

Compósitos termoplásticos com madeira - uma breve revisão

Matheus Poletto (mpolett1@ucs.br)

Ciências Exatas e Engenharias, Universidade de Caxias do Sul/CARVI

Resumo: Recentemente tem ocorrido um rápido aumento da pesquisa e utilização de compósitos reforçados com pó de madeira e outras fibras naturais. O interesse nesse tipo de material compósito está baseado em algumas das suas vantagens quando comparado a outros, como os compósitos com fibras sintéticas, incluindo a redução no impacto ambiental, além do baixo custo, reciclabilidade e aplicações em diversos ramos da indústria, como no setor automotivo e de construção civil. Muitos esforços têm sido realizados para aumentar as propriedades mecânicas e térmicas de compósitos termoplásticos reforçados com pó de madeira e outras fibras naturais para estender ainda mais o campo de aplicação desse tipo de material compósito. Este trabalho tem por objetivo apresentar uma breve revisão sobre materiais compósitos enfocando os compósitos reforçados com pó de madeira avaliando os fatores que influenciam na performance mecânica desse tipo de material.

Palavras-Chaves: Compósitos, Madeira, Propriedades Mecânicas.

Abstract: Recently there has been a rapid growth in research and utilization of composites reinforced with wood flour and others types of natural fibers. The interest in this type of composite material is based on such advantages of these materials compared to others, such as synthetic fiber composites, including low environmental impact, low cost, recyclability, and applications in several industry fields. Much effort has gone into increase their mechanical and thermal properties to extend wide range of applications. This work aims to provide a brief overview of the composites materials with focus on the composites reinforced with wood flour evaluating the factors that influence the mechanical performance of this type of material.

Keywords: Composites, Wood, Mechanical properties.



Matheus Poletto

Graduado em Engenharia Química

Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais

Doutor em Engenharia

Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem ocorrido significativo aumento no interesse da indústria automotiva, aeronáutica, moveleira e de construção civil pela utilização de compósitos poliméricos que façam uso da biomassa vegetal como reforço ou carga em matrizes poliméricas [1,2,3]. Grandes quantidades de resíduos florestais e de resíduos provenientes das indústrias de transformação de madeira têm sido utilizadas como reforço em matrizes poliméricas [1,2,3]. Em alguns casos, a própria matriz utiliza polímeros reciclados oriundos da coleta seletiva municipal [1,3].

O interesse, principalmente da indústria automotiva, está provavelmente associado a aspectos relacionados com a utilização de recursos naturais renováveis em substituição gradual a extração e utilização de recursos não renováveis, como o petróleo [4,5]. Os compósitos desenvolvidos são materiais mais ambientalmente amigáveis, já que utilizam fases biodegradáveis ou fases que demandem menor consumo de energia para sua produção [3,6].

As cargas celulósicas e lignocelulósicas atualmente constituem também uma alternativa ao uso de fibras inorgânicas [7,8], pois apresentam, dentre outras, as seguintes

vantagens: possuem baixa densidade e baixa abrasão o que resulta em redução da densidade dos compósitos produzidos e reduz os gastos com manutenção dos equipamentos utilizados no processamento, devido a menores desgastes de ferramentas; baixas temperaturas de processamento; quanto às propriedades mecânicas geralmente provocam aumento do módulo elástico, como resultado do aumento da rigidez; não são nocivas a saúde como as fibras de vidro e ainda em termos sócio-econômicos e ambientais apresentam baixo custo, são amplamente disponíveis, além de serem biodegradáveis [7,8].

O potencial de uso das fibras naturais como reforço em compósitos é dificultado devido à incompatibilidade inerente entre as fibras hidrofílicas e a matriz polimérica hidrofóbica resultando na fraca adesão das fibras a matriz fazendo com que uma pequena parcela dos esforços seja efetivamente transferida da matriz para as fibras de reforço [9,10,11]. O caráter polar da celulose presente nas fibras naturais requer a compatibilização do sistema através do uso de agentes compatibilizantes ou do tratamento das fibras naturais para promover uma melhor adesão entre a matriz poliolfínica e o reforço celulósico [9,12].

Por outro lado, o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos vem se tornando um desafio para os grandes aglomerados urbanos. Para os países em desenvolvimento, este desafio é constante devido à rápida elevação da geração de resíduos sólidos resultante do crescimento da população nas áreas urbanas, industrialização e desenvolvimento econômico [13,14]. Os polímeros são utilizados no cotidiano em várias aplicações com curto tempo de vida útil, como é o caso das embalagens de alimentos. Assim, uma quantidade considerável de resíduos poliméricos pode ser recuperada via coleta seletiva para após ser encaminhada aos processos de reciclagem. Os resíduos plásticos constituem uma fonte promissora de matéria prima para o desenvolvimento de compósitos termoplásticos com pó de madeira, especialmente devido à grande quantidade gerada pelos municípios diariamente e também devido ao baixo custo deste material [13,15,16].

Assim, este trabalho apresenta uma breve revisão sobre os conceitos envolvidos na área de compósitos enfocando os

compósitos termoplásticos desenvolvidos através de polímeros reciclados reforçados com pó de madeira.

2. MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos são materiais multifásicos, que apresentam propriedades significativas das fases que o constituem [17,18,19,20]. O material obtido possui uma melhor combinação de propriedades que não poderia ser alcançada com qualquer um dos constituintes agindo isoladamente [17].

Os compósitos são materiais formados por uma fase contínua, chamada de matriz, e por uma fase dispersa que é descontínua [17-18]. A fase dispersa é aquela que contém o material de reforço, geralmente constituído por fibras ou partículas. A matriz pode ser composta por materiais metálicos, cerâmicos ou poliméricos, bem como a fase de reforço [17].

A fase de reforço tem como principais funções suportar o esforço aplicado ao material proporcionando rigidez, resistência, estabilidade térmica e também outras propriedades estruturais [20]. A matriz, por sua vez, proporciona forma estrutural ao material transferindo o esforço mecânico para o reforço, a matriz também isola as fibras ou partículas permitindo que cada fibra ou partícula possa agir isoladamente evitando assim a propagação de trincas, além de melhorar o acabamento superficial [17-20].

Uma característica própria dos compósitos é a versatilidade de aplicações em função do largo espectro de propriedades físicas, químicas e mecânicas que podem ser obtidas pela combinação de diferentes tipos de matriz e pelas várias opções de forma e tipo de reforço [21].

Desta forma, os critérios a serem atendidos para caracterizar um material como compósito englobam em: consistir em dois ou mais materiais; intrinsecamente insolúveis os quais mantém sua identidade no material final; as propriedades do compósito precisam ser notadamente distintas daquelas de seus constituintes e as diferentes fases devem ser separadas por uma interface [17,18,21].

2.1 Matriz Polimérica

A matriz é uma parte importante em um material compósito reforçado por fibras naturais. A matriz é uma barreira contra ambientes adversos protegendo o compósito contra a umidade e diversos solventes, além de transferir o esforço aplicado sobre a superfície do compósito para as fibras que reforçam o material [22,23].

Os materiais poliméricos utilizados como matrizes em compósitos podem ser classificados em termorrígidos ou termoplásticos. O fator limitante para a utilização de um polímero como matriz em compósitos reforçados com fibras naturais é a temperatura de processamento, a qual deve geralmente ser inferior a 200°C para evitar a degradação térmica das fibras naturais [23,24]. Os polímeros termoplásticos apresentam uma série de vantagens sobre os termorrígidos, uma vez que os termorrígidos após passarem pelo processo de cura apresentam reticulação das cadeias poliméricas o que inviabiliza seu processo de reciclagem

através de métodos mecânicos, tais como a moagem e posterior reprocessamento. Os termoplásticos por sua vez podem ser reciclados através de métodos mecânicos possibilitando a fabricação de novos produtos originando assim sua reinserção em novos ciclos de consumo. Os polímeros *commodities* mais utilizados para desenvolvimento de compósitos são o polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e o policloreto de vinila (PVC). Poliuretano (PU), resinas epóxi e poliéster são exemplos de termorrígidos usados em compósitos com fibras naturais [23,24].

2.2 Madeira

A madeira é um material natural, portanto renovável, pode ser reaproveitada e também é biodegradável, englobando características geralmente creditadas a materiais ambientalmente amigáveis [25]. A madeira é quimicamente composta por carbono, hidrogênio e oxigênio, estruturados para formar seus três principais componentes: celulose, hemicelulose e lignina [25,26]. Botanicamente as árvores são divididas em duas classes principais as Gimnospermas e as Angiospermas.

As Gimnospermas ou Coníferas, também designadas de “*softwoods*”, ou madeiras moles, são conhecidas por serem madeiras resinosas e não-porosas [25,27]. No Brasil as espécies de maior destaque são o *Pinus elliottii* e o *Pinus taeda*. Nas Angiospermas distinguem-se as Dicotiledôneas, também chamadas de “*hardwoods*”, ou madeiras duras, conhecidas por serem folhosas e porosas. No Brasil predominam espécies como a *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus citriodora*. A Figura 1 apresenta algumas diferenças típicas entre os tecidos celulares das espécies de coníferas e de folhosas.

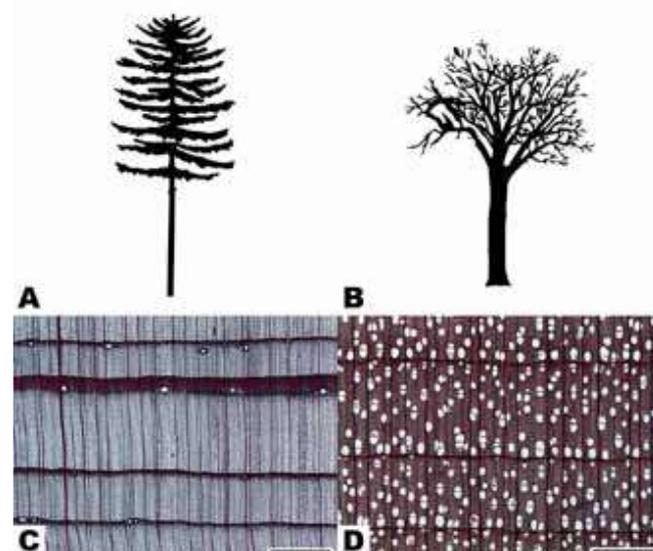


Figura 1: Aspecto geral das árvores provenientes de coníferas (A) e de folhosas (B). Seção transversal típica mostrando a anatomia de coníferas (C) com os canais de resina da planta e de folhosas (D) com a presença de vasos ou poros característicos [adaptado 28]

A madeira é um compósito natural anisotrópico formado através da organização celular da celulose,

hemicelulose, lignina e em menores quantidades de extrativos e materiais inorgânicos [25,28,29]. A celulose é o componente essencial das fibras de todas as plantas [30]. É um polímero natural constituído por unidades repetitivas de D-anidroglicose ($C_6H_{11}O_5$) unidas por ligações glicosídicas [26,30], conforme apresentado na Figura 2.

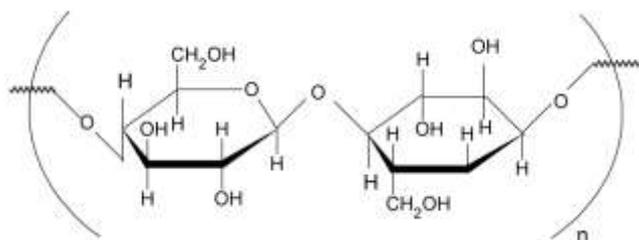


Figura 2: Estrutura química da celulose.

Cada unidade repetitiva contém três grupos hidroxila conferindo a celulose alto caráter hidrofílico e suas habilidades em formar ligações hidrogênio governam as propriedades físicas bem como o empacotamento cristalino.

A celulose é constituída por regiões cristalinas de elevada ordenação molecular e regiões amorfas de pouca ou nenhuma ordenação. É composta por um aglomerado de microfibrilas resistentes a álcalis, mas facilmente hidrolisadas por ácidos em açúcares solúveis em água [26]. O conteúdo de celulose na madeira de coníferas geralmente varia entre 40 a 45% e na madeira de folhosas entre 38 a 49% [25].

A hemicelulose esta intimamente associada à celulose e contribui para a composição estrutural da árvore. A hemicelulose é hidrofílica, solúvel em álcali e facilmente hidrolisada por ácidos [25]. O teor de hemicelulose na madeira seca oscila entre 15 e 25% [25].

A lignina é um polímero complexo constituído por compostos alifáticos e aromáticos [26,30]. A lignina é amorfa, hidrofóbica e insolúvel em muitos solventes; é o componente que promove rigidez às plantas [26]. O conteúdo de lignina varia usualmente entre 18 e 25% para madeiras de folhosas e entre 25 e 35% para as madeiras provenientes de coníferas [25].

Os constituintes menores incluem compostos orgânicos e compostos inorgânicos [25]. São basicamente divididos em duas classes. A primeira classe é constituída por materiais conhecidos como extrativos por serem extraídos com por diversos tipos de solventes. A segunda classe engloba os compostos que não são extraídos pelos solventes, tais como compostos inorgânicos, proteínas e polissacarídeos.

Os constituintes menores são normalmente responsáveis por determinadas características da planta como cor, odor e resistência natural a umidade e ao ataque de fungos [25,27,31]. Aproximadamente 3 a 10% da madeira seca é constituída de extrativos [27,31,32].

2.3 Interface em compósitos

A adesão interfacial entre a fibra e a matriz é essencial para obter elevadas propriedades mecânicas em compósitos. Como o esforço aplicado sobre o material compósito é transferido da matriz para as fibras através da interface, uma elevada adesão interfacial é necessária para obter compósitos com propriedades mecânicas elevadas [33].

A adesão em compósitos pode basicamente ocorrer através de entrelaçamento mecânico, atração eletrostática ou ligação química [33]. O entrelaçamento mecânico ocorre quando a superfície da fibra é suficientemente rugosa para promover certo ancoramento mecânico da matriz. A atração eletrostática apenas tem relevância para interfaces metálicas onde a atração entre cargas opostas governa a adesão na interface [24]. A ligação química ocorre quando os grupos presentes na superfície da fibra podem reagir com a matriz de modo a formar ligações químicas, tais como ligações covalentes e ligações hidrogênio [24,33]. Os tratamentos químicos que acarretam o aumento da compatibilidade entre fibras naturais e matrizes poliméricas podem ser basicamente divididos em duas categorias [23]:

Compatibilização: a superfície da fibra é modificada para aumentar a molhabilidade na matriz polimérica.

Agentes de acoplamento ou compatibilizantes: reagentes químicos bifuncionalidade, ou seja, possuem partes polares e partes apolares na sua estrutura, são utilizados para acarretar na formação de ligações químicas entre a superfície da fibra natural e a matriz polimérica. O agente de acoplamento mais utilizado em compósitos poliméricos com fibras naturais consiste em polímero modificado com anidrido maleico. São exemplos desse compatibilizante o polipropileno grafizado com anidrido maleico (MAPP) e o polietileno grafizado com anidrido maleico (MAPE).

A mistura de um polímero apolar com pó de madeira e qualquer outra fibra natural altamente polar resulta em um compósito com fraca adesão interfacial, dada à diferença de polaridade da matriz e do reforço.

Desta forma, agentes de acoplamento que possuem em sua estrutura uma parte apolar semelhante à matriz polimérica e uma parte polar semelhante às fibras naturais são geralmente adicionados para aumentar a adesão interfacial. A incompatibilidade entre a matriz hidrofóbica de alguns polímeros e o reforço hidrofílico requer o tratamento das fibras ou a utilização de agentes compatibilizantes que promovam ligações químicas entre as fases ou alterem a energia superficial do reforço para permitir um molhamento eficiente pela matriz [34,35].

A Figura 3 apresenta uma proposta de interação entre a matriz polimérica, o ácido octanóico, um óleo vegetal utilizado como agente compatibilizante e o pó de madeira. Pode-se observar que a cadeia carbônica do ácido octanóico interage com as cadeias poliméricas em virtude da ausência de polaridade entre as moléculas, enquanto ocorrem ligações hidrogênio entre as hidroxilas presentes na superfície do pó

de madeira com a parte polar do ácido octanóico o que acarreta a compatibilização do compósito.

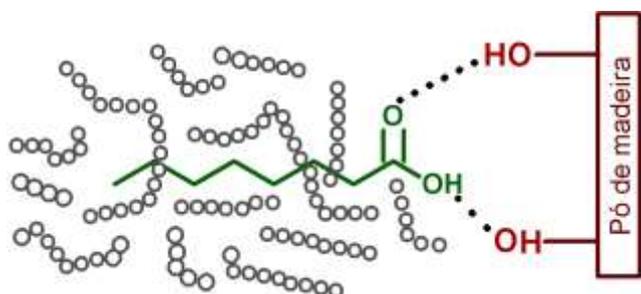


Figura 3: Proposta de interação entre polímero (○○○○), ácido octanóico e o pó de madeira.

O desempenho de um material compósito é resultado do comportamento conjunto do elemento de reforço, da matriz e da interface reforço-matriz [33]. A interfase pode ser definida como uma região intermediária entre o reforço e a matriz. Já a interface é uma região bidimensional onde ocorre o contato entre os componentes do compósito. É a principal responsável pela transferência de esforços mecânicos da matriz para o reforço, entretanto se não houver adesão entre as fases, esta pode atuar como região de formação de vazios e iniciação de falhas que comprometem o desempenho mecânico do material [33].

A Figura 4 mostra a micrografia obtida através de um microscópio de luz polarizada para um compósito de polipropileno reforçado com fibras de celulose. Observa-se a fibra de celulose e bem próximo da fibra verifica-se uma região clara na imagem caracterizada pela interfase/interface, enquanto que a região mais escura na figura representa a matriz de polipropileno.

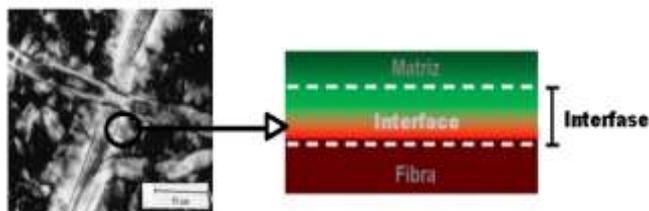


Figura 4: Interfase e interface em compósito de polipropileno reforçado com fibras de celulose [adaptado 36].

Com a adição de agentes de acoplamento ocorre o molhamento da fibra natural pela matriz, como resultado da formação de ligações químicas, ocasionando melhor transferência de esforços da matriz para as fibras de reforço. A Figura 5 mostra o detalhe da interface entre fibra e matriz para um compósito de polipropileno reciclado (PPr) reforçado com pó de madeira de *Pinus eliottii* (PIE). Na Figura 5(a) não foi adicionado agente de acoplamento e pode-se observar o arrancamento de uma fibra e a fraca interação entre a matriz e a fibra, já que a fibra está descolada da matriz.

Na Figura 5(b) adicionou-se ácido octanóico (C8) como agente compatibilizante. Observa-se o molhamento da fibra pela matriz como resultado de melhor compatibilização do compósito.

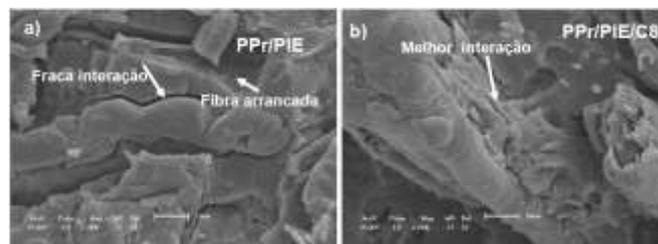


Figura 5: Compósitos de polipropileno reforçado com fibras de madeira sem (a) e com (b) agente de acoplamento [adaptado 37].

3. COMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM PÓ DE MADEIRA

Kim e colaboradores [38] avaliaram o efeito de diferentes espécies de madeira nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno. Os autores observaram que os compósitos apresentaram resistência a tração variando entre 24-28 MPa e módulo elástico entre 2,8 GPa a até 3,7 GPa com a incorporação de 50% de pó de madeira. Os autores propõem que as diferenças observadas nas propriedades mecânicas podem ser provocadas por alterações na adesão interfacial uma vez que as diferentes espécies apresentam variações na sua composição.

Fabiyi e McDonald [39] ao verificarem o efeito de cinco espécies de madeira nas propriedades mecânicas e térmicas de compósitos de polietileno de alta densidade observaram que a incorporação de 60% de pó de madeira gerou compósitos com resistência a flexão entre 21-25 MPa e valores de módulo de flexão entre 1,5 GPa e 2,6 GPa.

Viana e colaboradores [40] utilizaram poliestireno de alto impacto (HIPS) com diferentes índices de fluidez no desenvolvimento de compósitos com farinha de madeira. Verificaram que o reforço lignocelulósico poderia ser eficientemente utilizado na substituição de cargas minerais ou fibra de vidro em compósitos termoplásticos devido aos elevados valores de resistência e rigidez obtidos.

Berger e Stark [41] comentam que as variáveis mais importantes quando a madeira é utilizada no desenvolvimento de compósitos poliméricos são a umidade presente na madeira, a distribuição do tamanho de partículas e as espécies utilizadas. Stark [42] também avaliou o efeito da adição de diferentes espécies de madeira nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno (PP). De acordo com o autor as espécies de madeira têm influência direta na propriedade mecânica dos compósitos. Mais tarde, Saputra e colaboradores [43] confirmaram diferenças significativas nas propriedades mecânicas de compósitos produzidos com diferentes espécies de madeira.

Shebani e colaboradores [44] desenvolveram compósitos de polietileno de baixa densidade reforçados por quatro diferentes espécies de madeira com e sem extrativos. Os autores verificaram que os compósitos que utilizaram as madeiras sem extrativos apresentaram um aumento de, no mínimo, 10°C na sua estabilidade térmica. Já Sheshmani e colaboradores [45] verificaram que a remoção dos extrativos da madeira causou aumento das propriedades mecânicas de compósitos de PP reforçado com pó de madeira. Em consonância com os resultados de Shebani e colaboradores [44] houve também um aumento da estabilidade térmica das amostras com a remoção dos extrativos da madeira.

Cui e colaboradores [46] desenvolveram compósitos utilizando HDPE pós-consumo e fibras de madeira. Os autores observaram o aumento no conteúdo de fibras resulta em aumento da resistência a flexão com redução na resistência ao impacto dos compósitos. O aumento no comprimento das fibras de madeira provocou redução da resistência à flexão e no módulo em flexão dos compósitos, os melhores resultados foram obtidos para os compósitos produzidos com fibras de 75 µm.

Adhikary, Pang e Staiger [15] desenvolveram compósitos com farinha de madeira utilizando polietileno de alta densidade (HDPE) virgem e pós-consumo. Os compósitos com HDPE reciclado apresentaram propriedades mecânicas equivalentes aos compósitos desenvolvidos com HDPE virgem. A adição de 3 a 5% em massa de MAPP melhorou significativamente as propriedades mecânicas e também reduziu a absorção de água dos compósitos. Hillig e colaboradores [47] estudaram a caracterização de compósitos de HDPE e diferentes tipos de serragem gerados na indústria moveleira, produzidos em extrusora mona rosca. Foram utilizados resíduos de pinus, de aglomerado, de chapa de fibra de média densidade (MDF) e de eucalipto.

Os ensaios mecânicos indicaram diferenças nas propriedades dos compósitos de acordo com o tipo de serragem utilizada. De forma geral, a utilização de serragem de aglomerado e de eucalipto proporcionou compósitos com maior resistência à flexão e ao impacto que aqueles fabricados com MDF e pinus.

Huang e Zhang [48] prepararam compósitos de HDPE reforçado com partículas de madeira de 250 µm. Os autores observaram que os compósitos produzidos sem a utilização de agente compatibilizante apresentaram redução das propriedades mecânicas devido ao aumento das interações partícula-partícula como consequência da formação de aglomerados, entretanto o módulo de armazenamento aumentou com a adição de partículas de madeira. A utilização de polietileno modificado com anidrido maleico proporcionou aumento na interação entre polímero e partícula ocasionando aumento das propriedades mecânicas e também no módulo de armazenamento em comparação aos compósitos desenvolvidos sem compatibilizante.

Poletto e colaboradores [49] desenvolveram compósitos de PPr reforçados por pó de madeira utilizando

óleos naturais como compatibilizantes. Os autores verificaram que a adição de 2% em massa de ácido octanóico resultou em compósitos com propriedades térmicas e mecânicas semelhantes ao compósito que utilizou 2% em massa de MAPP como agente de acoplamento. Este resultado indica que a utilização de agentes de acoplamento oriundos de fontes renováveis pode gradualmente substituir os compatibilizantes provenientes de fontes não renováveis como o MAPP.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A redução e conseqüente escassez dos aterros sanitários associados à redução da emissão de gases causadores do efeito estufa aliados a elevada geração de resíduos pela sociedade tem alavancado a busca por novas alternativas de gerenciamento de resíduos sólidos.

Desta forma, o desenvolvimento de compósitos utilizando resíduos orgânicos e resíduos provenientes da agroindústria ou de processos industriais, como o resíduo de madeira e as fibras naturais, constituem um desafio constante.

Ao que tudo indica, a pesquisa nesse campo deve crescer ainda mais, uma vez que a demanda por materiais sustentáveis derivados de fontes renováveis continua a crescer. No entanto, deve-se melhorar a resistência à umidade e a resistência ao fogo dos compósitos reforçados por fibras naturais já que estes são muito utilizados em aplicações externas, como peças automotivas, decks e marinas, equipamentos esportivos, móveis de jardim, além de diversas aplicações na construção civil.

Assim, a substituição dos materiais derivados do petróleo por materiais provenientes de fontes renováveis torna-se o desafio atual da indústria de compósitos poliméricos.

5. REFERÊNCIAS

- [1] NAJAFI, S.K. Use of recycled plastics in wood plastic composites-A review. *Waste Management* 33: 1898-1905, 2013.
- [2] SHAH, D. U. Natural fibre composites: comprehensive Ashby-type materials selection charts. *Materials and Design* 62: 21-31, 2014.
- [3] TEUBER, L.; OSBURG, V.-S.; TOPOROWSKI, W.; MILITZ, H.; KRAUSE, A. Wood polymer composites and their contribution to cascading utilisation. *Journal of Cleaner Production* 110: 9-15, 2016.
- [4] VENTURA, A.M.F.M. Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. *Ciência & Tecnologia dos Materiais* 21: 10-19, 2009.
- [5] SAPUAN, F.M.A.-O. Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry. *Journal of Cleaner Production* 66: 347-354, 2014.
- [6] GARCÍA-GARCÍA, D.; CARBONELI, A.; SAMPER, M.D.; GARCÍA-SANOQUERA, D.; BALART, R. Green composites based on polypropylene matrix and hydrophobized spend coffee ground (SCG) powder. *Composite Part B* 78: 256-265, 2015.

- [7] SOBCZAK, L.; LANG, R.W.; HAIDER, A. Polypropylene composites with natural fibers and wood - General mechanical property profiles. **Composite Science and Technology** 72: 550-557, 2012.
- [8] HONG, H.; LIAO, H.; ZHANG, H.; HE, H.; LIU, T.; JIA, D. Significant improvement in performance of recycled polyethylene/wood flour composites by synergistic compatibilization and multi-scale interfaces. **Composite Part A** 64: 90-98, 2014.
- [9] SPOLJARIĆ, S.; GENOVESE, A.; SHANKS, R.A. Polypropylene-microcrystalline cellulose composites with enhanced compatibility and properties. **Composite Part A** 40: 791-799, 2009.
- [10] POLETTI, M.; ZATTERA, A.J. Mechanical and dynamic mechanical properties of polystyrene composites reinforced with cellulose fibers: coupling agent effect. **Journal of Thermoplastic Composite Materials** DOI: 10.1177/0892705715619967.
- [11] POLETTI, M.; DETTERBORN, J.; ZENI, M.; ZATTERA, A.J. Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour. **Waste Management** 31: 779-784, 2010.
- [12] POLETTI, M. Effect of styrene maleic anhydride on physical and mechanical properties of recycled polystyrene wood flour composites. **Maderas. Ciencia y tecnología** 18: 533-542, 2016.
- [13] ASHORI, A.; NOURBAKHSH, A. Characterization of wood-fiber composites made of recycled materials. **Waste Management** 29: 1291-1295, 2009.
- [14] ASHORI, A. Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries! **Bioresource Technology** 99: 4661-4667, 2008.
- [15] ADHIKARY, K.B.; PANG, S.; STAIGER, M.P. Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). **Composite Part B** 39: 807-815, 2008.
- [16] SELKE, S.E.; WICHMAN, I. Wood fiber/polyolefin composites. **Composite Part A** 35: 321-326, 2004.
- [17] ASTM D3878. Standard terminology for composite materials. 2016.
- [18] SHELDON, R.P. **Composite polymeric materials**. London: Applied Science Publishers, 1982.
- [19] JONES, R.M. **Mechanics of composite materials**. Virginia: Taylor & Francis, 1999.
- [20] MAZUMDAR, S.K. **Composites manufacturing: materials, product and process engineering**. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [21] LEVY NETO, F.; PARDINI, L.C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- [22] CORREA, C.A.; FONSECA, C.N.P.; NEVES, S. RAZZINO, C.A.; HAGE Jr, E. Compósitos termoplásticos com madeira. **Polímeros** 13:154-165, 2003.
- [23] VÄISÄNEN, T.; HAAPALA, A.; LAPPALAINEN, R.; TOMPPU, L. Utilization of agricultural and forest industry waste and residue in natural fiber-polymer composites: a review. **Waste Management** 54: 62-73, 2016.
- [24] PICKERING, K.L.; ARUAN EFENDY, M.G.; LE, T.M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Composite Part A** 83: 98-112, 2016.
- [25] ROWELL, R.M. **Wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [26] JOHN, M.J.; SABU THOMAS. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**. 71: 343-364, 2008.
- [27] D'ALMEIDA, M.L.O. **Celulose e Papel: Tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1988.
- [28] FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook**. United States Department of Agriculture Forest Service Madison, Wisconsin, USA, 2010.
- [29] HON, D.N.S. **Wood and cellulosic chemistry**. New York: Marcel Dekker, 2000.
- [30] BLEDZKI, A.K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science**. 24: 221-274, 1999.
- [31] POLETTI, M.; ZATTERA, A.J.; SANTANA, R.M.C. Structural differences between wood species: evidence from chemical composition, FTIR spectroscopy, and thermogravimetric analysis. **Journal of Applied Polymer Science** 126: E336-E343, 2012.
- [32] SHEBANI, A.N.; van REENEN, A.J.; MEINCKEN, M. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. **Thermochemica Acta**. 471: 43-50, 2008.
- [33] KIM, J.K.; MAI, Y.W. **Engineered interfaces in fiber reinforced composites**. Amsterdam: Elsevier, 1998.
- [34] CORREA, C.A.; RAZZINO, C.A.; HAGE JR, E. Role of maleated coupling agents on the interface adhesion of polypropylene-wood composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**. 20: 323-339, 2007.
- [35] POLETTI, M. Polypropylene-based wood-plastic composites: effect of using a coupling agent derived from a renewable resource. **Maderas. Ciencia y tecnología** 19(3), 2017.
- [36] MASH, A.; ZUGENMAIER, P. Morphology and properties of isotropic and oriented samples of cellulose fibre-polypropylene composites. **Polymer** 41:1589-1596, 2000.
- [37] POLETTI, M.; ZATTERA, A.J.; SANTANA, R.M.C. Efeito de oleos naturais na estabilidade térmica e na cinética de degradação de compósitos de PPr/pó de madeira. **21° CBECIMAT**, Cuibá, Brasil, 2014.
- [38] KIM, J-W.; HARPER, D.P.; TAYLOR, A.M. Effect of wood species on the mechanical and thermal properties of wood-plastic composites. **Journal of Applied Polymer Science** 112: 1378-1385, 2009.
- [39] FABIYI, J.S.; McDONALD, A.G. Effect of wood species on property and weathering performance of wood plastic composites. **Composites Part A** 41: 1434-1440, 2010.
- [40] VIANA, W.L.; CORREA, C.A.; RAZZINO, C.A. Efeitos do tipo de Poliestireno de alto impacto nas propriedades de compósitos termoplásticos com farinha de resíduo de madeira. **Polímeros: Ciência e Tecnologia** 14: 339-348, 2004.
- [41] BERGER, M.J.; STARK, N.M. Investigations of species effects in an injection-molding-grade, wood-filled polypropylene. **Fourth International Conference on Wood/fiber-Plastic Composites**. Madison, 1997.
- [42] STARK, N.M. Effect of species and particle size on properties of wood-flour-filled polypropylene composites. **Intertech Conferences**. Portland, 1997.
- [43] SAPUTRA, H.; SIMONSEN, J.; LI, K. Effect of extractives on the flexural properties of wood/plastic composites. **Composite Interfaces** 11: 515-524, 2004.
- [44] SHEBANI, A.N.; van REENEN, A.J.; MEINCKEN, M. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. **Thermochemica Acta** 471: 43-50, 2008.

[45] SHESHMANI, S.; ASHORI, A.; FARHANI, F. Effect of extractives on the performance properties of wood flour-polypropylene composites. **Journal of Applied Polymer Science** 123: 1563-1567, 2012.

[46] CUI, Y.; LEE, S.; NORUZIAAN, B.; CHEUNG, M.; TAO J. Fabrication and interfacial modification of wood/recycled plastic composite materials. **Composites Part A** 39: 655-661, 2008.

[47] HILLIG, É.; FREIRE, E.; ZATTERA, A.J.; ZANOTO, G.; GRISON, K.; ZENI, M. Use of sawdust in polyethylene composites. **Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology** 24: 73-80, 2008.

[48] HUANG, H-X.; ZHANG, J-J. Effects of filler-filler and polymer-filler interactions on rheological and mechanical properties of HDPE-wood composites. **Journal of Applied Polymer Science** 111: 2806-2812, 2009.

[49] POLETTTO, M.; ZATTERA, A.J.; SANTANA, R.M.C. Effect of natural oils on the thermal stability and degradation kinetics of recycled polypropylene wood flour composites. **Polymer Composites** 35: 1935-1942, 2014.