

**UTILIZAÇÃO DE TRATAMENTOS QUÍMICOS EM COMPÓSITOS
POLIETILENO/SISAL E A INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS****Bruno Dorneles de Castro (*), Rômulo Maziero, Juan Carlos Campos Rubio**

* Universidade Federal de Minas Gerais, brunodorn_92@hotmail.com

RESUMO

A aplicação de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais em inúmeros segmentos industriais tem incentivado o surgimento de diversas tecnologias que aumentam a resistência mecânica desses materiais. Neste contexto, o uso de agentes químicos, como o hidróxido de sódio (NaOH) e o anidrido maleico (MA), são frequentemente utilizados para melhorar a adesão interfacial entre a matriz e o reforço, devido à natureza hidrofílica das fibras naturais. Este estudo teve como objetivo realizar um levantamento do estado da arte sobre o uso de tratamentos químicos em compósitos reforçados com fibras de sisal em matriz de polietileno. O estudo baseia-se na influência desses tratamentos nas propriedades mecânicas dos compósitos polietileno/sisal. Os resultados mostram que, em geral, os tratamentos químicos melhoram a adesão interfacial e contribuem para uma maior resistência ao cisalhamento entre as fases, mas a complexidade química desses agentes é de grande preocupação dentro da visão sustentável da indústria atual, opondo-se aos preceitos sustentáveis de compósitos constituídos por fibras naturais. Por fim, quanto à escolha de um determinado tratamento químico, percebe-se a importância de se considerar a relevância da utilização do agente, em função da aplicação final do material, em termos de resistência e rigidez.

PALAVRAS-CHAVE: Compósitos, Polietileno, Sisal, Fibras naturais, Fibras tratadas.**ABSTRACT**

The application of polymeric composites reinforced with natural fibers in several industrial segments has encouraged the emergence of several technologies that increase the mechanical resistance of these materials. In this context, the use of chemical agents such as sodium hydroxide (NaOH) and maleic anhydride (MA) are often used to improve interfacial matrix-reinforcement adhesion due to the hydrophilic nature of natural fibers. This study aimed to carry out a survey of the state of the art on the use of chemical treatments in reinforced composites with sisal fibers in polyethylene matrix. The study is based on the influence of these treatments on the mechanical properties of the polyethylene/sisal composites. The results show that the chemical treatments improve the interfacial adhesion and contribute to a greater resistance to shear between the phases, but the chemical complexity of these agents is of great concern in the sustainable view of the industry, as opposed to the sustainable precepts of composites constituted by natural fibers. Finally, with regard to the choice of a particular chemical treatment, it is perceived the importance of considering the relevance of the use of the agent, depending on the final application of the material, in terms of strength and stiffness.

KEY WORDS: Composites. Polyethylene. Sisal. Natural fibers. Treated fibers.**INTRODUÇÃO**

O ambiente industrial tem sido foco de profundas discussões, devido à necessidade, cada vez mais acentuada, de identificação das potenciais formas de destinação de materiais utilizados na fabricação de um produto. Nesse contexto, a perfeita ciência do ciclo de vida do produto é um requisito importante para uma maior sustentabilidade da empresa no referido setor. Além disso, a adoção de uma política empresarial voltada para o meio ambiente garante à empresa o atendimento aos requisitos ambientais impostos por lei e possibilitam a utilização dessa prática como uma forma de fortalecer a imagem da organização para a visão do cliente, o que pode acarretar o aumento do lucro da empresa, em caso de sucesso nos planos de marketing (GUPTA; RUDD; LEE, 2014).

Neste sentido, alguns materiais tradicionais, como os polímeros sintéticos, têm sido fortemente criticados pelos pesquisadores em geral, em função da alta complexidade química de suas estruturas, o que dificulta a degradação desses materiais por agentes biológicos (LIU; ZHANG; ZHANG, 2016).

Com relação aos materiais compósitos poliméricos, o uso de reforços constituídos por fibras naturais, tem sido visto como uma das mais promissoras formas de praticar o pensamento sustentável na engenharia dos materiais, em geral. Isso tem-se verificado em diversos setores industriais, como a indústria automotiva, a aeronáutica e a construção civil (HOTO et al., 2014).



Na esfera econômica, considera-se a utilização de fibras naturais como uma forma de reduzir custos de um determinado compósito, cuja matriz possua um alto valor agregado. Além disso, o cultivo de plantas que possuem fibras aplicáveis em materiais compósitos contribui para a sobrevivência de diversos agricultores familiares, o que constitui um caráter social altamente relevante tanto para a empresa, que pode se beneficiar pelo fortalecimento social da imagem do produto, quanto para os próprios agricultores, que muitas vezes vivem apenas do lucro obtido com a venda dessas plantas (PASSOS; DIAS; CRUZ, 2005).

Apesar disso, o interesse industrial em materiais de alto desempenho, voltados para tecnologias mais avançadas, traz certas contradições a esse cenário sustentável praticado e embasado no emprego das fibras naturais. Agentes químicos, que possam melhorar a interação interfacial desses compósitos, são frequentemente utilizados em compósitos, sendo caracterizados por sofrer um complexo processo de degradação, atuando inclusive como degradantes (TEÓFILO; SILVA; RABELLO, 2010; SUN et al., 2016). Além disso, podem agredir bruscamente a estrutura física das fibras, impactando negativamente em algumas propriedades mecânicas (LOPES et al., 2010).

Um das fibras naturais mais estudadas nos últimos anos são as fibras de sisal. Com propriedades mecânicas relevantes, como baixa densidade e baixo peso, esse tipo de fibra tem sido muito empregada como reforço de materiais compósitos poliméricos, tanto em resinas termoplásticas quanto em resinas termorrígidas (AHMAD; LUYT, 2012).

OBJETIVOS

Este estudo teve como objetivo geral realizar um levantamento bibliográfico sobre a utilização de tratamentos químicos em materiais compósitos de polietileno reforçados com fibras de sisal, e a influência desses tratamentos em suas propriedades mecânicas. A revisão da literatura proposta teve como objetivos específicos a descrição de parâmetros de fabricação dos compósitos, como as fases constituintes, a proporção entre essas fases e os agentes químicos utilizados, e a relação desses parâmetros com os resultados encontrados pelos pesquisadores, no que se refere à alterações nas propriedades mecânicas desses materiais, sobretudo em ensaios de tração, flexão e impacto.

METODOLOGIA

O estudo de caráter exploratório apresenta diversos resultados de trabalhos de pesquisadores, enfatizando os tipos de tratamento químico e a variação encontrada nos resultados de ensaios mecânicos, em termos de resistência e rigidez, após a utilização desses agentes químicos. As principais bases de dados utilizadas foram SciELO - Scientific Electronic Library Online e Periódicos Capes, com palavras-chave de entrada: Compósitos/Composites; Polietileno/Polyethylene; Sisal/Sisal; Fibras naturais/Natural fibers e Fibras tratadas/Fibers treated.

RESULTADOS

O Polietileno e a fibra de sisal

O polietileno (PE) é um polímero constituído por uma longa cadeia semicristalina de átomos de carbono, com átomos de hidrogênio unidos a cada átomo de carbono, o PE é considerado um termoplástico e apresenta uma estrutura simples (ASKELAND; PHULÉ, 2008).

Como é comum em polímeros, a estrutura tem grande influência sobre a densidade e as propriedades mecânicas desses materiais. De acordo com Coutinho, Mello e Maria (2003), ramificações longas de cadeias em PE diminuem a densidade, enquanto que as ramificações curtas aumentam a cristalinidade e a resistência à tração.

Agrela et al. (2009) ressaltam uma forte tendência no uso de termoplásticos, como o PE, como matriz polimérica de compósitos reforçados com fibras, principalmente fibras naturais. Os autores salientam que esta tem sido uma ótima medida para a preservação do meio ambiente, devido à possibilidade de reutilização desses materiais após a utilização pelo consumidor final.

Já Candian (2007) verificou a possibilidade de uso do Polietileno de alta densidade (PEAD) reciclado em elementos estruturais, na indústria civil. Porém, o autor afirma que tal aplicação depende de alguns fatores importantes, como o controle da deformabilidade do PEAD, que pode envolver a utilização de fibras de elevado módulo de elasticidade e resistência mecânica.



Por outro lado, a fibra de sisal é um polímero natural constituído por celulose (entre 65,85% e 73,00%), hemicelulose (entre 12% e 13%), lignina (entre 9,9% e 11,0%) e pectina (entre 0,8% e 2,0%) (MARTIN et al., 2009). A celulose, principal componente, possui alto grau de polimerização e é responsável pela boa resistência à tração das fibras. Já a lignina é uma substância hidrofóbica que atua como adesivo, unindo as fibras de sisal. A hemicelulose, por sua vez, é estruturalmente semelhante à celulose e participa da estabilização da parede celular com a celulose. Em menor quantidade, a pectina ajuda na ligação das paredes celulares de células adjacentes (OGATA, 2013).

Martin et al. (2009) averiguaram diferenças entre as propriedades do sisal ao longo do comprimento da fibra da folha, e a dividiram em quatro partes: de 0 a 30 cm (parte chamada de basal), de 30 a 60 cm, de 60 a 90 cm e de 90 a 120 cm (componentes da parte denominada apical). Li, Mai e Ye (2000) afirmam que as propriedades mecânicas de tração das fibras de sisal variam conforme a massa específica da amostra avaliada (Tabela 1), o que justifica também a alta variabilidade de resultados encontrados, por meio destes testes considerando esse tipo de fibras.

Tabela 1. Propriedades mecânicas do sisal, conforme diferentes massas específicas.

Fonte: Adaptado de Li, Mai e Ye (2000).

Massa específica (kg/m ³)	Limite de resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação à ruptura (%)	Diâmetro (µm)
1030	500 - 600	16 - 21	3,6 - 5,1	-
1400	450 - 700	7 - 13	4 - 9	-
1410	400 - 700	9 - 20	5 - 14	100 - 300
1450	530 - 700	7 - 22	3 - 9	50 - 300

Oriundo do México, o sisal é cultivado em vários países em desenvolvimento e, de acordo com a Conab – Companhia Nacional de Abastecimento (2015) - o Brasil é o maior produtor e exportador mundial de sisal, totalizando, em 2015, o valor de US\$ 123,9 milhões de dólares em exportações dessa fibra. No País, as plantações de sisal estão concentradas nos estados da Bahia e da Paraíba (VASCONCELOS, 2009).

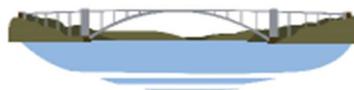
Os compósitos reforçados com fibras de sisal têm ganhado muito importância no setor automobilístico, principalmente como substituta da fibra de vidro. Dentre as aplicações dessas fibras nesse setor, pode-se citar o uso como reforços de plásticos para a confecção de painéis, porta-luvas, consoles centrais e outras partes internas de automóveis (SISAL, 2009). Dentre as vantagens do uso da fibra de sisal em automóveis, pode-se citar a redução do peso do veículo (que influencia diretamente no consumo de combustível), a redução na emissão de dióxido de carbono (devido ao incentivo ao cultivo da planta) e os benefícios econômicos que a comercialização da fibra promove para pequenos agricultores, que são os principais produtores da planta (FAO, 2011).

Compósitos de polietileno reforçados com fibras naturais

Araújo (2009) afirma que as fibras naturais usadas como reforço em matrizes poliméricas, como o PEAD, melhoram as propriedades mecânicas dos polímeros e servem como substitutos para reforços de fontes não-renováveis, como a fibra de vidro. Em estudo, a autora verificou o comportamento de um compósito de PEAD reforçado com fibras de curauá, obtendo resultados semelhantes com os do PEAD reforçado com fibras de vidro. Contando também com um agente acoplador (polietileno enxertado com anidrido maleico – PE-g-MA), houve melhoria, com a adição da fibra, na resistência mecânica e no módulo de elasticidade, comparado ao PEAD isoladamente.

Mulinari (2009) utilizou o PEAD como matriz em um compósito reforçado com fibras de celulose do bagaço da cana-de-açúcar, e verificou que o tratamento superficial realizado nas fibras, o tipo de processamento para a obtenção do compósito e o uso de um agente compatibilizante (PE-g-MA) influenciaram fortemente nas propriedades mecânicas do compósito. Além disso, destaca-se fibras de celulose modificadas com óxido de zircônio incorporadas na matriz de PEAD, que promoveu um aumento na resistência à tração, à flexão e ao impacto do compósito.

Lima et al. (2014) estudaram o comportamento mecânico de um compósito de PEAD reforçado com fibras de quitosana (em 5 e 10% de fibra), modificado com PE-g-MA. Os autores explicam que, devido à natureza hidrofóbica (insolúvel em água) do PEAD e hidrofílica (solúvel em água) da quitosana, o uso do PE-g-MA faz-se necessário, a fim de melhorar a compatibilidade e a adesão entre as fases. O uso desse agente proporcionou uma redução do alongamento na ruptura e na resistência ao impacto do compósito. Já a resistência à tração, foi reduzida na incorporação de 10% de quitosana e sem o



uso do agente. O módulo de elasticidade, por sua vez, não foi alterado, independente do teor de quitosana e do uso do agente.

Spinacé et al. (2011) analisaram as propriedades de compósitos de PEAD e de polipropileno com reforço de 20% em massa de fibras curtas de sisal ou de curauá, com ou sem agente de acoplagem. Foi possível concluir que os compósitos, tanto de PEAD quanto de polipropileno, reforçados com curauá, apresentaram propriedades mecânicas de tração e flexão superiores aos reforçados com fibras de sisal. A única exceção foi vista nos testes de impacto, com superioridade dos compósitos reforçados com fibras de sisal.

Com base na possibilidade de se reciclar o PEAD, Bonelli, Elzubair e Suarez (2005) investigaram o uso do PEAD reciclado reforçado com fibras de piaçava (com tratamento superficial com silano e sem tratamento), com diferentes proporções (5, 10 e 15% de fibra). Os autores encontraram um melhor desempenho mecânico (resistência à tração e à flexão) com o PEAD reciclado reforçado com fibras tratadas com silano, com a proporção de 15% de fibra.

Compósitos de polietileno reforçados com fibras de sisal

Fávoro et al. (2010) analisaram a fibra de sisal como reforço de um PEAD reciclado. Para melhorar a compatibilidade entre as fases, as fibras de sisal (utilizadas com 5 ou 10% do volume final) foram mercerizadas com uma solução de hidróxido de sódio - NaOH (para a retirada de impurezas na superfície da fibra) e acetiladas (diminuição da hidrofilicidade da fibra), enquanto que o PEAD foi oxidado em uma solução de permanganato de potássio - KMnO_4 (para a diminuição de sua hidrofobia). Segundo o estudo dos autores, o tratamento do sisal melhorou a adesão das fases e a oxidação do PEAD não influenciou nesse quesito. A incorporação das fibras de sisal no PEAD, na proporção de 10% do volume, aumentou a resistência à tração, flexão e, principalmente, ao impacto, que apresentou um aumento de 40%, comparado ao PEAD puro.

Choudhury (2008) investigou as propriedades mecânicas de tração, flexão e impacto de compósitos de PEAD reforçados com fibras de sisal em diferentes teores. Foi utilizado também um ionômero (Surlyn) como agente acoplador. De acordo com os resultados apresentados pelo estudo, conforme aumentou-se o teor de fibras (de 5% a 20% do peso do compósito), houve aproximadamente um aumento de 16% na resistência à tração e de 17% na resistência à flexão do compósito, e um aumento aproximado de 28% no módulo de elasticidade à tração e de 30% no módulo de elasticidade na flexão dos mesmos.

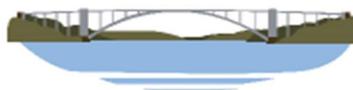
O trabalho de Li, Hu e Yu (2008) buscou melhorar a ligação interfacial entre o PEAD e as fibras de sisal por meio de uso de dois silanos, (3-aminopropil) trietoxissilano e γ -metacriloxipropiltrimetoxissilano, e por meio de oxidação via KMnO_4 e peróxido de dicumila ($\text{C}_{18}\text{H}_{22}\text{O}_2$). Os silanos reagem com os grupos hidroxilas, que promove a diminuição da polaridade da parede celular da fibra e, conseqüentemente, a hidrofilicidade da mesma. Já a oxidação deixou a superfície da fibra áspera. Os autores verificaram que o tratamento melhorou a resistência mecânica ao cisalhamento interno do compósito, sobretudo após o uso do KMnO_4 , com um aumento de resistência em 100% (de 1,6 MPa para 3,2 MPa), se comparado ao compósito sem tratamento.

Zhao, Li e Bai (2014) investigaram, com base nas propriedades mecânicas, a influência do teor de fibra de sisal, do acoplamento entre as fases e do processo de produção em PEAD reforçados com tais fibras. Segundo os autores, um aumento de teor de fibra de sisal, com o auxílio de um agente acoplador (no caso, o PE-g-MA) melhorou as propriedades mecânicas do compósito, como a resistência à tração e à fluência.

Ahmad e Luyt (2012) estudaram o PEAD, o Polietileno de Baixa Densidade - PEBD e o Polietileno Linear de Baixa Densidade - PELBD como matrizes de compósitos reforçados com fibras de sisal, sem tratamento e com a uso de peróxido de dicumila. O compósito de PEAD com as fibras de sisal tratadas obtiveram menores módulos de elasticidade, e resistência à tração foi menor do que no compósito com as fibras sem tratamento. Os autores relataram que o tratamento reduziu a cristalinidade do PEAD, o que influenciou negativamente na adesão entre a matriz e a fibra.

Joseph, Thomas e Pavithran (1992) estudaram as propriedades viscoelásticas do PEBD, reforçado com fibras de sisal. Os autores verificaram a influência da orientação e do comprimento das fibras utilizadas. Em um mesmo comprimento de fibra (5,8 mm) e um mesmo teor mássico de fibras (30% do peso total do compósito), a orientação longitudinal das fibras apresentou maiores valores de resistência à tração e de módulo de elasticidade (31,1 MPa e 3086 MPa, respectivamente) que a orientação aleatória (14,7 MPa e 781 MPa) e que a orientação transversal de fibras (6,1 MPa e 590 MPa).

Hong et al. (2015) utilizaram copolímeros graftizados de polietileno em compósitos de polietileno reciclado reforçados com fibras de sisal, a fim de melhorar a adesão interfacial desses materiais. Ensaio mecânicos foram realizados pelos



pesquisadores para verificar a influência desses compatibilizantes, nos quais foram constatados aumento de 153% na resistência à tração desses compósitos com 7% (por peso de PE) de compatibilizantes nos compósitos, e também um aumento de 65% na resistência à flexão dos mesmos com o uso de 9% (por peso de PE) de compatibilizantes.

O estudo de Martin et al. (2003) investigou as propriedades mecânicas de compósitos de PEAD com sisal, após um tratamento de seus componentes com diclorossilano com reação por plasma a rádio frequência. Os autores verificaram que, ainda que os compósitos com tratamento no PEAD e no sisal tenham apresentado maiores valores de resistência à tração que os não-tratados e que os mesmos que tiveram apenas uma das fases tratadas, os melhores resultados, em geral, foram alcançados pelos compósitos que tiveram apenas o PEAD tratado, fato este que é explicado pelo início de degradação nas camadas superficiais de fibras lignocelulósicas, quando estas são submetidas a tratamentos por plasma.

Mokhena e Luyt (2014) utilizaram nanowhiskers de sisal (com comprimento de 197 nm e diâmetro de 12 nm) como material de reforço para o PEAD e o PEBD. Os nanocompósitos foram fabricados por moldagem em uma solução de tolueno, onde foram fundidos e prensados. Além disso, usou-se vinil-trietoxissilano na superfície dos nanowhiskers de sisal, a fim de melhorar a dispersibilidade e a compatibilidade dos mesmos entre a matriz. A presença dos nanowhiskers influenciou claramente o módulo de armazenamento do PEBD, o que não ocorreu com o PEAD. A cristalinidade dos polímeros no processo de manufatura foi muito dependente de suas morfologias. Dentre os resultados de ensaios mecânicos de tração, destaca-se uma maior deformação na ruptura no caso dos compósitos com PEAD.

Percebe-se que a utilização de tratamentos químicos pode ser considerada uma opção, no que se refere à melhorias na adesão interfacial dos compósitos. Porém, ressalta-se que as estruturas de fibras lignocelulósicas, como o sisal, pode sofrer sérios danos, impactando negativamente nas propriedades mecânicas desse material de reforço.

O estudo de Lopes et al. (2010) investigou o uso de tratamentos químicos em fibras de sisal, por meio da influência desses compostos nas propriedades mecânicas das fibras. As fibras foram condicionadas em uma solução aquosa de NaOH a 1% por 1 hora, sendo lavadas por repetidas vezes até atingir um pH neutro e secadas em estufas a 60 °C, durante 24 horas. Para um tratamento de acetilação, foram utilizadas soluções de anidrido acético e ácido acético, variando-se o tempo de reação desses agentes com as fibras (1 e 3 horas) e a temperatura do sistema (100 e 120 °C, por meio de um reator de condensação, sob agitação). O estudo mostra que, em geral, as fibras de sisal tendem a apresentar um decréscimo nas propriedades de resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento até a ruptura, quando são submetidas ao tratamento de acetilação. Tais alterações são explicadas por meio da perda de constituintes naturais da fibra, como a lignina e a hemicelulose que, após tais tratamentos químicos, são parcialmente removidos da estrutura desses materiais.

CONCLUSÕES

A partir da presente revisão bibliográfica, nota-se que a utilização de tratamentos químicos tem sido frequentemente associada ao objetivo de melhorar a adesão interfacial de compósitos, melhorando a transferência de cargas entre as fases, quando estes são solicitados mecanicamente. Apesar disso, ressalta-se que a utilização desses agentes químicos deve levar em consideração o conceito de sustentabilidade, uma vez que muitos desses compostos são extremamente agressivos ao meio ambiente, e são contraditórios ao caráter sustentável proposto na utilização de fibras naturais, em detrimento das fibras sintéticas, no contexto dos materiais compósitos.

Estudos na literatura comprovam que nem sempre há uma melhoria nas propriedades mecânicas desses compósitos, com o uso de agentes químicos. Dentro desse contexto, recomenda-se que haja uma profunda análise, nas fases preliminares do projeto de fabricação do compósito, sobre a real necessidade da utilização de um determinado tratamento químico. Tal decisão deve estar totalmente relacionada à aplicação final desse material compósito, por meio da capacidade mecânica exigida para este material, quando o mesmo estiver em operação.

Além disso, a utilização de conceitos e ideias sustentáveis na manufatura tem sido considerada uma forma de se obter uma positiva diferenciação mercadológica, ou seja, pode resultar em uma vantagem competitiva, devido à crescente busca, pelos consumidores, por materiais e produtos que não agridem ao meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGMEC da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG pela estrutura física e pelo apoio. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional



de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agrela, S. P., Guimarães, D. H., Carvalho, G. G. P., Carvalho, R. F., José, N. M. Preparação e caracterização de compósitos de polietileno de alta densidade com resíduos de fibras de piaçava da espécie *Attalea Funifera* Mart. In: Congresso brasileiro de polímeros, 10, 2009, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Out. 2009.
2. Ahmad, E. E. M., Luyt, A. S. Effects of Organic Peroxide and Polymer Chain Structure on Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Sisal Fiber Reinforced Polyethylene Composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 125, p. 2216-2222, 2012.
3. Araújo, J. R. **Compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibra de curauá obtidos por extrusão e injeção**. 2009. 153 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
4. Askeland, D. R., Phulé, P. P. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.
5. Bonelli, C. M. C., Elzubair, A., Suarez, J. C. M. Comportamento térmico, mecânico e morfológico de compósitos de polietileno de alta densidade reciclado com fibra de piaçava. **Polímeros: Ciência e tecnologia**, v. 15, n. 4, p. 256-260, 2005.
6. Candian, L. M. **Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso em elementos estruturais**. 2007. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de estruturas) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
7. Candian, L. M., Dias, A. A. Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso em elementos estruturais. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 11, n. 51, p. 1-16, 2009.
8. Choudhury, A. Isothermal crystallization and mechanical behavior of ionomer treated sisal/HDPE composites. **Materials science and engineering A**, v. 491, p. 492-500, 2008.
9. CONAB. **Sisal 2015: Retrospectiva**. 2015. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_02_04_11_15_32_sisal_conjuntura_especial_retrospectiva_2015-1.pdf>. Acesso em: 18 mai. 2016.
10. Coutinho, F. M. B., Mello, I. L., Maria, L. C. S. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v. 13, n. 1, p. 1-13, jan./mar. 2003.
11. FAO. **New Technology For Sustainability**. Global Materials Team. 2011. Disponível em: <http://www.fao.org/fileadmin/templates/est/COMM_MARKETS_MONITORING/Jute_Hard_Fibres/Documents/Consultation_2011/3-Duarte-Ford.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2016.
12. Fávoro, S. L., Ganzerli, T. A., Carvalho Neto, A. G. V., Silva, O. R. R. F., Radovanovic, E. Chemical, morphological and mechanical analysis of sisal fiber-reinforced recycled high-density polyethylene composites. **Express Polymer Letters**, v. 4, n. 8, p. 465-473, 2010.
13. Gupta, S., Rudd, J., Lee, N. Business sustainability through successful integration of marketing and operations. **Industrial Marketing Management**, v. 43, n. 43, p. 3-5, 2014.
14. Hong, H., Liu, H., Zhang, H., He, H., Liu, T., Jia, D. Improving the performances of polyethylene/sisal fiber composites by infiltratively compatibilizing the multi-scale interfaces. **Composite Interfaces**, v. 22, n. 6, p. 489-502, 2015.
15. Hoto, R., Furundarena, G., Torres, J. P., Muñoz, E., Andrés, J., García, J. A. Flexural behavior and water absorption of asymmetrical sandwich composites from natural fibers and cork agglomerate core. **Materials Letters**, v. 127, p. 48-52, 2014.
16. Joseph, K., Thomas, S., Pavithran, C. Viscoelastic properties of short-sisal-fiber-filled low-density polyethylene composites: effect of fiber length and orientation. **Materials Letters**, v. 15, n. 3, p. 224-228, 1992.
17. Li, Y., Mai, Y-W., Ye, L. Sisal fibre and its composites: a review of recente developments. **Composites Science and Technology**, v. 60, p. 2037-2055, 2000.
18. Liu, K., Zhang, Z., Zhang, F-S. Advanced degradation of brominated epoxy resin and simultaneous transformation of glass fiber from waste printed circuit boards by improved supercritical water oxidation processes. **Waste Management**, v. 56, p. 423-430, 2016.
19. Lima, P. S., Brito, R. S. F., Andrade, D. L. A. C. S., Canedo, E. L., Lima, S. M. S. Propriedades mecânicas de compósitos de polietileno de alta densidade e quitosana tratadas com polietileno modificado. In: Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais, 21, 2014, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: 2014, p. 3665-3672, 2014.
20. Lopes, F. F. M., Araújo, G. T., Nascimento, J. W. B., Gadelha, T. S., Silva, V. R. Estudo dos efeitos da acetilação em fibras de sisal. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 14, n. 7, p. 783-788, 2010.
21. Martin, A. R., Martins, M. A., Mattoso, L. H. C., Silva, O. R. R. F. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade *Agave sisalana*. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v. 19, n. 1, p. 40-46, 2009.



22. Martin, A. R., Denes, F. S., Rowell, R. M., Mattoso, L. H. C. Mechanical Behavior of Cold Plasma-Treated Sisal and High-Density Polyethylene Composites. **Polymer Composites**, v. 24, n. 3, p. 464-474, 2003.
23. Mokhena, T. C., Luyt, A. S. Investigation of Polyethylene/Sisal Whiskers Nanocomposites Prepared Under Different Conditions. **Polymer Composites**, v. 35, p. 2221-2233, 2014.
24. Mulinari, D. R. **Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulose do bagaço de cana de açúcar**. 2009. 111f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.
25. Ogata, B. H. **Caracterização das frações celulose, hemicelulose e lignina de diferentes genótipos de cana-de-açúcar e potencial de uso em biorrefinarias**. 2013. 109 f. Dissertação (Mestrado em ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.
26. Passos, F. H., Dias, C. C., Cruz, R. C. Capital social, competências e demandas tecnológicas de arranjos produtivos locais: o caso do APL de sisal em Valente, Bahia. **Economia e Gestão**, v. 5, n. 10, p. 92-112, 2005
27. **Sisal: o novo aliado do meio ambiente**. Carros e acessórios. 2009. Disponível em: <<http://www.carroseacessorios.com.br/noticias-detalhes.php?id=5837>>. Acesso em: 25 ago. 2016.
28. Spinacé, M. A. S., Janeiro, L. G., Bernardino, F. C., Grossi, T. A., de Paoli, M-A. Poliolefinas reforçadas com fibras vegetais curtas: sisal x curauá. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v. 21, n. 3, p. 168-174, 2011.
29. Sun, H., Memon, S. A., Gu, Y., Zhu, M., Zhu, J-H., Xing, F. Degradation of carbon fiber reinforced polymer from cathodic protection process on exposure to NaOH and simulated pore water solutions. **Materials and structure**, v. 49, n. 12, p. 5273-5283, 2016.
30. Teófilo, E. T., Silva, S. M. L., Rabello, M. S. Stress Cracking and Chemical Degradation of Poly(ethylene terephthalate) in NaOH Aqueous Solutions. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 118, p. 3089-3101, 2010.
31. Vasconcelos, Y. Fibra de futuro. **Pesquisa Fapesp**. n. 159, p. 76-79, mai. 2009.
32. Zhao, X. LI, R. K. Y., BAI, S-L. Mechanical properties of sisal fiber reinforced high-density polyethylene composites: Effect of fiber content, interfacial compatibilization, and manufacturing process. **Composites: Part A**, v. 65, p. 169-174, 2014.