



Avaliação do desempenho mecânico de compósitos de polipropileno reciclado reforçados com resíduos de madeira da indústria madeireira

Matheus Poletto

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias (PGEPROTEC)
Universidade de Caxias do Sul (mpolett1@ucs.br)

Resumo

Os resíduos de madeira são gerados nas diversas etapas do beneficiamento da madeira. Neste trabalho, resíduos de madeira das espécies *Pinus elliottii* (PIE) e *Dipteryx odorata* (DIP) foram utilizados para o desenvolvimento de compósitos com polipropileno (PP) reciclado. O objetivo principal deste estudo é comparar o desempenho mecânico dos compósitos utilizando como reforço resíduo de madeira proveniente de uma espécie tropical (DIP) com uma de clima temperado (PIE). Os compósitos foram obtidos por extrusão em duplarrosca e após moldados por injeção. Os resultados mostraram que os compósitos desenvolvidos com DIP, que possui maior quantidade de extrativos que o PIE, apresentaram maior adesão superficial. A morfologia das fibras revelou que a DIP contém maior quantidade de extrativos na sua superfície o que pode indicar que os extrativos de origem apolar interagiram com a matriz favorecendo a compatibilização do compósito. O desempenho mecânico dos compósitos com DIP foi superior aquele verificado com a utilização de PIE, o que corrobora a melhor interação entre fibra e matriz observada nas micrografias para a amostra PP/DIP.

Palavras-chave: Polipropileno. Resíduos de madeira. Compósitos.

Área Temática: Resíduos sólidos.

Assessment of the mechanical performance of recycled polypropylene composites reinforced with wood flour wastes from lumber industry

Abstract

*The wood wastes are generated during the several stages of the wood manufacturing. In this work, wood flour wastes from *Pinus elliottii* (PIE) and *Dipteryx odorata* (DIP) were used to development composites with recycled polypropylene (PP). The main objective of this study is to compare the mechanical performance of composites using as reinforcement wood wastes from tropical specie (DIP) and temperate specie (PIE). The composites were obtained by twin screw extrusion and after injection molding. The results showed that the composites developed with DIP, which has a higher amount of extractives than the PIE, presented higher surface adhesion. The morphology of the fibers revealed that the DIP contains a greater amount of extractives in its surface which may indicate that the non-polar extractives may interacted with the matrix favoring the composite compatibilization. The composite mechanical performance with DIP was higher than that verified with the use of PIE, which corroborates the better interaction between fiber and matrix observed in the SEM micrographies for PP/DIP sample.*

Key words: Polypropylene. Wood wastes. Composites.

Theme Area: Solid wastes.

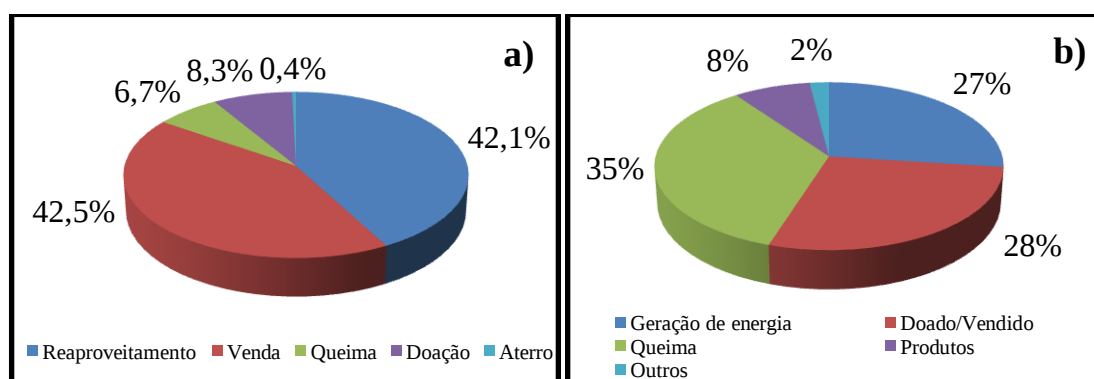


1 Introdução

O consumo acelerado de vários produtos oriundos de diversos segmentos da indústria demanda cada vez mais o desenvolvimento de materiais que façam uso de fontes sustentáveis e renováveis (TEUBER et al., 2016, HONG et al., 2014). A utilização de materiais provenientes de fontes não renováveis torna-se cada vez menor o que por sua vez também impulsiona os processos de reciclagem (NAJAFI, 2013). Nesse contexto, uma alternativa interessante é utilizar polímeros reciclados reforçados por resíduos florestais, como é o caso dos resíduos de madeira, para desenvolver produtos para as indústrias automotivas, moveleira e de construção civil, por exemplo. Porém, resíduos de madeira são gerados em grandes quantidades desde o abate da árvore até a fabricação de um produto final.

Estima-se que no Brasil sejam gerados 30 milhões de toneladas de resíduos de madeira anualmente (BRASIL, 2009). A principal fonte geradora é a indústria madeireira que contribui com aproximadamente 91% do total de resíduos gerados (BRASIL, 2009). No entanto, pode-se afirmar que uma pequena parcela dos resíduos gerados tem algum aproveitamento econômico. A maioria dos resíduos de madeira são vendidos e utilizados para aplicações menos nobres ou são simplesmente queimados sem geração de energia. A Figura 1 apresenta um comparativo entre a destinação dos resíduos de madeira na Região da Serra Gaúcha e na Região Amazônica. Ficam evidentes as discrepâncias relacionadas à destinação dos resíduos de madeira nas duas regiões. Enquanto que no Sul do país em torno de 42% dos resíduos são reaproveitados na região Norte esse percentual chega a 35%, considerando a parte dos resíduos que geram novos produtos e aqueles que são utilizados para a geração de energia. Mais de 42% dos resíduos de madeira gerados na Serra Gaúcha são vendidos e geralmente esses resíduos são utilizados como forração em aviários ou queimados nos fornos das olarias. Na Região Amazônica esse percentual é de 28%. A maior discrepância está na parcela de resíduos que é queimada. Enquanto que na Serra Gaúcha apenas 6,7% dos resíduos de madeira são queimados na Região Amazônica este índice é praticamente seis vezes maior atingindo 35%.

Figura 1 - Destinação dos resíduos de madeira na Serra Gaúcha (a) e na região amazônica (b)
Adaptado (SCHNEIDER et al., 2004, BRASIL, 2009).



Deve-se considerar a possibilidade de recuperação, reutilização ou reciclagem dos resíduos de madeira, os quais podem constituir matéria-prima para o desenvolvimento de compósitos a serem utilizados pela indústria moveleira ou por outras indústrias buscando potencializar ainda mais a utilização de um resíduo tão nobre. Outras possíveis alternativas para melhor utilização dos resíduos de madeira constituem a produção de celulose e/ou nanofibras de celulose, filmes poliméricos de hemicelulose e também desenvolvimento de produtos químicos a partir da lignina, entre outras. Desta forma, o objetivo deste trabalho é



desenvolver compósitos utilizando polipropileno reciclado oriundo da coleta seletiva do município de Caxias do Sul reforçado tanto com resíduos de madeira provenientes da Serra Gaúcha quanto com resíduos de madeira proveniente da Região Amazônica comparando o desempenho mecânico dos compósitos. Foram utilizados resíduos de *Pinus elliottii* (PIE) provenientes de uma indústria madeireira da Serra Gaúcha e resíduos de *Dipteryx odorata* (DIP) oriundos de uma madeireira da Região Amazônica. Estas espécies foram escolhidas pois são muito utilizadas pelas indústrias moveleira e madeireira de ambas as regiões.

2 Materiais e métodos

O polipropileno pós-consumo é oriundo de potes de margarina provenientes da coleta seletiva do município de Caxias do Sul, Rio Grande do Sul (RS) e foi obtido da Associação de Recicladores Serrano. Os resíduos de PP foram lavados com solução de detergente alcalino, moídos e secos em estufa a 80°C por 24 horas, conforme descrito em trabalhos anteriores (POLETTTO et al., 2014a; POLETTTO et al., 2014b). O PP reciclado possui índice de fluidez de $4,6 \pm 0,2$ g/10 min (230°C/2,16 kg). O pó de madeira proveniente da Serra Gaúcha foi fornecido pela empresa Madarco S/A, situada em Caxias do Sul-RS, como resíduo de processo, proveniente de madeira de reflorestamento de PIE sem nenhum tipo de tratamento superficial. O resíduo de madeira da espécie DIP é oriundo da Região Amazônica da cidade de Sinop no Mato Grosso (MT), constituído por resíduos de madeira da indústria madeireira local e também não possui nenhum tipo de tratamento. As partículas de madeira de ambas as espécies possuíam granulometria entre 53-150 μ m.

Preparação dos compósitos

O pó de madeira foi previamente seco em estufa a 105°C por 24h. Os compósitos com 30% em massa de pó de madeira foram confeccionados em extrusora duplarrosca corrotante MH-COR-20-32. A extrusora possui diâmetro da rosca de 20 mm e razão L/D 32, com degasagem. A extrusão foi realizada com temperaturas variando entre 170°C-190°C com velocidade da rosca de 200 rpm. O material extrusado foi seco em estufa a 80°C por 24 horas e logo após processado em injetora Himaco LH 150-80 a 170-180°C com molde aquecido a 50°C.

Caracterização dos compósitos

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As micrografias das fibras de madeira e dos compósitos foram obtidas utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura marca SHIMADZU modelo Superscan SS-550 operando com tensão de aceleração de 15 kV. As superfícies dos corpos de prova foram criogenicamente fraturadas e após tanto as fibras quanto as amostras criogenicamente fraturadas foram recobertas com ouro para realização da análise.

Ensaio mecânicos

O ensaio de flexão foi realizado em uma EMIC DL3000 segundo a ASTM D790 com velocidade de 1,5 mm/min. Os ensaios de impacto IZOD foram realizados em equipamento CEAST Resil 25 em amostras com entalhe utilizando martelo de 1J, conforme ASTM D256.



3 Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta a composição química das espécies de madeira utilizadas neste estudo com base em resultados de um estudo prévio (POLETTTO et al., 2012). A espécie PIE apresentou maiores teores de holocelulose (celulose+hemicelulose) e lignina que a espécie DIP. No entanto, a espécie DIP originária de floresta tropical apresentou uma quantidade de cinzas, ou seja, de material inorgânico praticamente duas vezes superior à espécie de clima temperado. A quantidade de extrativos na amostra DIP é mais que o dobro da espécie PIE.

Tabela 1 – Teores dos principais componentes das espécies de madeira avaliadas

Espécie de Madeira	Holocelulose (%)	Lignina (%)	Extrativos (%)	Cinzas (%)
<i>Pinus elliottii</i> (PIE)	61,2 ± 1,1	33,8 ± 1,0	4,5 ± 0,1	0,8 ± 0,1
<i>Dipteryx odorata</i> (DIP)	57,1 ± 0,6	30,4 ± 0,4	11,1 ± 0,1	1,5 ± 0,2

Fonte: Adaptado (POLETTTO et al., 2012)

Todas as espécies de madeira e outras plantas contêm pequenas ou moderadas quantidades de outras substâncias químicas diferentes de seus constituintes principais, como celulose, lignina e hemicelulose. Os chamados extrativos podem alcançar teores de 4-10% em massa nas espécies de madeira, tanto tropicais, quanto aquelas oriundas de clima temperado (SHESHMANI et al., 2012). Apesar dos extrativos contribuírem com uma pequena parcela na constituição química da madeira, eles geralmente acarretam e uma mudança significativa nas suas propriedades, tais como resistência mecânica, coloração e degradação térmica (SHEBANI et al., 2008, POLETTTO et al., 2012). Os extrativos são compostos de baixa massa molar que são solúveis em água e outros solventes orgânicos, tais como etanol, benzeno, diclorometano e clorofórmio (SHESHMANI et al., 2012). Dentre os compostos químicos presentes nos extrativos pode-se citar: flavonoides, alcaloides, fenóis, pectina, taninos, sais inorgânicos, ceras, óleos, graxas, amido, terpenos, entre outros (SHEBANI et al., 2008, SHESHMANI et al., 2012, POLETTTO et al., 2012).

O elevado teor de cinzas na amostra DIP, quando comparado a PIE, pode estar associado com a presença dos extrativos, uma vez que uma maior quantidade de sais inorgânicos pode estar presente nesta espécie de madeira, dada sua maior quantidade de extrativos. Por outro lado, os extrativos são responsáveis por proteger a madeira do ataque de fungos e normalmente compostos como ceras e graxas estão situados na superfície da madeira (SHEBANI et al., 2008).

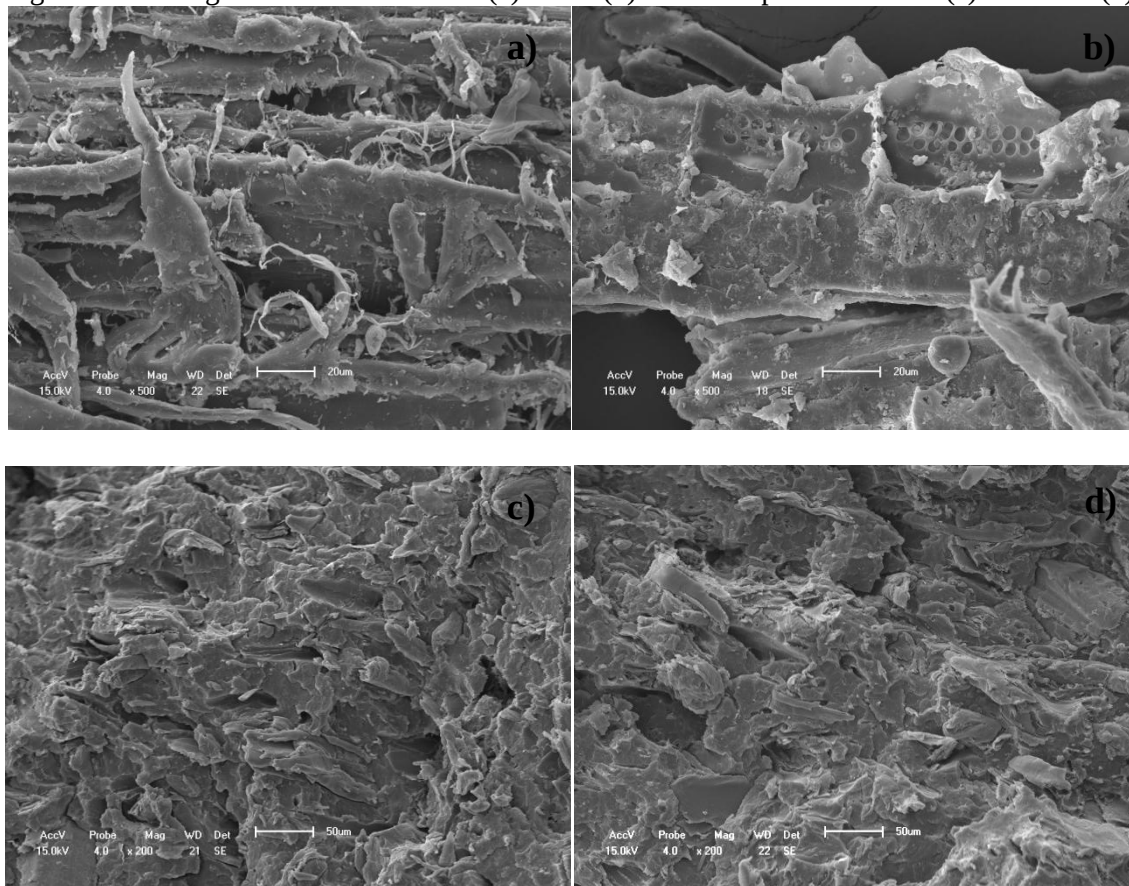
A Figura 2 mostra a morfologia da superfície externa das fibras de madeira das espécies avaliadas, bem como a morfologia dos compósitos reforçados com PIE (Figura 2(c)) e com DIP (Figura 2(d)). Observa-se que a espécie PIE, Figura 2(a), apresenta uma morfologia mais fibrilada com uma superfície rugosa e com muitos sulcos, ou seja, com as fibras mais expostas. Já na espécie DIP as fibras estão envoltas e de certa forma protegidas pelos extrativos, o que deixa a superfície é menos rugosa.

Na morfologia da superfície do compósito reforçado com PIE, Figura 2 (c), observa-se a fraca interação entre a fibra hidrofílica e a matriz hidrofóbica. Muitas fibras foram arrancadas da matriz no momento da fratura, como pode ser verificado pelos sulcos deixados na matriz com o formato das fibras, o que demonstra fraca interação entre reforço e matriz (NAGHMOUCHI et al., 2015, POLETTTO, 2017). Porém, no compósito reforçado com DIP observa-se maior interação fibra matriz, com uma menor quantidade de fibras arrancadas no momento da fratura. Este resultado indica que os extrativos presentes na espécie DIP podem interagir com a matriz aumentando a adesão interfacial. Os extrativos geralmente são



constituídos por uma estrutura química com maior razão H/C e menor razão O/C, quando comparados à celulose e lignina (SAPTURA et al., 2004) o que pode favorecer a interação com a matriz de PP.

Figura 2 – Micrografia das fibras de PIE (a) e DIP (b) e dos compósitos PP/PIE (c) e PP/DIP (d)



As propriedades mecânicas do polipropileno utilizado bem como dos compósitos desenvolvidos com PIE e DIP estão apresentadas na Tabela 2. A adição de PIE ao PP ocasionou redução da resistência a flexão quando comparada a matriz, fato que já era esperado, frente a fraca adesão fibra matriz observada na Figura 2 (c). Por outro lado, com a adição de DIP a resistência a flexão do compósito aumentou cerca de 25% quando comparada a matriz. Como explicado anteriormente, a presença dos extrativos, provavelmente de origem apolar, na superfície da fibra resulta em maior interação com a matriz o que, por sua vez, acarreta maior transferência de esforços da matriz para as fibras de reforço ocasionando a melhora no desempenho mecânico do compósito quando comparado com amostra PP/PIE.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos compósitos estudados

Amostra	Resistência a Flexão (MPa)	Deformação (%)	Módulo de Flexão (MPa)	Resistência ao Impacto (J/m)
PP	33,0 ± 0,5	7,2 ± 0,2	1158 ± 21	43,7 ± 3,8
PP/PIE	31,0 ± 0,7	4,8 ± 0,1	1859 ± 11	29,3 ± 1,0
PP/DIP	40,7 ± 0,2	4,7 ± 0,3	2731 ± 32	37,7 ± 1,0

Com a adição das fibras de madeira o compósito torna-se mais rígido, uma vez que as fibras restringem à movimentação das cadeias do polímero (GALLAGHER, McDONALD, 2013, POLETTTO, 2017), gerando uma redução acentuada na deformação em comparação a



amostra sem adição de carga. O módulo de flexão apresentou um aumento com o uso de ambas as espécies de madeira. As fibras são mais rígidas que a matriz e ocasionam o aumento do módulo de flexão (ADHIKARY et al., 2008). Entretanto, o aumento no módulo de flexão para o compósito PP/DIP é mais que o dobro do módulo de flexão da matriz e aproximadamente 50% superior ao obtido com a utilização das fibras de PIE, corroborando a melhor interação fibra matriz observada na microscopia da Figura 2 (d). A adição das fibras de madeira acarretou na redução da resistência ao impacto dos compósitos em comparação com a matriz. Geralmente, a presença das fibras de madeira na matriz polimérica gera pontos de concentração de tensão que favorecem o início da fratura (SHESHMANI et al., 2012). Contudo, para a amostra PP/DIP a redução na resistência ao impacto foi menos acentuada que na amostra PP/PIE pelo fato das fibras estarem dispersas e envoltas pela matriz o que favorece a transferência de esforços da matriz para a fibra dissipando maior quantidade de energia durante o impacto.

4 Conclusão

A utilização de resíduos de madeira provenientes de espécies oriundas da indústria madeireira foi avaliada. Os resultados mostraram que os compósitos reforçados com DIP, que possui uma quantidade de extrativos duas vezes maior que a espécie PIE, apresentaram maior adesão superficial que os compósitos produzidos com PIE como reforço. A análise morfológica da superfície das fibras revelou que as fibras da espécie PIE estão mais expostas, enquanto as fibras de espécie DIP estão envoltas por uma camada de extrativos, protegendo as fibras. Com base na morfologia da superfície fraturada dos compósitos pode-se afirmar que as fibras de PIE foram arrancadas da matriz no momento da fratura, enquanto que as fibras de DIP permaneceram mais aderidas a matriz. Este comportamento pode estar associado com a maior adesão fibra matriz provocada pela presença dos extrativos na superfície da fibra da espécie DIP, o que corrobora com o melhor desempenho mecânico da amostra PP/DIP frente à amostra PP/PIE.

5 Agradecimentos

O autor agradece a Associação de Recicladores Serrano, Madarco S/A e as madeireiras de Sinop/MT pela doação dos materiais.

Referências

ADHIKARY, K.B.; PANG, S.; STAIGER, M.P. “*Dimensional stability and mechanical behavior of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene*” **Composites Part B**, v. 39, 2008, pg. 807-815.

BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Levantamento sobre a geração de resíduos provenientes da atividade madeireira e proposição de diretrizes para políticas, normas e condutas técnicas para promover o seu uso adequado. **Projeto PNUD BRA 00/20**, 2009.

GALLAGHER, L.W.; McDONALD, A.G. “*The effect of micron sized wood fibers in wood plastic composites*”. **Maderas, Ciencia y tecnología**, v. 15, 2013, pg. 357-374.



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 at multi-scale interfaces*”. **Composites Part A**, v. 64, 2014, pg. 90-98.

NAGHMOUCHI, I.; ESPINACH, F.X.; MUTJÉ, P.; BOUFI, S. “*Polypropylene composites based on lignocellulosic fillers: how the filler morphology affects the composite properties*”. **Materials and Design**, v. 65, 2015, pg. 454-461.

NAJAFI, S.K. “*Use of recycled plastics in wood plastic composites - A review*”. **Waste Management**, v. 33, 2013, pg. 1898-1905.

POLETTTO, 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**, v. 126, 2012, pg. E336-E343.

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**, v.35, 2014a, pg.1935-1942.

POLETTTO, M.; ZATTERA, A.J.; SANTANA, R.M.C. “*Alternativa de substituição de compatibilizante petroquímico por óleos naturais em compósitos de polipropileno reciclado e pó de madeira*”. In: Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, 4, 2014b, Bento Gonçalves, Anais ..., RS, pg. 1-7.

POLETTTO, M. “*Mechanical, dynamic mechanical and morphological properties of composites based on recycled polystyrene filled with wood flour wastes*”. **Maderas, Ciencia y tecnología**, v. 19, 2017, pg. 433-442.

SAPTURA, H.; SIMONSEN, J.; LI, K. “*Effect of extractives on the flexural properties of wood/plastic composites*”. **Composite Interfaces**, v. 11, 2004, pg. 515-524.

SCHNEIDER, V.E.; HILLIG, É.; BERTOTTO FILHO, L.A.; RIZZON, M.R. Geração de resíduos de madeira e derivados no polo moveleiro da Serra Gaúcha – diagnóstico e indicativos para o gerenciamento ambiental na indústria moveleira. In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 11, 2004, Rio Grande do Norte - Brasil.

SHEBANI, A.N.; VAN REENEN, A.J.; MEINCKEN, M. “*The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species*”. **Thermochimica Acta**, v. 471, 2008, pg. 43-50.

SHESHMANI, S.; ASHORI, A.; FARHANI, F. “*Effect of extractives on the performance properties of wood flour-polypropylene composites*”. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 123, 2012, pg. 1563-1567.

TEUBER, L.; OSBURG, V-S.; TOPOROWSKI, W.; MILITZ, H.; KRAUSE, A. “*Wood polymer composites and their contribution to cascading utilisation*”. **Journal of Clean Production**, v. 110, 2016, pg. 9-15.