalhado.

### **4.1 Resistência aos esforços mecânicos**

Há vários esforços aos quais componentes podem ser submetidos, como flexão, compressão axial, tração axial, punção, entre outros. Assim, determinadas variações na formulação de compósitos – tanto nos constituintes como em sua proporção – podem resultar em melhoria de resistência a determinado esforço, porém em piora de resistência a outro, tornando sua utilização apropriada apenas para determinadas situações (Klyosov 2007).

#### **4.1.1 Resistência aos esforços mecânicos de compósitos termoplásticos fabricados com resíduos plásticos**

Adhikary et al. (2008) realizaram testes de resistência à flexão e à tração, e também de avaliação do módulo de elasticidade nos quais compósitos fabricados com matriz plástica de PEAD virgem foram comparados aos fabricados com matriz plástica de PEAD reciclado. Nesse estudo analisou-se compósitos com as seguintes formulações: 100% PEAD; 60% PEAD e 40% farinha de madeira; e 50% PEAD e 50% farinha de madeira, em relação à massa total do compósito. Os autores chegaram à conclusão que os compósitos feitos com matriz plástica reciclada obtiveram desempenho semelhante estatisticamente aos feitos com matriz plástica virgem.

Outro estudo, realizado por Kazemi-Najafi et al. (2006), após a execução de ensaios mecânicos (dentre eles resistência à tração, à flexão e ao impacto Izod, e ao módulo de elasticidade) com compósitos fabricados a partir de PEAD e PP de origem virgem e reciclada, também relata que os resultados dos ensaios de resistência à tração e à flexão, e de módulo de elasticidade encontrados foram estatisticamente semelhantes. Já para o impacto Izod, os compósitos com matriz plástica virgem e reciclada de PP apresentaram desempenho estatisticamente iguais, diferentemente dos compósitos com matriz de PEAD, cujas maiores resistências foram as dos elementos com matriz plástica virgem.

Beg & Pickering (2008), em sua pesquisa, realizaram ensaios de resistência à tração e ao impacto Charpy, e de módulo de elasticidade com componentes feitos 100% de PP virgem ou reciclado. Primeiramente, o componente produzido a partir de resina virgem era testado mecanicamente e, em seguida, passava por um processo de reciclagem (que incluía aquecimento e depois resfriamento do material) para produzir um novo elemento similar ao anterior que, por sua vez, era testado mecanicamente e passava por um novo processo de reciclagem para produzir um novo elemento similar aos anteriores. Esse ciclo se repetiu até que o plástico chegasse à 8ª reciclagem. Com os dados dos ensaios mecânicos os autores mostram que a resistência à tração e o módulo de elasticidade dos componentes se mantinham estatisticamente iguais após cada ciclo de reciclagem. Entretanto, no teste de resistência ao impacto Charpy, a cada reciclagem realizada o valor obtido era inferior ao anterior, ou seja, a resistência do componente diminuía com o aumento do número de reciclagens. Segundo os autores, isto pode ser devido à redução da massa molecular do PP causada pelos processos de reciclagem. Também ressaltam que a reciclagem de compósitos expostos às intempéries deve ser estudada, já que as reciclagens feitas no estudo ocorreram sem esse fator, não representando as situações reais.

Kazemi-Najafi (2013), em revisão de literatura, corrobora com os resultados citados anteriormente, mostrando vários estudos com compósitos fabricados a partir de plásticos reciclados que indicam uma não variação, em termos estatísticos, do desempenho aos esforços de tração, flexão e do módulo de elasticidade dos componentes, e um decréscimo em sua resistência ao impacto.

Assim, as pesquisas mostram que o uso de resíduos plásticos na produção de compósitos tende a não alterar o módulo de elasticidade e as resistências à flexão e à tração, porém, tende a reduzir sua resistência ao impacto.

#### **4.1.2 Resistência aos esforços mecânicos de compósitos termoplásticos fabricados com cargas vegetais**

Adhikary et al. (2008) realizaram ensaios de resistência à flexão e à tração, e de módulo de elasticidade em compósitos com matriz plástica de PEAD e farinha de madeira. Os dados dos testes mostram que quanto maior a quantidade de carga vegetal presente na formulação do compósito menor é sua resistência à flexão e à tração, porém, houve aumento do módulo de elasticidade com a inserção de farinha de madeira em sua composição. No entanto, os autores ressaltam que a queda na resistência à tração e à flexão dos compósitos é devida à má aderência

entre a matriz plástica e a carga vegetal, que pode ser melhorada com o uso de aditivos denominados agentes acoplantes.

Kuo et al. (2009), após a realização de ensaios de resistência à flexão e à tração em compósitos com matriz polimérica de PP com diversas quantidades de farinha de madeira (0%, 28%, 47%, 52%, 56% e 66% da massa total do compósito), mostram que os compósitos com farinha de madeira que apresentaram melhor desempenho no ensaio de resistência à tração possuíam valores de resistência acima dos que eram 100% PP, mas muito próximo a estes. No entanto, os elementos feitos 100% de PP foram os que obtiveram menor resistência à flexão, enquanto os compósitos com 47% de farinha de madeira foram os que alcançaram maior resistência a este esforço. Em todos os compósitos utilizou-se 6% de aditivos, sendo 3% de estereato de zinco como lubrificante – que auxilia no processamento e fabricação dos compósitos (Butylina et al. 2012a) – e 3% de PP modificado com Anidrido Maléico (MAPP) como agente acoplante. Segundo os autores, os dados sugerem que a quantidade ótima de farinha de madeira em compósitos, considerando as propriedades mecânicas, deve ser no máximo 50% de sua massa total.

Já Stark & Rowlands (2003) realizaram ensaios de resistência à flexão e à tração, e de módulo de elasticidade em compósitos com nove formulações: 100% PP; 80% PP e 20% farinha de madeira; 80% PP e 20% fibra de madeira; 60% PP e 40% farinha de madeira; 60% PP e 40% fibra de madeira (em relação à massa total do compósito); e outros quatro tipos com a mesma composição que os quatro últimos citados, porém com a presença de agentes acoplantes (MAPP). Ressalta-se que a fibra de madeira se diferencia da farinha de madeira por seu formato alongado, visto que a farinha de madeira possui formato tendendo ao granular. Os resultados dos ensaios mostram que com o aumento da quantidade de carga vegetal (tanto farinha quanto fibra de madeira) presente nos compósitos registrou-se aumento da resistência à flexão e do módulo de elasticidade, porém, diminuição da resistência à tração. Por outro lado, quando os agentes acoplantes foram inseridos, ocorreu um crescimento significativo estatisticamente das três propriedades avaliadas com o aumento da carga vegetal. Este crescimento foi maior ainda para os compósitos com fibra de madeira.

Desse modo, apesar de alguns estudos apresentarem resultados opostos, observa-se uma tendência de aumento da resistência à flexão e do módulo de elasticidade, e de diminuição da resistência à tração dos compósitos com o aumento da carga vegetal em sua composição.

Ressalta-se que compósitos com cargas vegetais em forma de fibra de modo geral apresentam resistência à flexão diretamente proporcional à quantidade de fibras empregadas em sua composição (Klyosov 2007), exibindo desempenho superior aos elementos puramente plásticos e, também, superior àqueles que possuem cargas vegetais em formato tendendo ao granular, como serragem e farinha de madeira que, por sua vez, podem causar uma queda na resistência do compósito a esse esforço (Stark & Rowlands 2003, Klyosov 2007).

## **4.2 Absorção de água**

Elementos feitos exclusivamente de plástico praticamente não absorvem água. Porém, quando são utilizadas cargas minerais e, principalmente, cargas vegetais em sua formulação pode haver uma elevação acentuada da absorção de água do compósito (Klyosov 2007). A água é absorvida pelos compósitos através de seus poros e canais, e por capilaridade, podendo causar nas peças consequências como: variação dimensional, que pode resultar em ondulações do elemento e pressão sobre componentes adjacentes; redução da resistência mecânica; e proliferação de micro-organismos sobre o material (Klyosov 2007, Azwa et al. 2013).

### **4.2.1 Absorção de água por compósitos termoplásticos fabricados com resíduos plásticos**

Adhikary et al. (2008) fizeram testes de absorção de água (por 2h e 24h) e medições na espessura dos componentes para detectar eventuais inchamentos devidos à absorção da água. Analisou-

se compósitos com matriz plástica reciclada e virgem de PEAD. Ao final dos testes, para ambos os grupos de compósito (feitos com matriz plástica reciclada e com matriz plástica virgem), os resultados foram estatisticamente semelhantes, tanto para a quantidade de água absorvida quanto para o aumento na espessura das peças, possuindo alguns compósitos fabricados com matriz plástica reciclada, resultados melhores que os fabricados com matriz plástica virgem.

Por outro lado, pesquisa experimental como a de Kazemi-Najafi et al. (2007) e revisão de literatura de Kazemi-Najafi (2013) apontam para uma maior absorção de água de compósitos feitos a partir de plásticos reciclados quando comparados aos feitos a partir de plásticos virgens.

Assim, considera-se que ainda há variação não compreendida nos resultados dos experimentos das pesquisas mostradas, necessitando, por isso, que mais pesquisas sejam realizadas a fim de compreender os mecanismos que regem a absorção de água de polímeros reciclados e virgens.

#### **4.2.2 Absorção de água por compósitos termoplásticos com cargas vegetais**

Chow et al. (2007) realizaram testes de absorção de água em compósitos com matriz plástica de PP, agentes acoplantes (MAPP) e fibras de sisal nas seguintes proporções, respectivamente: 81%/9%/10%, 62%/18%/20%, 43%/27%/30%. A absorção de água dos compósitos ao final dos testes, em relação à sua massa inicial, foi de aproximadamente 1,5%, 4% e 6% respectivamente.

Rowell et al. (2002) também realizaram testes de absorção imergindo em água por 10 semanas compósitos feitos de PP e farinha de madeira nas seguintes proporções, respectivamente: 100%/0%, 70%/30%, 60%/40%, 50%/50% e 40%/60%. A absorção de água dos compósitos no fim do período foi cerca de 0%, 3%, 5%, 9% e 11% de sua massa inicial, respectivamente. Com isso, observa-se claramente a relação direta entre a quantidade de cargas vegetais presentes nos compósitos termoplásticos e sua absorção de água, sendo a absorção de água do componente feito exclusivamente de PP igual a aproximadamente 0% de sua massa inicial.

Estudos experimentais feitos por Adhikary et al. (2008) com compósitos com matriz plástica de PEAD e farinha de madeira, e revisão de literatura realizada por Azwa et al. (2013) corroboram tal conclusão, evidenciando que quanto maior a quantidade de cargas vegetais do compósito, maior será sua absorção de água.

#### **4.3 Descoloração**

A descoloração dos compósitos termoplásticos ocorre quando estes são expostos principalmente aos raios solares, que causam a quebra das cadeias moleculares da matriz polimérica o que, por sua vez, leva à mudança de cor do compósito, fundamentalmente ao seu esbranquiçamento e perda de cores amareladas (Klyosov 2007). Além disso, fatores como a presença de umidade podem acelerar consideravelmente a perda de cor (Stark 2005, Azwa et al. 2013). A descoloração, apesar de poder ocorrer simultaneamente a mecanismos que degradam os compósitos termoplásticos e causam perda de suas propriedades físicas e mecânicas, como a oxidação, é um fenômeno relacionado às questões estéticas e de gosto das pessoas (Klyosov 2007, Azwa et al. 2013). É frequentemente medida após testes de envelhecimento acelerado (realizado em laboratório e sob condições controladas) ou envelhecimento natural (realizado ao ar livre e sob condições climáticas reais).

##### **4.3.1 Descoloração em compósitos termoplásticos fabricados com resíduos plásticos**

Butylina et al. (2012a) e Butylina et al. (2012b) realizaram experimentos de envelhecimento natural com compósitos de formulações semelhantes (PP, farinha de madeira, MAPP como agente acoplante, e lubrificante), mas produzidos sem ou com diferentes pigmentos (marrom, cinza ou verde). Os autores constataram que aqueles compósitos que possuíam pigmento marrom ou cinza sofreram menor perda de cor que os fabricados com pigmento verde ou sem pigmento algum, chegando à conclusão que a cor do compósito tem grande importância no nível

de sua descoloração (Butylina et al. 2012a). Já Butylina et al. (2012b) também testaram compósitos feitos a partir de resíduos de PP e os compararam com os fabricados a partir de PP virgem. Após os experimentos de envelhecimento natural, os autores concluíram que os compósitos com matriz reciclada obtiveram menor perda de cor que os com matriz virgem. O melhor desempenho alcançado foi o do compósito de PP reciclado e pigmento cinza, seguidos do compósito de PP virgem e pigmento cinza, PP reciclado e pigmento marrom e dos outros compósitos feitos a partir de PP virgem (Butylina et al. 2012b), demonstrando a relevância da cor do compósito para sua descoloração.

Bajwa & Bruce (2005) apresentam o resultado de sua pesquisa na qual é comparado o nível de descoloração de compósitos de duas cores distintas, sendo uma cor tendendo ao bege e outra ao vermelho, fabricados a partir de resina plástica de PEAD virgem ou reciclada. Após testes de envelhecimento acelerado e envelhecimento natural, os compósitos reciclados obtiveram menor descoloração nos dois tipos de testes para uma cor (vermelha) e maior descoloração, também nos dois tipos de testes, para outra (bege), quando comparados aos compósitos virgens. A partir de tais dados os autores concluem que a principal variável que influencia a perda de cor dos compósitos termoplásticos é a sua cor, sendo a origem da matriz plástica (virgem ou reciclada) não significativa.

A avaliação dos dados colocados pelos autores consultados permite afirmar que tende a não haver influência na descoloração dos compósitos se a matriz polimérica é virgem ou reciclada, no entanto, a cor é um elemento que exerce inquestionável influência.

#### **4.3.2 Descoloração em compósitos termoplásticos fabricados com cargas vegetais**

Em estudo, Stark (2005) executou testes de envelhecimento acelerado em compósitos com matriz plástica de PEAD e cargas vegetais de farinha de madeira. Nos testes realizou-se a exposição dos compósitos aos raios ultravioletas e à umidade. Foram testadas as seguintes composições de PEAD/farinha de madeira, respectivamente: 100%/0%, 90%/10%, 80%/20%, 70%/30%, 60%/40%, 50%/50%, 40%/60%. Os resultados dos testes foram medidos pela variação da cor final do compósito, após o envelhecimento acelerado, em relação à cor inicial, ou seja, antes do envelhecimento acelerado. Os dados mostram uma relação direta entre a quantidade de cargas vegetais existentes no compósito e sua facilidade em desbotar ou esbranquiçar. Como exemplo, a perda de cor do componente de composição 40% PEAD e 60% farinha de madeira foi 2 vezes maior que a do componente de composição 50%/50% que, por sua vez, foi 25 vezes maior que a do componente 90% PEAD e 10% farinha de madeira.

Estudos de Klyosov (2007) e Butylina et al. (2012a) também chegam à conclusão que quanto maior a quantidade de cargas vegetais presentes em um compósito termoplástico, maior será sua facilidade de descolorir quando exposto às intempéries.

#### **4.4 Oxidação**

A oxidação é causada pela exposição dos compósitos termoplásticos aos raios solares, ao calor e ao oxigênio. Além disso, fatores como alta permeabilidade do componente e exposição à água ou umidade aceleram o processo de oxidação do polímero (Klyosov 2007, Li 2000). O processo de oxidação ocorre, em um primeiro momento, quando as cadeias poliméricas da matriz plástica são quebradas devido à ação dos raios solares e do calor. Posteriormente, as cadeias poliméricas quebradas reagem com o oxigênio presente no ar, formando cadeias poliméricas de tamanho muito menor que o original, isto é, causando sua deterioração (Klyosov 2007). Diferentemente da descoloração, a oxidação causa degradação da matriz polimérica, tornando o compósito fraco, quebradiço e suscetível a uma falha mecânica. A facilidade com a qual um polímero oxida é frequentemente mensurada pelo Oxidation Induction Time (OIT), isto é, o tempo necessário para que a oxidação inicie em determinado plástico. O OIT é indicado em teste realizado em ambiente rico em oxigênio e numa dada temperatura. Quanto maior o tempo indicado pelo

teste mais resistente à oxidação é o material e, com isso, mais durável ele tenderá a ser em condições naturais. Klyosov (2007) coloca ainda que, em média, cada 1 minuto suportado pelo plástico no teste equivale de 2 a 20 anos exposto às intempéries em condições naturais.

#### **4.4.1 Oxidação em compósitos termoplásticos fabricados com resíduos plásticos**

Klyosov (2007) explica que resinas poliméricas virgens são fabricadas já com uma porcentagem de substâncias anti-oxidantes, as quais se degradam ao longo da vida útil do plástico e de sua exposição às intempéries. Assim, se após o descarte tais elementos forem enviados a um processo de reciclagem, praticamente não possuirão mais anti-oxidantes. Por isso, compósitos feitos com resíduos plásticos devem ter incorporada à sua composição uma nova dose de anti-oxidantes, caso contrário sofrerão rápida deterioração em condições naturais e apresentarão vida útil inferior a de compósitos fabricados a partir de resinas plásticas virgens.

#### **4.4.2 Oxidação em compósitos termoplásticos fabricados com cargas vegetais**

Experimentos foram realizados por Klyosov (2007) para medir o OIT de compósitos com matriz plástica de PEAD e carga vegetal de casca de arroz nas seguintes proporções, respectivamente: 100%/0%, 90%/10%, 70%/30%, 40%/60%. Os valores observados nos ensaios foram os seguintes: 4,4 minutos; 15,0 minutos; 22,0 minutos e 37,0 minutos, respectivamente. Assim, pode-se observar pelos dados uma relação direta entre o crescimento da quantidade de cargas vegetais presentes nos compósitos e o crescimento de sua resistência à oxidação, sendo o compósito com apenas 10% de matriz plástica substituída por cargas vegetais quase 4 vezes mais resistente à oxidação que o compósito feito exclusivamente de PEAD. Entretanto, ressalta-se que caso iniciado o processo de oxidação de uma peça, a consequência pode ser sua fissuração e descamação. Isso facilita a entrada de água nas camadas inferiores do compósito e o contato dela com a carga vegetal que, por sua vez, tenderá a absorver a água e inchar, provocando o aumento das fissuras e o aparecimento de outras, possibilitando a entrada dos raios solares, de oxigênio e de água em camadas mais profundas, acelerando o processo de oxidação (Klyosov 2007, Azwa et al. 2013, Li 2000).

### **4.5 Inflamabilidade**

Existem vários testes laboratoriais que visam a obtenção de dados sobre a inflamabilidade de um material, sendo que cada um individualmente possibilita analisar um aspecto do processo de queima. Assim, para se ter uma descrição completa da inflamabilidade dos materiais é necessária a realização de vários ensaios (Gallo & Agnelli 1998).

Dentre os testes de inflamabilidade estão o Limited Oxidation Index (LOI), ou índice limite de oxigênio, e a calorimetria de cone. O LOI é um índice que apresenta a facilidade com a qual os materiais poliméricos entram em ignição, medindo a quantidade mínima de oxigênio necessária para que isso aconteça. Assim, quanto maior o LOI, mais resistente à ignição é o polímero (Gallo & Agnelli 1998). Já a calorimetria de cone fornece dados para determinar o tempo de ignição do material, a quantidade total de calor e fumaça liberada durante sua queima, a liberação de calor em relação ao tempo, entre outros aspectos (Wang et al. 2014).

Para diminuir a inflamabilidade dos compósitos termoplásticos, ou seja, aumentar o ponto de ignição e reduzir a velocidade de propagação do fogo, são empregadas em sua formulação substâncias retardadoras de chamas e materiais inertes. Outra opção é o uso de plásticos de baixa inflamabilidade como matriz, como o PVC (Klyosov 2007).

#### **4.5.1 Inflamabilidade de compósitos termoplásticos com resíduos plásticos**

Kwak & Nam (2002) realizaram vários testes de inflamabilidade com compósitos de PP virgem ou reciclado, e com adição de substâncias retardadoras de chama em diferentes proporções.

Entre outros testes, foi feita calorimetria de cone e o ensaio LOI. Os dados dos testes mostram que os elementos com a mesma quantidade de substâncias retardadoras de chama mas compostos por matrizes plásticas de origens distintas, isto é, virgem ou reciclada, apresentaram resultados diferentes, sendo que: no teste LOI, o melhor desempenho foi obtido por elementos compostos por PP reciclado. Já o tempo necessário para entrar em ignição foi menor para os compósitos de PP reciclado, ou seja, entraram em combustão mais rápido, enquanto os maiores picos de calor liberados durante a queima foram os dos compósitos de PP virgem. Quanto à quantidade total de calor liberada durante a queima, os compósitos de PP virgem apresentaram pior desempenho que os de PP reciclado quando possuíam pequenas quantidade de substâncias retardadoras de chama, mas melhor quando possuíam maiores quantidades destas. Os autores apresentam como explicação para o melhor desempenho em vários aspectos dos elementos compostos de PP reciclado a existência de partículas inorgânicas de outros materiais em sua composição. Tais partículas são provenientes de máquinas e outros materiais e se impregnam nos polímeros durante seu processo de separação e reciclagem, sendo mais estáveis termicamente que a matriz polimérica, o que diminui a inflamabilidade dos compósitos.

El-sabbagh et al. (2013) executaram o teste LOI com compósitos formados, em várias proporções, por PP, fibra de linho, agentes acoplantes (MAPP) e substância retardadora de chama (hidróxido de magnésio). Conforme os autores, todos os compósitos foram reciclados duas vezes. Os componentes de todas as formulações tiveram pior desempenho no teste LOI após as reciclagens, apesar dos autores ressaltarem que tal piora foi em nível tolerável. Observa-se que os compósitos de melhor desempenho possuíam índice um pouco acima de 27 no teste LOI antes das reciclagens, e após a primeira e a segunda reciclagem passaram para cerca de 26,8 e 25,9, respectivamente. Isto é, tiveram piora de 4,5% no teste LOI após as duas reciclagens.

Em relação ao LOI de compósitos feitos com PP virgem e reciclado, os estudos apresentados diferem nos resultados. Seguindo o exposto por Kwak & Nam (2002), uma possível explicação é o fato de que os componentes reciclados no estudo de El-sabbagh et al. (2013) passaram por reciclagem em laboratório, provavelmente não sendo misturados a outros materiais e tendo contato com menos máquinas, o que diminuiria a quantidade de partículas inorgânicas incorporadas a eles durante o processo. Mas, ressalta-se o pequeno número existente de pesquisas sobre a influência da reciclagem na inflamabilidade dos polímeros.

#### **4.5.2 Inflamabilidade de compósitos termoplásticos com cargas vegetais**

Sain et al. (2004) executaram o teste LOI e de inflamabilidade horizontal com peças compostas por PP, cargas vegetais e agente acoplante (MAPP) nas seguintes proporções, respectivamente: 100%/0%/0%; 47,5%/50% (farinha de madeira) /2,5% e 47,5%/50% (casca de arroz) /2,5%. Ambos os elementos com cargas vegetais apresentaram pior desempenho no teste de inflamabilidade horizontal quando comparados ao elemento composto unicamente por PP, explicitando uma maior sensibilidade de tais compósitos às chamas (Sain et al. 2004). No entanto, no teste LOI o compósito com farinha de madeira teve desempenho superior e o com casca de arroz desempenho estatisticamente semelhante ao 100% PP.

Arao et al. (2014) realizaram o teste de inflamabilidade horizontal e de calorimetria de cone com elementos com matriz polimérica de PP e farinha de madeira nas seguintes proporções, respectivamente: 100%; 90%/10%; 80%/20%; 70%/30%; 60%/40%; 50%/50% e 40%/60%. Para todas as composições o desempenho dos elementos com farinha de madeira no teste de inflamabilidade horizontal foi pior que o do elemento 100% PP, sendo o pior desempenho o do compósito feito de 60% PP e 40% farinha de madeira. Já no teste de calorimetria de cone, o compósito 50% PP e 50% farinha de madeira entrou em ignição mais rápido que o 100% PP, por outro lado, o pico e o total de calor liberado durante a queima foram menores que os deste.

Por sua vez, Seefeldt & Braun (2011) realizaram ensaios de calorimetria de cone com compósitos de matriz plástica de PP e cargas vegetais nas seguintes proporções, respectivamente: 50%/50%;



40%/60% e 30%/70%. Os resultados dos ensaios mostram que quanto maior a quantidade de cargas vegetais nos compósitos, menores são os picos e a quantidade total de calor liberada durante a queima, melhorando seu desempenho no teste.

Testes de calorimetria de cone também foram realizados por Wang et al. (2014) a fim de identificar o tempo de ignição e a quantidade de calor liberado resultante da queima de elementos compostos por PEAD, fibra de cânhamo e aditivo em várias proporções. Os ensaios mostram que quanto maior a quantidade de cargas vegetais nos compósitos, menores são os picos de calor liberados durante sua queima. No entanto, o tempo de ignição dos elementos com cargas vegetais diminuiu, isto é, entraram em combustão mais rápido, exceto o compósito com a maior quantidade de fibras de cânhamo (50% em massa) que, quando comparado ao componente 100% PEAD, manteve o mesmo desempenho.

Os estudos mostram que o aumento de cargas vegetais nos compósitos tende a melhorar seu desempenho no teste LOI, a piorar no teste de inflamabilidade horizontal, a diminuir seu tempo de ignição e a reduzir os picos e a quantidade total de calor liberada durante a queima.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do estudo dos trabalhos apresentados, podem ser feitas as seguintes afirmações a respeito das propriedades de compósitos termoplásticos com resíduos plásticos e vegetais:

- o uso de resíduos plásticos em compósitos tende a não alterar o módulo de elasticidade e as resistências à flexão e à tração desses, mas, parece reduzir sua resistência ao impacto;
- apesar de alguns estudos mostrarem resultados opostos, observa-se uma tendência de aumento da resistência à flexão e do módulo de elasticidade, e de redução da resistência à tração dos compósitos com o aumento da carga vegetal em sua composição;
- quanto à absorção de água de polímeros virgens e reciclados, os trabalhos analisados apresentam resultados opostos, o que abre espaço para que mais pesquisas sejam feitas;
- maior a quantidade de cargas vegetais do compósito, maior será sua absorção de água;
- a matriz polimérica ser virgem ou reciclada parece não influenciar a descoloração dos compósitos, por outro lado, a cor destes parece ser de fundamental importância para tal;
- quanto maior a quantidade de cargas vegetais presentes em um compósito termoplástico, maior será sua facilidade de descolorir quando exposto às intempéries;
- há poucos artigos sobre a influência da reciclagem na inflamabilidade dos polímeros, apontando para a necessidade de mais pesquisas científicas na área.

Assim, os resultados dos estudos indicam que os resíduos plásticos são uma promissora fonte de matéria-prima para a confecção de compósitos termoplásticos, uma vez que proporcionam, em várias propriedades, desempenho semelhante aos de compósitos feitos com plásticos virgens. Além disso, apesar dos estudos mostrarem uma tendência de piora do desempenho dos compósitos em determinadas características quando se adicionam cargas vegetais, principalmente aquelas relacionadas à exposição às intempéries, seu uso pode ser indicado para ambientes internos, onde tenderão a ter maior vida útil. Ainda, pesquisas apontam para uma melhoria de várias características dos compósitos com cargas vegetais por meio da inserção de aditivos, o que tende a aumentar sua vida útil também quando em áreas externas.

Tais fatos mostram que, se corretamente especificados, os compósitos termoplásticos com resíduos podem ter maior durabilidade e ser uma alternativa a outros materiais, reduzindo o impacto ambiental causado pela disposição de resíduos e pela extração de novos materiais.

## 6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio à pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Adhikary, K.B., Pang, S. & Staiger, M.P. 2008. Dimensional stability and mechanical behaviour of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composites Part B: Engineering* 39(5): 807–815.
- Arao, Y. et al. 2014. Improvement on fire retardancy of wood flour/polypropylene composites using various fire retardants. *Polymer Degradation and Stability* 100: 79–85.
- Azwa, Z.N. et al. 2013. A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials & Design* 47: 424–442.
- Bajwa, D.S. & Bruce, D. 2005. Improvements in weathering characteristics of wood-plastic composites. In *Eighth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites*. Madison: Forest Products Society.
- Beg, M.D.H. & Pickering, K.L. 2008. Reprocessing of wood fibre reinforced polypropylene composites. Part I: Effects on physical and mechanical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 39(7): 1091–1100.
- Butylina, S., Hyvärinen, M. & Kärki, T. 2012a. A study of surface changes of wood-polypropylene composites as the result of exterior weathering. *Polymer Degradation and Stability* 97(3): 337–345.
- Butylina, S., Hyvärinen, M. & Kärki, T. 2012b. Weathering of wood-polypropylene composites containing pigments. *European Journal of Wood and Wood Products* 70(5): 719–726.
- Chow, C., Xing, X. & Li, R. 2007. Moisture absorption studies of sisal fibre reinforced polypropylene composites. *Composites Science and Technology* 67(2): 306–313.
- El-sabbagh, A., Steuernagel, L. & Ziegmann, G. 2013. Low combustible polypropylene/flax/magnesium hydroxide composites: mechanical, flame retardation characterization and recycling effect. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 32(14): 1030–1043.
- Gallo, J.B. & Agnelli, J.A.M. 1998. Aspectos do comportamento de polímeros em condições de incêndio. *Polímeros: Ciência e Tecnologia* 8(1): 23–38.
- Kazemi-Najafi, S. 2013. Use of recycled plastics in wood plastic composites - a review. *Waste Management* 33(9): 1898–905.
- Kazemi-Najafi, S. et al. 2007. Water absorption behavior of composites from sawdust and recycled plastics. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 26(3): 341–348.
- Kazemi-Najafi, S., Hamidinia, E. & Tajvidi, M. 2006. Mechanical properties of composites from sawdust and recycled plastics. *Journal of Applied Polymer Science* 100(5): 3641–3645.
- Klyosov, A.A. 2007. *Wood-Plastic Composites*, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Kuo, P.-Y. et al. 2009. Effects of material compositions on the mechanical properties of wood–plastic composites manufactured by injection molding. *Materials & Design* 30(9): 3489–3496.
- Kwak, S.-B. & Nam, J. 2002. Thermo-oxidative stability study of polypropylene composites by using cone calorimetry and thermogravimetry. *Polymer Engineering and Science* 42(8): 1674–1685.
- Li, R. 2000. Environmental degradation of wood-HDPE composite. *Polymer Degradation and Stability* 70: 135–145.
- Rowell, R.M., Lange, S.E. & Jacobson, R.E. 2002. Effects of moisture on aspen-fiber/polypropylene composites. In *Progress in Woodfibre-Plastic Composites*. Toronto.
- Sain, M. et al. 2004. Flame retardant and mechanical properties of natural fibre–PP composites containing magnesium hydroxide. *Polymer Degradation and Stability* 83(2): 363–367.
- Seefeldt, H. & Braun, U. 2011. Burning behavior of wood-plastic composite decking boards in end-use conditions: the effects of geometry, material composition, and moisture. *Journal of Fire Sciences* 30(1): 41–54.
- Stark, N.M. 2005. Effect of weathering variables on the lightness of high-density polyethylene woodflour composites. In *Eighth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites*. Madison: Forest Products Society.
- Stark, N.M. & Rowlands, R.E. 2003. Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. *Wood and Fiber Science* 35(2): 167–174.
- Wang, K. et al. 2014. Dynamic behavior and flame retardancy of HDPE/hemp short fiber composites: effect of coupling agent and fiber loading. *Composite Structures* 113: 74–82.