

VIABILIDADE DE PRODUÇÃO DE PAINÉIS LIGNOCELULÓSICOS A BASE DE RESÍDUOS DE CASCA DE CAFÉ E RESINAS EPÓXI DE ÓLEOS VEGETAIS

Washington Moreira Cavalcanti (*), Leandro Soares de Oliveira, Rômulo Maziero, Guilherme Martins Fernandes, Lais Brito Cangussu

* Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. washington.cavalcanti@hotmail.com.

RESUMO

A incorporação de resíduos agroindustriais no processo produtivo de painéis a base de madeira processada exige alterações tecnológicas, organizacionais e gerenciais para minimizar o uso dos recursos florestais. Os painéis aglomerados são fabricados por meio da aglutinação de fibras de madeira com resinas sintéticas e outros aditivos. Para a obtenção das fibras, a madeira é cortada em pequenos cavacos que, em seguida, são triturados em desfibradores. Neste contexto, este trabalho teve por objetivo avaliar as propriedades dos painéis lignocelulósicos produzidos a base de resíduos de casca de café (em substituição a madeira natural) e resinas epóxi de óleos vegetais, empregados em diferentes proporções, variando de 30% a 50% em volume. Foi analisada as propriedades físicas e mecânicas dos painéis compósitos produzidos com partículas de casca de café, óleos epoxidado e resinas epóxi. Após a preparação dos corpos de prova e dos ensaios mecânicos, dos levantamentos apurados e da caracterização dos materiais, confirmou-se que o objetivo proposto neste estudo foi alcançado, retratado pela análise geral dos resultados obtidos. Os resultados levam a concluir que é possível ter outra destinação aos resíduos de casca de café.

PALAVRAS-CHAVE: Resina epóxi, óleo epoxidado, painéis lignocelulósicos-epóxi, casca de café, resíduos de óleo vegetal.

INTRODUÇÃO

A geração de resíduos da indústria do café é responsável por produzir um volume de resíduos de casca de café na proporção de 1:1, ou seja, para cada quilo de café processado, tem-se um quilo de casca de café que deve ser aproveitado de forma adequada, agregando valor a este resíduo, especialmente na forma de painéis compósitos a base de resinas epóxi de óleos vegetais.

Os compósitos, conforme descrito pela norma ASTM D3039 (2014), são definidos como um sistema formado por duas ou mais fases constituintes de composições e estruturas distintas, são insolúveis entre as partes e são separados por uma interface com propriedades superiores que não se encontram em cada um dos materiais isoladamente. A fase contínua que é a matriz, tem a função principal de transferir as tensões de reforço além de envolver a fase dispersa, protegendo-a contra umidade, agentes mecânicos, químicos e orgânicos, além de dar forma ao material compósito final. A fase dispersa, reconhecida como reforço ou carga, é responsável por absorver as cargas mecânicas aplicadas sobre o compósito, além de prover a rigidez e a resistência mecânica aos compósitos (BLEDZKI; GASSAN, 1999; GEHLEN, 2014).

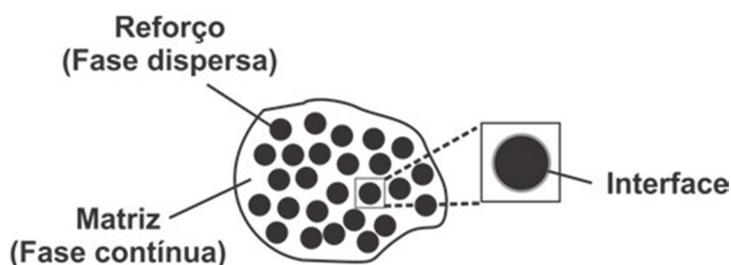


Figura 1: Fases de interação dos materiais compósitos. Fonte: ANGÉLICO, 2009.

Para a produção de compósitos é permitido a utilização de materiais produzidos artificialmente e de materiais naturais (matriz orgânica), como opção para diferentes aplicações para distintos setores da indústria, como embalagens, construção civil, indústria automotiva, aeronáutica, entre outras (MOTA, 2010).

O uso de resinas termofixas, como os poliésteres, epóxi, poliuretanos, vinil-éster e resinas fenólicas se destacam por apresentar baixo custo de utilização para integrar compósitos reforçados com fibras de vidro ou com materiais fibrosos. Conforme descrito por Cantwell e Morton (1991), as principais características das resinas termorrígidas, são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1. Principais características de polímeros termoplásticos e termorrígidos. Fonte: CANTWELL; MORTON, 1991.

Características típicas das resinas termorrígidas
Não reciclável mecanicamente.
Tempo limitado durante o processamento.
Cura sob temperatura ambiente ou temperatura elevada.
Alta resistência térmica e dimensional.
Excelente propriedade em compósitos.

O polímero termofixo apresenta moléculas unidas quimicamente entre si por ligações cruzadas (*cross-links*), formando uma estrutura tridimensional e rígida (MALLICK, 2007). Uma vez que estas ligações cruzadas são formadas durante a reação de polimerização, também chamada de reação de reticulação ou cura, após esta etapa, o polímero termofixo não pode ser derretido pela aplicação de calor e pressão. Porém, em seu processo de cura o número de ligações cruzadas for baixo é possível ter flexibilidade em elevadas temperaturas.

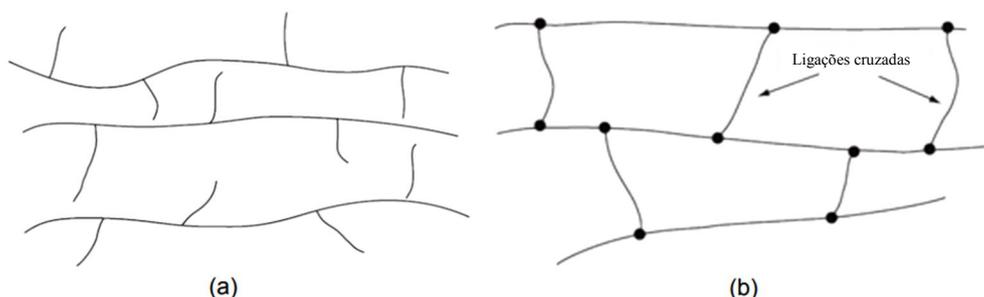


Figura 2: Esquema representativo de (a) um polímero termoplástico e (b) um polímero termofixo. Fonte: MALLICK, 2007.

Pascualt *et al.* (2013) descreve que as resinas epóxi podem ser produzidas a partir de diferentes predecessores, porém, as mais utilizadas comercialmente são as resinas sintetizadas a partir da reação de condensação entre bisfenol-A e a epícloridrina, sendo conhecidas como éter diglicídico de bisfenol-A, ou pela sigla DGEBA.

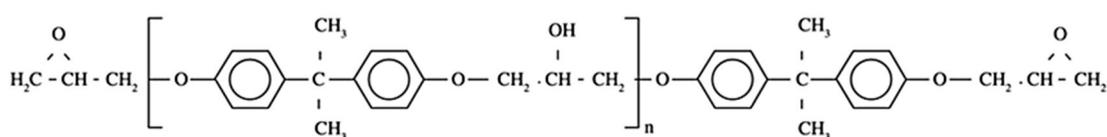


Figura 3: Estrutura química da molécula DGEBA. Fonte: PASCAULT *et al.*, 2013.

Esta pesquisa teve por objetivo avaliar as propriedades dos painéis lignocelulósicos produzidos a base de resíduos de casca de café e resinas epóxi de óleos vegetais, empregados em diferentes proporções, variando de 30% a 50% em volume. Foi verificada as propriedades físicas e mecânicas dos painéis compósitos produzidos com partículas de casca de café, óleos epoxidado e resinas epóxi.

Assim, diante deste contexto, surge o seguinte problema de pesquisa: “Qual a viabilidade de produção de painéis lignocelulósicos a base de resíduos de casca de café e resinas epóxi de óleos vegetais?”

Este trabalho se justifica por contribuir com o desenvolvimento de novos materiais produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos e resinas epóxi derivadas de óleos vegetais.

OBJETIVOS

A presente proposta tem como objetivo geral apresentar a viabilidade de produção, caracterização química e mecânica de materiais compósitos produzidos a partir de resíduos de casca de café e resinas epóxi derivadas de resíduos de óleos vegetais. Os objetivos específicos são:

- Caracterizar as matérias-primas: resinas epóxi derivadas de óleo de soja residual, resíduos de casca de café;

- Preparar e caracterizar as matrizes de compósitos sendo resíduos de casca de café/ resinas epóxi em diferentes percentuais de reforço orgânico;
- Confeccionar corpos de prova para ensaios mecânicos de tração.

METODOLOGIA

O processo de preparação dos compósitos reforçados com percentuais (%) de resíduos de casca de café tiveram como direcionamento operacional o procedimento descrito por Prabhakar *et al.* (2015). Os corpos de prova foram preparados de acordo com as seguintes orientações:

- I. A quantidade desejada em % de resíduos de casca de café e resina epóxi foi dividida em 30% a 50% para cada um dos corpos de prova (CP). Foram misturadas em um recipiente sob agitação vigorosa durante 10 minutos em um agitador mecânico;
- II. As etapas de pré e pós-cura foram aglutinadas em uma única etapa: os corpos de prova foram colocados em estufa convectiva por 3 horas a 150 °C, em seguida foram retirados da estufa, os corpos de prova receberam resfriamento forçado por 30 minutos até a temperatura ambiente.

Os ensaios de tração foram realizados segundo a norma ASTM D3039 (2017) em uma máquina universal de ensaios mecânicos, operando com uma célula de carga de 2000 kgf e uma velocidade de 5 mm/min, para termo de comparação, os corpos de prova de resina pura foram preparados de acordo com a norma ASTM D638 (2014).

Para os ensaios, a partir da produção da resina epóxi e do óleo de soja epoxidado, a caracterização físico-química do polímero termofixo de óleo de soja epoxidado 100%, do polímero termofixo com mistura de resina epóxi 50% e óleo epoxidado a 50% e dos diferentes compósitos produzidos de acordo com as condições experimentais serão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Planejamento fatorial e condições experimentais dos ensaios. Fonte: Autores do Trabalho (2020).

Corpos de prova	Composição	Resina epóxi	Casca de café	Granulometria
CP1	Resina epóxi e óleo epoxidado	50% - 50%	0%	-
CP2	Resina epóxi e óleo epoxidado	50% - 50%	30%	Mesh 20
CP3	Resina epóxi e óleo epoxidado	50% - 50%	30%	Mesh 35
CP4	Resina epóxi e óleo epoxidado	50% - 50%	30%	Mesh 42

Os teores de 30% de partículas de casca de café foram definidos como níveis experimentais para a quantidade de reforço a ser acrescentada à resina epóxi. Em testes preliminares foi possível identificar que frações inferiores a 20% de partículas de casca de café não apresentaram uma boa homogeneização da resina epóxi/partícula, nesta fração ocorre uma leve decantação das partículas antes do processo de cura. Os materiais para formação dos compósitos foram adicionados e misturados por agitação durante dez minutos. Os corpos de prova preparados no processo de cura são mostrados na Figura 4:

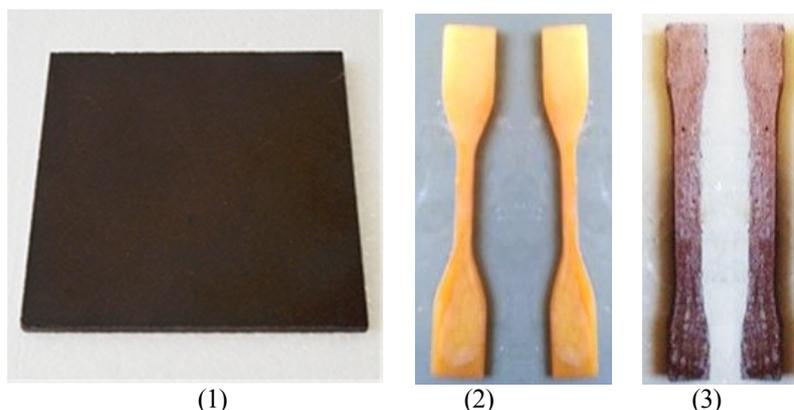


Figura 4: Corpos de prova: (1) Placas de compósito; (2) Epóxi pura; (3) Epóxi-madeira 30%. Fonte: Autores do Trabalho (2020).

Para o processamento de cura, foi adotado uma metodologia diferenciada, a operação foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa, os corpos de prova foram colocados na estufa não pressurizada por 3 horas a 150 °C, na segunda etapa os corpos de prova receberam resfriamento forçado por 30 minutos até a temperatura ambiente. Após o resfriamento, as peças foram removidas do molde permanecendo em repouso à temperatura ambiente para cumprir com o período de pós-cura, em seguida, os corpos de prova foram cortados nas dimensões requeridas pela norma ASTM D638 (2014) e encaminhados aos ensaios de tração.

Foram preparadas ao todo seis amostras para as análises. Os corpos de prova (CP1 a CP4) foram submetidos à carga de tensão até o rompimento. A velocidade de alongamento foi ajustada para 5,00 mm/min até a ruptura. O procedimento experimental e a definição das frações volumétricas, bem como o comprimento e a padronização das fibras, foram embasadas em estudos já realizados sobre compósitos poliméricos com resinas termofixas e fibras vegetais. Para o início do procedimento experimental, procedeu-se a definição das variações dos compósitos estudados, quanto a quantitativos dos elementos, frações volumétricas das matérias-primas e granulometria das partículas.

RESULTADOS

Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier - FTIR

Para acompanhar e descrever o processo de epoxidação de óleos vegetais foi adotada a técnica FTIR para descrever a formação do grupo epóxi e identificar reações colaterais como a abertura do anel epóxi, conforme Tarazona (2017).

Como resultado da análise das amostras de óleo de soja não foi encontrado o pico correspondente à ligação dupla ($C=C$) na faixa de 3005 cm^{-1} . Tal fato pode estar associado ao tratamento térmico dado ao óleo de soja virgem, onde ocorre a degradação dos ácidos graxos poli-insaturados. Na análise do óleo de soja epoxidado é possível identificar a ligação ($C-O-C$) dos grupos epóxidos que ocorre de forma destacada no estiramento do pico na faixa de 817 cm^{-1} . Os resultados são apresentados na Figura 5.

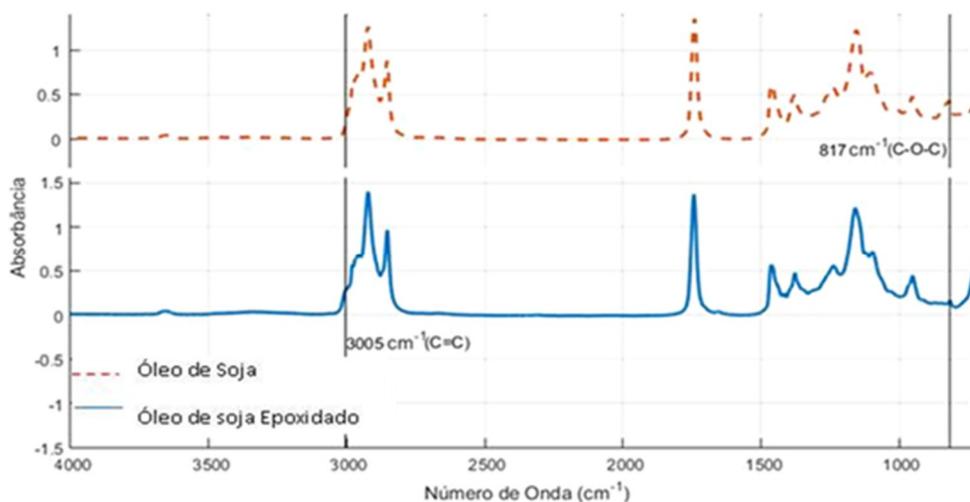


Figura 5: Análise por FTIR do óleo de soja e óleo de soja epoxidado. Fonte: Autores do Trabalho (2020).

As análises das amostras de pó de casca de café peneirada a *Mesh 35* e *Mesh 42* foram comparadas com diversos trabalhos já publicados para identificar o posicionamento em diferentes comprimentos de onda de componentes das referidas amostras. Os espectros de FTIR obtidos para as amostras de extratos das cascas de café em função da granulometria usada das bandas identificadas estão relacionadas com as respectivas ligações e os compostos de interesse.

Os resultados obtidos pela técnica FTIR das amostras de casca de café são identificados nos comprimentos de onda de 700 a 3200 cm^{-1} , os quais descrevem as regiões de sinais de importância significativa para o estudo e correspondem às faixas das absorções dos grupos funcionais presentes na composição química da madeira analisada. A estrutura de amostras vegetais conforme descrito por Tarazona (2017), é composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. A região de absorção da estrutura amorfa da celulose está indicada na faixa de 1423 cm^{-1} . Na faixa de 1475 e 1580 cm^{-1} , primeiro harmônico de OH, são apresentadas as regiões de absorções da estrutura semi-cristalina e cristalina da celulose. Os comprimentos de onda situados entre 2280 e 2330 cm^{-1} , descrevem, segundo os autores, a região de ocorrência das absorções de $CH+CH$, CH_3 (TSUCHIKAWA; SIESLER, 2003).

A composição química da casca de café, segundo Brand *et al.* (2000) contém: 11,98% de umidade, 31,86% de fibras, 26,50% de açúcares totais, 1,50% de lipídeos, 6,03% de cinzas, 11,70% de proteína, 9,30% de taninos e 1,20% de cafeína.

Estudo da resistência mecânica

Para este experimento a resina epóxi do tipo DGEBA utilizada foi a Araldite® GY-260, fabricada pela Hunstman Química do Brasil Ltda. Sua apresentação é na forma de resina líquida formulada à base de Bisfenol e não modificada, de alta viscosidade e densidade líquida. Os dados de caracterização com a análise físico/química da resina epóxi são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Análise física/química da resina epóxi do tipo DGEBA Araldite® GY-260. Fonte: HUNSTMAN, 2011.

Propriedades	Unidade	Resultados
Estado físico	---	Líquido
Viscosidade a 25 °C (DIN 53015)	mPas	12.000 - 16.000
Equivalente epóxi	g Eq ⁻¹	185 - 196
Teor epóxi	Eq kg ⁻¹	5,10 - 5,40
Cor	Gardner	≥ 3
Massa específica a 20 °C	g cm ⁻³	1,20

Para a preparação dos corpos de prova, as cascas de café foram secas em estufa não pressurizada por 3 horas a 105 °C em que o teor de umidade das partículas na entrada do processo encontrava-se superior a 50% (base úmida) e na saída, entre 2 e 8% de umidade. Esta etapa ocorre para minimizar o efeito da formação de alta pressão interna de vapor durante a prensagem a quente e ocorrência de delaminação dos painéis e corpos de prova.

Como resultado significativo no levantamento feito, foi possível identificar a elevação nos módulos de elasticidade e resistência à tração com a adição de fibras lignocelulósicas de casca de café à matriz referência. Devido a característica quanto à deformação do polímero termofixo, foi apurado significativa alteração do módulo de elasticidade em função da incorporação do reforço de casca de café adicionado à matriz polimérica.

Os dados apurados para os ensaios mecânicos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Medidas do ensaio de tração e alongamento. Fonte: Autores do Trabalho (2020).

Médida (mm)	CP1		CP2		CP3		CP4	
	L ₀	L ₁						
Comprimento	115	115	166	166	166	166	166	166
Dist. Garras	65	66,74	115	116,03	115	116,66	115	116,28
A (%)	2,13%		0,62%		0,73%		0,77%	
Média %	-				0,64%			

A (%): Alongamento percentual até a ruptura conforme norma ASTM D638 (2014).

Ao analisar os valores obtidos nos ensaios de tração, constata-se que as propriedades mecânicas dos compósitos epóxi-casca de café com os percentuais de 30% de carga orgânica em diferentes granulometrias, apesar da característica de elevada dureza, apresentam até a ruptura a oscilação de deslocamento 0,62% a 0,77% em seu alongamento, isto demonstra ser viável a sua utilização como reforço orgânico em matrizes poliméricas para obtenção de compósitos lignocelulósicos. A análise dos valores de tensão máxima do ensaio de tração ficou bem próximos para os materiais compósitos CP2 e CP4, sendo 18,415 MPa e 18,274 MPa, respectivamente. Com estes resultados, foi apurado que tais características permitem substituir de forma similar a madeira natural em aplicações nas áreas de arquitetura, construção civil, embalagens, logística e em outros setores.

CONCLUSÕES

Uma das principais alternativas para o aproveitamento dos resíduos de casca de café resultante da alta produtividade do grão é a transformação física em um produto de maior valor agregado para o mercado consumidor. Os

levantamentos apurados e a caracterização dos materiais demonstram que o objetivo proposto neste estudo foi alcançado, assim, pela análise geral dos resultados obtidos e, com base nos valores mínimos exigidos pela norma ASTM D638 (2014), as diferentes proporções estudadas nesta pesquisa podem ser recomendadas como o uso de fibras lignocelulósicas de casca de café e resinas epóxi. Dentro do mesmo nível de resina aplicada (70%), não foram constatadas diferenças significativas no módulo de elasticidade entre as chapas de diferentes granulometrias. Os resultados levam a concluir que é possível ter outra destinação aos resíduos de casca de café.

Como sugestão para novos experimentos, pode-se realizar ensaios mecânicos mais específicos em condições extremas de temperatura (alta/baixa) para verificar o comportamento deste material compósito.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGMEC da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG pela estrutura física e suporte. Os autores agradecem às Agências Brasileiras CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Angélico, R.A. **Avaliação de modelos de falhas progressivas para estruturas em material compósito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, 2009.
2. ASTM D3039. **Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials**. 2017.
3. ASTM D638. **Standard test method for tensile properties of plastics**. 2014..
4. Bledzki, A.K., Gassan, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science**, v. 24, n. 2, p. 221-274. 1999.
5. Brand, D., Pandey, A., Roussos, S., Soccol, C.R. Biological detoxification of coffee husk by filamentous fungi using a solid state fermentation system. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 27, n. 1-2, p. 127-133, 2000.
6. Cantwell, W.J., Morton, J. The impact resistance of composite materials – A review. **Composites**, v. 22, n. 5, p. 347-362, 1991.
7. Eisfeld, C.L., Berger, R. Análise das Estruturas de Mercado das Indústrias de Painéis de Madeira (Compensado, MDF e OSB) no Estado do Paraná. **Floresta**, v. 42, n. 1, p. 21-34, 2012.
8. HUNTSMAN CORPORATION. **Selector Guide Indd - Advanced Materials High Performance Components**. São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.huntsman.com/portal/page/portal/D47E2E526C8773F8E040EBCD2B6B0311>>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2020.
9. Mallick, P.K. **Fiber-Reinforced Composites. Materials, Manufacturing and Design**, 3 ed. CRC Press, 2007.
10. Mota, R.C.S. **Análise da viabilidade técnica de utilização da fibra de bananeira com resina sintética em compósitos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.
11. Pascault, J.-P.; Sautereau, H.; Verdu, J., Williamns, R.J.J. Thermosetting Polymers. **In: Thermosetting Polymers**, in Handbook of Polymer Synthesis, Characterization, and Processing, E. Saldívar-Guerra e E. Vivaldo-Lima, Orgs. John Wiley & Sons, Inc., 2013, p. 478.
12. Prabhakar, M.N., Shah, A.U.R., Rao, K.C., Song, J.-I. Mechanical and thermal properties of epoxy composites reinforced with waste peanut shell powder as a bio-filler. **Fibers and Polymers**, v. 16, n. 5, p. 1119-1124, 2015.
13. Tarazona, E.R.T. **Aproveitamento da fibra de borra de café como material de reforço em compósitos com matriz de resina epóxi preparada a partir de óleo de cozinha usado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.
14. Tsuchikawa, S., Siesler, H.W. **Near-infrared spectroscopic monitoring of the diffusion process of deuterium-labeled molecules in wood**. Part II: hardwood. *Appl Spectrosc.* 2003.