UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS

NUBIA MIREYA GARZÓN BARRERO

Estudo da durabilidade de painéis de partículas de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona para aplicação na construção civil.

Pirassununga - SP
2015

NUBIA MIREYA GARZÓN BARRERO

Estudo da durabilidade de painéis de partículas de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona para aplicação na construção civil.

Tese apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências.

Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais Voltados à Agroindustria.

Orientador:

Holmer Savastano Junior

Pirassununga - SP

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Serviço de Biblioteca e Informação da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos
da Universidade de São Paulo

G245e

Garzón Barrero, Nubia Mireya
Estudo da durabilidade de painéis de partículas de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona para aplicação na construção civil / Nubia Mireya Garzón Barrero. -- Pirassununga, 2015.
230 f.
Tese (Doutorado) -- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos – Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Biossistemas.
Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais Voltados à Agroindústria.
Orientador: Prof. Dr. Holmer Savastano Junior.

1. Resíduos agroindustriais 2. Durabilidade 3. Envelhecimento acelerado 4. Painéis particulados 5. Mamona. I. Título.

Dedico o meu trabalho a minha querida e grande família.

A todos ustedes que con paciencia, alegria y fortaleza hicieron parte de esta nueva meta alcanzada, dedico desde mi corazón.

A minha querida e linda mãe Blanca pelo seu amor, fortaleça feminina e confiança depositada em mim. Ao meu querido pai (Eliecer) in memoriam por sempre me impulsar a aprender e conhecer do mundo. As minhas queridas irmãs (Stella e Yaneth) por sempre me apoiar e me dar forçã para continuar. Aos meus queridos irmãos (Carlos, Eliecer, Lucho, Efrain e Luis C) por me apoiar sempre. A todos meus sobrinhos que adoro de coração (Andreita, Alejandra, Juan Sebastian, Valentina, Kevin, Felipe, Diego, Chichan, Juan Carlos, Tatiana, Sebastian, Lady e Jhon) por esse carinho e sorriso sempre sincero.

Nube

Agradecimentos Institucionais

A Universidade de São Paulo porque representa uma instituição de abertura a grandes oportunidades. Assim como todos os seus funcionários das diferentes áreas, sempre dispostos a servir.

A Prefeitura do campus da USP: A todos os funcionários do restaurante escolar pela sua dedicação e esforço para brindar comida gostosa. A toda a equipe de faxineiras do laboratório que sempre estiveram presentes na manutenção das instalações para nos sentir confortáveis. A todos os motoristas e vigilantes que prestam o serviço desde cedo ate altas horas da noite com boa disposição.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa CNPq e da Cordenação de Aperfeiçonamento para o Ensino Superio CAPES pela concessão das bolsas.

Ao pessoal do Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeiras do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP). Ao professor Mario Tomazello, a Samara Franzol, Dr. Gilles Chaix, Maria e todos os colegas que colaboraram com o meu trabalho.

Ao pessoal do Laboratório Hall Tecnológico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli/USP). A Dr. Marcia Shirakawa pela toda sua valiosa experiência e disposição incondicional para me ajudar no estudo de fungos.

Ao pessoal do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) por abrir suas portas. A Fati, Marilia, Cidão e infinita gratidão para o professor Francisco Rocco pela sua experiência de mestre e amigo.

Ao pessoal Laboratório de Árvores, Madeiras e Móveis do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). A Ricardo Pereira e Dr. Sergio Brazolin, pela toda sua disposição para me ajudar no ensaio de biodeterioração por fungos.

Muitos amigos, familiares, professores e colegas foram parte deste trabalho, para vcs e para aqueles que não estão aqui registrados mais que colaboraram durante minha estadia aqui no Brasil. Muito obrigada.

A minha querida família que desde Colômbia que depositou a confiança e o animo para estudar e crescer, pelo seu amor, carinho e fortaleça e además acompanharam a minha mãe durante minha ausência. A minhas tias (Elvira, Lilia, Luz y Miryam) e tios. Aos meus primos (Memo, Macen e Carlos Andres), que sempre me apoiaram, a minhas cunhadas (Marlen, Roxana, Mindred e Marta) e ao meu querido cunhado Jairo y a Guillermo. Gracias.

Ao professor Holmer Savastano Junior pela grandiosa oportunidade de aprender e crescer professionalmente abrindo as portas do conhecimento, além disso, pela sua valiosa amizade.

Aos professsores Juliano Fiorelli, João Adriano Rossignollo e Eliria Agnolon Pallone pela sempre disposição e apoio.

A minhas queridas amigas e colegas Débora Oliveira (Dè) e Viviane Da Costa (Garota), por sempre estar prestes ao me ajudar de forma incondicional e compartilhar momentos de alegria.

Aos meus queridos amigos Diogo Sartori, Erika Yukari e Michelle Rodrigues, por todos os momentos "exquisitos" ao redor de um bom jantar compartilhando grandes experiências e conhecimento.

Aos meus queridos amigos e colegas da família Constrambi toda minha gratidão de coração pelo tudo o seu apoio, animo e parceria durante todo este tempo e de acolher à "Colombiana" como toda uma Brasileira.

A Ronaldo, Gonzalo, Bruna, Pati, Mariana, Stephen, Julian, Valdemir, Loic, Matheus, Julio pela amizade.

A Zaqueu Freitas porque sempre teve a disposição para me ajudar. A Diego Ferrari por sempre encontrar uma solução as minhas perguntas.

Ao meu querido amigo e professor Antonio Mesquita por me brindar sempre toda sua experiência de vida e ter o conselho certo no momento certo (Gratidão).

Ao meu querido amigo, professor e pesquisador VIP Sergio Santos porque a maior lição aprendida é (não perca o foco).

Ao querido professor Cesar Gonçalves de Lima por me ajudar a solucionar as coisas não só com a estatística é ser um amigo.

Aos alunos de iniciação cientifica Gustavo (Salame), Guilherme, Diego, Jhonatan pela sua valiosa ajuda.

Aos amigos Noemi Chambi, Julio Guerra, Fernando Coronado, Juliano Gonçalves por todos os momentos ao rededor de uma boa mussica para reconfortar nossa saudade.

A todos meus parceiros e amigos Colombianos del Hospital Vista Hermosa (Zaide, Olga, Willi, Sandra, Tutu, Diegos, Robertico, Liz, Hilda, Marta, Valdomiro, Eduardo etc) pelo seu apoio .

A professora Catarina e Rodrigo Lourenço pelo toda sua disponibilidade e amizade.

Ao professor Celso Oliveira por ter aberto as portas a novos aprendizados e o seu apoio. Gratidão para Ana Maria Pichinelli e atodos os colegas do grupo GREEN.

Ao professor Valdo Hering e aos colegas de agrárias obrigada.

A Hugo Telles e Thaysa Santos pela valiosa amizade. A Rosa Dulce pela linda e sincera amizade.

A Martha Arandia pelo seu apoio desde a distância e a Juan Pantoja grande amigo, a Saul Guevara por me ensinar a paciência.

A todos os compatriotas e amigos da Colômbia e extrangeiros que moram aqui, por estreitar os laços de amizade. A Fabian y Maria por ter sido uma companhia imprtante nesta ultima fase.

A Cecilia Bonafé e Celso Jose Peres minha gratidão e carinho por te recebido de vcs o carinho de pais aqui no Brasil. A Celso pelo seu companherismo.

A minhas queridas amigas da Colômbia Maria Crisitina Moncayo, Julieta Gonzalez e Daisy Galvis por fazer parte desde anseio feito realidade, que 10 anos atrás foi só parte de uma conversa num café.

A minhas queridas amigas Gloria Urrea e Katia Rodrigues, da nossa republica “moulin rouge” por me brindar sempre companhia, fortaleça e muita alegria.

O meu carinho e gratidão do meu coração para **MAR**cio Mafra.

“Solo la educación no es suficiente, debemos tener un corazón mas amoroso. Sin una especie de compasión en el corazón a veces la educación puede traer mas problemas”

Dalai Lama

“Só a educação não é suficiente, devemos ter um coração mais amoroso. Sem uma espécie de compaixão no coração, a educãção pode-nos trazer mais problemas”

Dalai Lama

El hombre y la naturaleza de la mano no debe ser uma utopia. Nube

RESUMO

GARZON BARRERO. N. **Estudo da durabilidade de painéis de partículas de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona para aplicação na construção civil.** 2015. 231f. Tese (Doutorado)- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2015.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho físico-mecânico e a durabilidade de painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar com resina bicomponente a base de mamona (BCP) e compará-los com painéis de partículas de madeira comerciais (*Medium Density Particleboard* - MDP). Os painéis de bagaço de cana de açúcar foram fabricados com um teor de resina poliuretana a base de óleo de maona de 15%. O desempenho físico e mecânico dos painéis particulados foi analisado com base nas prescrições dos documentos normativos vigentes. Ambos os materiais foram revestidos superficialmente com resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona. Avaliou-se a influência do tratamento das bordas na deterioração e no desempenho dos painéis. O acompanhamento das propriedades físico-mecânicas foi realizado antes e após os ensaios de envelhecimento por exposição natural durante 3, 6 e 12 meses, envelhecimento acelerado e de intemperismo artificial. Foi feita a avaliação, da suscetibilidade ao crescimento gerada pelo ataque de fungos emboloradores e apodrecedores nos materiais durante o envelhecimento natural e no ensaio acelerado. Foi realizada a análise colorimétrica para a identificação de mudanças de cor e brilho nos materiais após os ensaios de deterioração. Foram utilizadas as técnicas de densitometria de raios X, espectroscopia por infravermelho próximo (NIR). Os resultados obtidos indicaram a selagem lateral permitiu avaliar a superfície exposta do material permitindo a entrada da água pela superfície avaliando o efeito dos agentes de deterioração. A porcentagem de retenção para o Módulo de ruptura após o ensaio de envelhecimento por imersão em agua e secagem (APA D1) foi de 87% e 3% para BCP e MDP sem revestimento respectivamente e de 90% e 3% para BCP e MDP com revestimento. A porcentagem de retenção das propriedades mecânicas em ambos os submetidos à exposição natural diminuiu em função do tempo. Entretanto o porcentagem de retenção para os materiais BCP e MDP com revestimento superficial foi de 76% e 60% para MOR. A exposição natural mostrou que os fungos emboloradores foram predominantes em ambos os materiais. Ambos os materiais com revestimento superficial apresentaram entre 1-10% de colonização com um 70% de probabilidade. Revestimento de resina de óleo de mamona reduz o crescimento de fungos em ambos os materiais no ensaio acelerado. O perfil de densitometria permitiu analisar o processo de fabricação dos painéis e permitiu identificar a deterioração gradativa do ambos os materiais após os ensaios de envelhecimento. A intepretação mediante a analise de componentes principais (ACP) na aplicação do NIR comportou a classificação das características relacionadas a cada ensaio de deterioração de ambos os materiais sem revestimento superficial. Com base nos resultados deste trabalho, foram propostas contribuições para ajustes de metodologias para a avaliação da durabilidade e do desempenho físico e mecânico dos painéis particulados, tendo em vista a sua viabilidade técnica, em sistemas construtivos da construção civil.

Palavras-Chave: Resíduos agroindustriais, durabilidade, envelhecimento acelerado, painéis particulados, mamona.

ABSTRACT

GARZON BARRERO, N. Study of the durability of sugarcane bagasse particle boards and castor oil resin for application in civil construction.. 2015. 231f. Tese (Doutorado)- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2015.

This work aimed to evaluate the physical-mechanical support and durability of sugarcane bagasse particle boards with a castor oil based bicomponent resin (BCP), and compare them to commercial wood particle boards (Medium Density Particleboard – MDP). The sugarcane bagasse boards were produced with a 15% castor oil based polyurethane resin. The physical and mechanical performance of the particle boards were analyzed based on the requirements of existing standardization documents. Both materials were superficially coated with castor oil based bicomponent polyurethane resin. The influence of treated edges on the decay and performance of the boards were evaluated. Monitoring the physical and mechanical properties was carried out before and after the aging tests by natural exposure during 3, 6, and 12 months, accelerated aging, e artificial weathering. An evaluation was made of the susceptibility to growth generated by the attack of moldy and rotting fungi in materials during the natural aging and accelerated tests. A colorimetric analysis was performed to identify the changes in color and brightness in the materials after the deterioration tests. X-rays densitometry and infra-red spectroscopy (NIR) techniques were used. The results obtained indicated that the lateral sealing allowed for an evaluation of the material surface exposed, permitting the entrance of water by the evaluating the effect of the deterioration agents. The retention percentage for the Module of rupture after the aging test by immersion in water and drying (APA D1) was 87% and 3% for BCP and MDP without coating, respectively, and 90% and 3% for BCP and MDP with coating. The retention percentage of the mechanical properties in both samples submitted to natural exposure decreased in relation to time. Meanwhile, the retention percentage for the BCP and MDP with a superficial coating was 76% and 60% MOR. Natural exposure showed that mold were predominant in both materials. Both of the materials with superficial coatings presented between 1-10% colonization with a 70% probability. Castor oil based resin decreased mold in both materials.The densitometry profile to analyze the production of the boards and allowed the identification of the gradual degradation of both materials after the aging tests. The interpretation through Principal component analysis (PCA) in the NIR application permitted the classification of characteristics related to each deterioration test for both materials without superficial coating. Based on the results of this work, contributions were proposed to adjust methodologies for the evaluation of durability and physical and mechanical performance of the particle boards, having in view its technical viability, in structural systems of construction.

Keywords: agro-industrial wastes. durability. accelerated aging. particulate boards. castor oil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura do trabalho 30
Figura 2. Classificação dos painéis de madeira. 32
Figura 3. Usos potenciais dos subprodutos da indústria sucroalcooleira. 36
Figura 4. Fatores ou agentes de degradação que influenciam a durabilidade dos materiais. 44
Figura 5. Métodos de avaliação da durabilidade 45
Figura 6. Envelhecimento natural a) bancada b) ângulo de exposição de materiais ao ar livre. 48
Figura 7. Fungos deterioradores da madeira. 53
Figura 8. Fluxograma ilustrativo do processo de fabricação dos painéis particulados com bagaço de cana-de-açúcar 79
Figura 9. Etapas de ensaio de envelhecimento acelerado ASTMD 1037 em painéis de bagaço de cana-de-açúcar sem revestimento superficial 82
Figura 10. Delaminação e inchamento na espessura em corpos de prova no ciclo 5 etapas de ensaios ASTMD 1037 E . 0 ciclos: a)BCSR b)BCCR c) BCSR d)BCCR. (e) Etapa F calor em ar seco 6 ciclos. Os círculos indicam a delaminaçao nas bordas do corpo de prova 83
Figura 11. Micrografia obtida por MEV de corpos de prova de painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar BCPCR a) Sem envelhecimento (0 Ciclos); b) Após 6 ciclos. BCPSR c) Apos envelhecimento (6 ciclos) d) Detalhe de corpos de prova envelhecidos 1-vazios 2-Resina 3- Partículas de bagaço de cana de cana-de-açúcar. 85
Figura 13. Metodologias avaliadas para a aplicação revestimento superficial em painéis particulados a)Rolo de lã sintética b)Rolo de espuma c)Espátula rígida d)Espátula Suave e)Pincel 94
Figura 14. Fluxograma de definição do tratamento superficial e do tratamento lateral dos corpos de prova. 95
Figura 15. Tratamento lateral nos corpos de prova i.e BCP a) Aplicação de resina acrílica para madeira, b) Aplicação de selante, c) Aplicação de verniz, d) Corpo-de-prova acondicionado para ensaio. 95
Figura 16. Fotos que ilustram o ensaio para definição de proporção da resina de óleo de mamoma como revestimento superficial. Proporções poliol: catalisador em volume testadas: a) 60:40, b) 70:30, c) 80:20, d) 90:10, e)40:60, f) 30:70, g) 20:80, h)10:90, i) 50:50. 97
Figura 17. Aplicação da resina com pistola de ar comprimido a) montagem dos corpos de prova para aplicação revestimento e b) Aplicação de resina 98

Figura 18. Efeito do tempo x selagem lateral x material nas propriedades físicas para painéis BCP e MDP: Absorção de água % (a) 2 h (b)24 h. Inchamento em espessura (a) de 2 h e (b) de 24 h..... 101
Figura 19. Medias de Inchamento em espessura (%) para Tempo x Revestimento x Material em painéis BCP e MDP (a) 2 horas (b) 24 horas..... 102
Figura 20. Médias de absorção de água (%) por revestimento superficial e a selagem da borda..... 103
Figura 21. (a) Selagem de bordas com massa acrílica, (b) Aplicação de selante e aplicação de verniz marítimo. Resina poliuretana à base de óleo de mamona: c) Aplicação de resina com pistola de ar comprimido d) Corpos-de-prova BCP com revestimento. 110
Figura 22. Ensaios de envelhecimento acelerado realizados em painéis de bagaço de cana-de-açúcar e painéis de madeira MDP. 110
Figura 23. Câmara de envelhecimento UV EQUILAM modelo EQUV..... 111
Figura 24. Etapas do ensaio APA D-1: a) Imersão em água, b) ar quente e seco e c) acondicionamento. 112
Figura 25. a) Câmara climática no ensaio de envelhecimento acelerado. b) Corpos-de-prova BCP e MDP sendo colocados na câmara climática..... 113
Figura 26. Corpos-de-prova MDPSR submetidos ao intemperismo artificial UV600h a) Face não exposta b) Face exposta c) Bordas laterais 116
Figura 27. Imagens de microscopia eletrônica de varredura em painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar. BCPSR com e sem revestimento antes e depois do ensaio por intemperismo artificial UV600h. (a) BCPSR Antes (b) BCPSR Depois. (c) BCPCR Antes e (d) BCPCR Depois. Pontos A (Fibras), Ponto B(Resina poliuretana a base de óleo de mamona), Pontos C e D (Vazios e espações entre fibras e resina) e Ponto E (cavidades). 118
Figura 28. Médias de densidade aparente. (a) revestimento x condições de envelhecimento acelerado. (b) material x condições de envelhecimento acelerado. Sem revestimento superficial (SR) com revestimento superficial (CR). 122
Figura 29. Inchamento em espessura após ensaios de envelhecimento Acelerado nos materiais (a) BCP e (b) MDP. Sem revestimento superficial (SR) com revestimento superficial (CR). 123
Figura 30. Corpos-de-prova de MDP e BCP. (a) Sem revestimento superficial e (b) Com revestimento superficial. Referência é igual 0 ciclos. 124
Figura 31. Imagens de microscopia eletrônica de varredura de superfícies de painéis particulados após ensaios de envelhecimento acelerado. 126
Figura 32. Adesão Interna (MPa) após ensaios de envelhecimento Acelerado nos materiais (a) BCP e (b) MDP. CR: Com revestimento. SR: sem revestimento 129

Figura 33. Imagens obtidas por MEV de painéis de bagaço de cana-de-açúcar (BCP) a) Inicial com revestimento e b) sem revestimento, após ensaios de envelhecimento acelerado APA D1. 131
Figura 34. Propriedades mecânicas após ensaios de envelhecimento Acelerado. Modulo de Elasticidade: (a) Material vs. Ensaios de envelhecimento; Módulo de Ruptura (b) Material vs. Ensaios de envelhecimento CR: com revestimento. SR: sem revestimento. 134
Figura 35. Parametros colorimétricos das superfícies nos materiais BCP e MDP após exposição ensaios de envelhecimento aceleraado e colonização por fungos emboloradores. (a e b): a* (c e d): b*. (e e f): L* e (g e h): ΔE* 136
Figura 36. (a) Selagem de bordas com massa acrílica, (b) Aplicação de selante e aplicação de verniz marítimo. Resina poliuretana à base de óleo de mamona: c) Aplicação de resina com pistola de ar comprimido d) Corpos de prova BCP com revestimento 150
Figura 37. Bancada de exposição para envelhecimento natural 151
Figura 38. Gráficos de parâmetros meteorológicos (c) Radiação solar e temperatura e (d) precipitação e umidade relativa. Estação Campus FZEA/USP. 155
Figura 39. (a) Alteração inchamento na espessura em função do tempo de exposição. 156
Figura 40. Bordas de corpos de prova de painéis de partículas comerciais MDP e partículas de bagaço de cana de açúcar BCP ao longo do tempo de exposição; Com revestimento superficial (CR) Sem revestimento (SR) 158
Figura 41. Inchamento na espessura em função do tempo de exposição e revestimento superficial. (a) BCP (b) MDP 159
Figura 42. Densidade aparente (Kg/m^3). (a) Efeito do material BCP e MDP e (b) Efeito do revestimento e tempo de exposição 160
Figura 43. Imagens de microscopia eletrônica de varredoura em painéis particulados após 12 meses de exposição (a) BCPSR sem revestimento (b) MDPSR com revestimento superficial 162
Figura 44. Efeito do revestimento superficial e tempo de exposição ao envelhecimento natural no módulo de elasticidade: (a) Com revestimento superficial -CR (b) Sem revestimento superficial –SR. 165
Figura 45. Efeito do revestimento superficial e tempo de exposição ao envelhecimento natural no módulo de ruptura: (a) Com revestimento superficial -CR (b) Sem revestimento superficial –SR. 167
Figura 46. Efeito do revestimento superficial e tempo de exposição ao envelhecimento natural na adesão interna: (a) Com revestimento superficial -CR (b) Sem revestimento superficial –SR. 168

Figura 47. Aparência dos painéis particulados BCP e MDP após exposição em intemperismo natural. 169
Figura 48. Efeito do revestimento superficial nos materiais BCP e MDP sob a*, b*, L*, ΔE*. Valores após exposição ao intemperismo natural. 172
Figura 49. (a) Selagem de bordas com massa acrílica, (b) Aplicação de selante e aplicação de verniz marítimo. Resina poliuretana à base de óleo de mamona: (c) Aplicação de resina com pistola de ar comprimido (d) Corpos de prova BCP (e) Corpos de prova MDP. 182
Figura 50. Comportamento mensal de parâmetros climáticos no período de exposição a) Temperatura e precipitação b) Umidade relativa do ar e radiação solar..... 183
Figura 51. Presença de fungos em corpos de prova BCP e MDP com e sem revestimento superficial (a) antes e (b) 12 meses após exposição ao intemperismo natural..... 187
Figura 52. Efeito do tempo no grau de colonização em materiais BCP e MDP com e sem revestimento superficial no ensaio acelerado (ASTMD 3273-12, 2012)..... 188
Figura 53. Imagens digitais dos corpos de prova durante o ensaio acelerado para avaliação do desenvolvimento de fungos emboloradores (ASTMD 3273-12). 189
Figura 54. Micrografias de painéis particulados colonizados por fungos emboloradores por exposição natural - 12 meses. BCPCR (a) Face Superior (b) Face Inferior; BCPSR (c) Face superior (d) Face inferior. 191
Figura 55. Imagens de microscopia eletrônica de varredura em painéis particulados Painel antes da exposição (a) BCPCR. (b) MDPCR ; Após exposição natural -12 meses (c) BCPCR. (d) MDPCR 192
Figura 56. Imagens de microscopia eletrônica de varredura de painéis de bagaço de cana de açúcar em teste acelerado. BCPSR em a) inicial, em b) após 28 dias de incubação , BCPCR em c) inicial, em d)após 28 dias de incubação. 197
Figura 57. Imagens de microscopia eletrônica de varredura de painéis comerciais de madeira MDP submetidos ao ensaio acelerado (ASTM D3273-12, 2012). Sem revestimento superficial (MDPSR) (a) inicial, em (b) após 28 dias de incubação. Com revestimento superficial (MDPCR) em (c) inicial, em e (d) após 28 dias de incubação.... 198
Figura 58. Modulo de elasticidade após ensaios de crescimento de fungos emboloradores natural (12 meses) acelerado (28 dias). (a) BCP e MDP (b) Com e Sem revestimento superficial..... 199
Figura 59. Modulo de ruptura após ensaios de crescimento de fungos emboloradores natural (12 meses) e acelerado (28 dias). (a) BCP e MDP com e sem revestimento superficial; em b) no ensaio acelerado ou em exposição natural. 200

Figura 60. Analise de perfil de densidade. (a) Densitômetro Quintek QDP. zeta indica o ponto de leitura do equipamento em cada corpo de prova. (b) Leitura de perfil de densidade. 211
Figura 61. Analise de espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) a)Medição na superfície b) Medição lateral 211
Figura 62. Perfis de densidade após ensaios de durabilidade. BCPSR (a) Intemperismo natural (b) Ensaios acelerados. BCPCR(c) Intemperismo natural (d) Ensaios acelerados. 215
Figura 63. Perfis de densidade média para painéis homogêneos fabricados com resina poliuretana a base de óleo de mamona (a) Fibra de coco (b) Partículas de bagaço de cana de açúcar . 216
Figura 64. Perfis de densidade após ensaios de durabilidade. MDPSR (a) Intemperismo natural (b) Ensaios acelerados. MDPCR(c) Intemperismo natural (d) Ensaios acelerados. Ponto A: elevação no perfil devido camadas externas. Ponto B: Redução da densidade fase superior de exposição 12 meses. 217
Figura 65. Imagens de raios x digital para painéis BCP e MDP após ensaio de envelhecimento acelerado, intemperismo natural, intemperismo artificial e crescimento de Fungos. 219
Figura 66. Resultados da Análise de Componentes Principais dos dados espectrais para as amostras de BCP e MDP 220
Figura 67. Resultados da Analise de Componentes Principais dos dados espectrais para as amostras de (a) BCP SR e (b) BCPCR. 221
Figura 68. Resultados da Analise de Componentes Principais dos dados espectrais para as amostras após ensaio de envelhecimento natural (a) MDPSR e (b) MDPCR 222
Figura 69. Resultados da Analise de Componentes Principais dos dados espectrais para as amostras após ensaios de envelhecimento acelerado T82°C, UR93% e ASTMD 3273-12 (2012) (a) MDPSR e (b) MDPCR 223
Figura 70. Espectros de absorbância, obtidos entre (9000-4100 cm^{-1}) para painéis de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona após ensaios de envelhecimento. Natural (a) BSPSR e (b) BCPCR . Acelerado (c) BSPSR e (d) BCPCR. 225
Figura 71. Espectros de absorbância, obtidos entre (9000-4100 cm^{-1}) para painéis de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona após ensaios de envelhecimento. Natural (a) MDPSR e (b)MDPCR . Acelerado (c) MDPSR e (d) MDPCR. 226

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Florestas plantadas para fabricação de painéis de madeira. 34
Tabela 2. Propriedades físico mecânicas de painéis particulados à base de resíduos agroindustriais 38
Tabela 3. Propriedades físico –mecânicas de painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar 39
Tabela 4. Propriedades físico-mecânicas de painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar e outros resíduos lignocelulósicos 40
Tabela 5. Características das resinas empregadas na fabricação de painéis de partículas . 41
Tabela 6. Metodologías de envelhecimento acelerado em laboratório 50
Tabela 7. Metodologias de envelhecimento acelerado aplicadas em painéis 51
Tabela 8. Normas de avaliação a biodeterioração biológica 54
Tabela 9. Problemas de saúde associados com o bolor e umidade em habitações 56
Tabela 10. Classificação dos substratos naturais quanto à degradabilidade microbiana e persistência no solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). 59
Tabela 11. Processo de degradação dos constituintes dos resíduos orgânicos. 60
Tabela 12. Avaliação de biodeterioração por fungos apodrecedores em painéis 61
Tabela 13. Condições de exposição no ensaio ASTMD 1037:2006 80
Tabela 14. Agentes e mecanismos de deterioração identificada no ensaio de envelhecimento acelerado ASTM D 1037 em painéis particulados à base de bagaço de cana-de-açúcar, com (BCP CR) e sem (BCP SR) revestimento superficial. 81
Tabela 15. Resultados do ensaio de inchamento em espessura residual (IE) de painéis de bagaço de cana-de-açúcar 83
Tabela 16. Valores médios das propriedades mecânicas dos painéis particulados antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado de acordo com a norma ASTMD-1037-2006. 86
Tabela 17. Efeitos dos tratamentos analisados estatisticamente 96
Tabela 18. Determinação de proporção de resina como revestimento superficial 98
Tabela 19. Propriedades de Inchamento e Absorção de água 99
Tabela 20.Etapas de exposição no ciclo 7 para envelhecimento artificial por UV ASTM G 154-06. 111
Tabela 21. Condições de exposição no ensaio APA D1:1994 112

Tabela 22.Condições de exposição aos agentes de degradação isolados. 112
Tabela 23. Requisitos estabelecidos para chapas de partículas. 114
Tabela 24. Propriedades Físico-mecânicas para corpos-de-prova de painéis de partícula de bagaço de cana-de-açúcar e resina poliuretana de óleo de mamona submetidos ao intemperismo artificial UV600h. 119
Tabela 25. Valores médios e os retidos das propriedades mecânicas para painéis particulados antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado 128
Tabela 26. Requisitos estabelecidos para chapas de partículas de madeira 152
Tabela 27. Valores médios e % de Retenção para Densidade aparente (Kg/m3) de painéis BCP e MDP submetidos ao intemperismo natural. 160
Tabela 28. Valores médios e os retidos das propriedades mecânicas para painéis particulados submetidos ao envelhecimento natural 164
Tabela 29. Resultados obtidos para a avaliação do crescimento de fungos emboloradores em painéis BCP e MDP. após 12 meses por tipo de material, revestimento e face.. com base nas notas de avaliação da norma ASTM D3273-12, no intemperismo natural (12 meses) Brasil Pirassununga-SP. 188
Tabela 30. Estimativas para os parâmetros do modelo de chances proporcionais na avaliação da colonização por fungos emboloradores no ensaio acelerado ASTM D3273-12 (2012) e exposição natural. 190
Tabela 31. Probabilidades determinadas para a colonização por fungos emboloradores nas interações entre revestimento, face e tipo de exposição 193
Tabela 32. Probabilidades determinadas para painéis de bagaço de cana de açúcar e madeira (MDP) nas interações entre material, revestimento e tempo de incubação para o ensaio de colonização por fungos emboloradores (ASTM D3273-12, 2012). 195
Tabela 33. Probabilidades do grau de colonização de fungos emboloradores para avaliação do revestimento e tempo de incubação no ensaio acelerado (ASTM D3273-12, 2012). ... 196
Tabela 34. Porcentagem média dos constituintes do bagaço de cana de açúcar e painel comercial MDP em sua composição química valores experimentais e da literatura 213
Tabela 35. Densidades máximas, médias e mínimas dos perfis obtidos para painéis de bagaço de cana de açúcar e painéis de madeira comercias após ensaios de durabilidade. 218

LISTA DE ABREVIATURAS, SIMBOLOS E SIGLAS

AA Absorção de água
ABIPA Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira
ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI Adesão interna
ANSI American National Standards Institute
AP Arrancamento de parafuso
ASTM American Society for Testing and Materials
BCP Painiel de partículas de bagaço de cana de açucar
CR Com revestimento superficial
DA Densidade Aparente
EPA Enviromental Protection Agency
FZEA Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos
IE Inchamento em espessura
IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO International Standard Organization
LVL Laminated Veneer Lumber
MDF Medium Density Fiberboard
MDI Di-isocianato de difenilmetano
MDP Medium Density Particleboard
MEV microscopia eletrônica de varredura
MF Melanina Formaldeído
MOE Módulo de elasticidade
MOR Módulo de ruptura
NBR Norma Brasileira de Regulamentação
NIR Espectroscopia por infravermelho próximo
OM Resina à base de óleo de mamona bicomponente
OSB Oriented Strand Board
PF Fenol Formaldeído
PPMD Painel de Partículas de Média Densidade
SR Sem revestimento superficial
UF Ureia Formaldeído
USP Universidade de São Paulo
UV Ultra Violeta

SUMÁRIO

1 Introdução 24

1.1 Justificativa 26
1.2 Objetivos 28
1.2.1 Objetivo geral 28
1.2.2 Objetivos específicos 28
1.3 Eixos de pesquisa 29
1.4 Estrutura do trabalho 29

Capitulo 1 -Revisão Bibliográfica

1 Painéis de partículas de madeira 31

1.1 **Produção Global de Painéis Particulados** 33
1.2 Painéis Particulados no Brasil 33

2 Bagaço de cana-de-açúcar 35

3 Painéis de Resíduos Lignocelulósicos 37

4 Resinas para fabricação de Painéis 40

5 Durabilidade de painéis particulados 43

5.1 Agentes ou fatores de deterioração 43
5.2 Mecanismos de degradação 45
5.3 Métodos de avaliação de durabilidade 45
5.3.1 Envelhecimento Natural 47
5.3.2 Envelhecimento Acelerado 49
5.3.3 Ensaios de durabilidade natural e biodeterioração por fungos 52

6 Comentários 63

7 Referências 63

Capitulo 2 - Avaliação de durabilidade de painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar usando ensaios de envelhecimento acelerado por ciclos ASTMD 1037.

1 Introdução 76

2 Materiais e Métodos 78

2.1 Fabricação de painéis de partículas não convencionais 78
2.2 Tratamento superficial 79
2.3 Ensaio de envelhecimento acelerado ASTM D 1037:2006 79

3 Resultados e Discussão 81

4 Considerações Finais 87

5 Referências 88

Capítulo 3 - Influência da selagem de bordas nas propriedades físicas de inchamento em espessura e absorção de água em painéis particulados.
1 Introdução 91
2 Materiais e Métodos 93
2.1 Painéis de partículas não convencionais 93
2.2 Painéis de madeira comercial (MDP) 93
2.3 Tratamento superficial e lateral dos corpos-de-prova 93
2.3.1 Tratamento superficial 94
2.3.2 Tratamento Lateral 95
2.3.3 Propriedades físicas de inchamento em espessura (IE) e absorção de água (AA) 96
2.3.4 Delineamento estatístico 96
3 Resultados e discussão 97
3.1 Tratamento superficial 97
3.1.1 Determinação da proporção dos componentes da resina poliuretana a base de óleo de mamona 97
3.1.2 Forma de aplicação da resina como revestimento superficial 98
3.2 Propriedades físicas de inchamento em espessura e absorção de água 99
4 Considerações finais 103
5 Referências 103
Capitulo 4 - Avaliação da durabilidade por ensaios de envelhecimento acelerado e intemperismo artificial em painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar e madeira.
1 Introdução 105
2 Materiais e Métodos 108
2.1 Painéis particulados 108
2.2 Tratamentos lateral e superficial dos corpos-de-prova 109
2.3 Ensaios de envelhecimento acelerado 110
2.3.1 Ensaio de envelhecimento por intemperismo artificial 111
2.3.2 Ensaios por ciclos de envelhecimento acelerado APA D1:1999 111
2.3.3 Exposição a agentes isolados de envelhecimento acelerado 112
2.3.4 Ensaio acelerado decrescimento de fungos emboloradores 113
2.4 Propriedades Físico-mecânicas 113
2.5 Análises de Cor e Brilho 115
2.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV). 115
2.7 Análise Estatística 115
3 Resultados e discussão 116
3.1 Envelhecimento por intemperismo artificial 116
3.2 Ensaios por envelhecimento acelerado e biodeterioração 121
3.2.1 Propriedades físicas 121
3.3 Propriedades Mecânicas 127
3.4 Mudanças em cor durante a exposição ao envelhecimento acelerado 134

4 Conclusões **138**

5 Referências **139**

Capitulo 5 - Avaliação por envelhecimento natural em painéis particulados de bagaço de cana de açúcar e madeira

1 Introdução **147**

2 Materiais e Métodos **149**

2.1 Produção dos painéis particulados 149
2.2 Tratamentos lateral e superficial dos corpos-de-prova 149
2.3 Ensaio de envelhecimento Natural 150
2.4 Propriedades Físico-mecânicas 151
2.5 Análise de Cor e Brilho 153
2.5.1 Fotografias digitais, de microscópio óptico e microscopia eletrônica de varredura (MEV). 153
2.5.2 Análise Estatística 154

3 Resultados e discussão **154**

3.1 Condições climáticas de exposição dos painéis 154
3.2 Inchamento em espessura: 155
3.3 Densidade Aparente 159
3.4 Propriedades mecânicas 163
3.5 Mudanças na cor durante a exposição ao intemperismo natural 169

4 Conclusões **173**

5 Referências **174**

Capitulo 6 Avaliação do crescimento de fungos emboloradores e o seu efeito no desempenho de painéis particulados de bagaço de cana de açúcar em exposição natural e em ensaio acelerado.

1 Introdução **179**

2 Materiais e Métodos **181**

2.1 Painéis particulados 181
2.2 Tratamentos lateral e superficial dos corpos de prova 181
2.2.1 Tratamento Lateral 181
2.2.2 Tratamento superficial 182
2.2.3 Crescimento de fungos em intemperismo natural 182
2.2.4 Ensaio acelerado para avaliação da colonização por fungos emboloradores (norma ASTMD 3273-12, 2012) 183
2.2.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) 184
2.2.6 Registro de imagens por scanner digital 184
2.2.7 Análise estatística da colonização por fungos 184
2.2.8 Avaliação das propriedades mecânicas 186

3 Resultados e discussão **186**

3.1 Crescimento de fungos em intemperismo natural 186
3.2 Crescimento de fungos em ensaio acelerado (ASTM D3273-12, 2012) 188
3.3 Análise estatística do crescimento de fungos 189

3.3.1 Comparação do crescimento por fungos emboloradores em exposição natural e ensaio acelerado (ASTMD 3273-12, 2012) 189
3.3.2 Analise longitudinal do crescimento de fungos emboloradores - em ensaio acelerado (ASTM D 3273-12, 2012) 194
3.4 Propriedades mecânicas 198
4 Conclusões 200
5 Agradecimentos 201
6 Referências 201

Capítulo 7. Perfil de densidade e espectroscopia por infravermelho aplicada na análise de durabilidade em painéis alternativos particulados de bagaço de cana-de-açúcar BCP e comerciais de madeira MDP.

1 Introdução 206
2 Materiais e Métodos 208
2.1 Composição química 208
2.2 Fabricação de painéis de partículas de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona 208
2.3 Painel de madeira comercial (MDP) 209
2.4 Tratamentos para as áreas superficial e lateral dos Corpos de Prova 209
2.5 Ensaios de durabilidade 209
2.5.1 Envelhecimento acelerado 209
2.5.2 Deterioração por fungos emboloradores 209
2.5.3 Intemperismo natural 210
2.5.4 Intemperismo artificial por UV 210
2.6 Confecção e acondicionamento dos corpos de prova 210
2.7 Perfil de densidade 210
2.8 Espectroscopia no Infravermelho próximo (NIR) 211
2.9 Analise estatística 212
3 Resultados e discussão 212
3.1 Composição química 212
3.2 Perfil de densidade 213
3.3 Análise dos ensaios de durabilidade em painéis particulados BCP e BDP por espectroscopia no infravermelho próximo(NIR) 220
4 Considerações finais 227
5 Referências 227

1 Introdução

Atualmente, a crescente preocupação mundial com a sustentabilidade e a utilização dos recursos naturais renováveis tem sido uma temática discutida pelos países desenvolvidos e em desenvolvimento. Tais recursos naturais representam uma fonte alternativa de grande potencial econômico, tornando-se vital para a sobrevivência das indústrias em um mercado globalizado e competitivo.

A disposição final dos resíduos sólidos gerados na agricultura e nas atividades de produção industrial apresenta problemas em países em desenvolvimento. Os resíduos agroindustriais gerados em maior quantidade são: bagaço de cana de açúcar, casca de arroz, fibra de coco e fibra de juta, dentre outros. (MADURWAR et al., 2013). A utilização desses resíduos para a produção de materiais renováveis na construção civil pode apresentar uma solução parcial de problemas ambientais e de sustentabilidade, assim como também para redução do alto custo de materiais para a construção.

Os inúmeros resíduos lignocelulósicos gerados pela agroindústria têm potencial para serem utilizados para a fabricação de novos materiais (painéis particulados), tais como, a casca de coco (BRITO et al., 2004; PASSOS, 2005), a casca de amendoim (PABLO; PEREZ; ELLA, 1975; CARASCHI; LEÃO; COIADO CHAMMA, 2009; GATANI, 2009) e o bagaço de cana de açúcar (WIDYORINI et al., 2005; CONTRERAS et al., 2006; BATTISTELLE et al., 2009; MENDES et al., 2012). O setor produtivo da agroindústria depende direta ou indiretamente do ambiente e de tecnologias para o seu desenvolvimento, mas também de pesquisas que busquem a aplicação e agreguem valor aos resíduos agroindustriais. Com isso, a agroindústria pode contribuir para a economia verde. Segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2011), a economia verde pode ser definida como sendo: "Uma economia que resulta em melhoria do bem-estar da humanidade e igualdade social, ao mesmo tempo em que reduz, significativamente, riscos ambientais e escassez ecológica".

A intensificação da demanda por materiais renováveis, onde o aumento da população e o padrão de consumo contribuem para o esgotamento dos recursos naturais do planeta, notadamente as florestas nativas, impute ao reflorestamento um papel crucial para a diminuição do desmatamento. No Brasil, as espécies *Pinus sp* e *Eucalyptus sp.*, são as mais utilizadas para esta finalidade (MANHÃES, 2008), e também as mais utilizadas na indústria de painéis de fibra e partículas.

No Brasil, as indústrias de painéis aglomerados e de fibras utilizam preferencialmente cavacos de madeira de reflorestamento provenientes de *Pinus sp* e de algumas espécies de *Eucaliptus sp,* (IWKIRI et al., 2004) o que determina, inclusive, uma melhor qualidade do produto, tendo em vista o melhor controle de homogeneidade da matéria-prima (CARASCHI; LEÃO; COIADO CHAMMA, 2009). No entanto, os materiais lignocelulósicos provenientes de resíduos agroindustriais vêm sendo uma nova alternativa econômica, social e ambiental para fabricação de painéis MDP e MDF no

Brasil. Além disso, o crescente aumento da produção agrícola brasileira torna os materiais lignocelulósicos provenientes de resíduos agroindustriais uma boa alternativa para fabricação de painéis particulados.

O setor sucroalcooleiro é uma importante e abundante fonte renovável de resíduos, que são utilizados em grande parte para produção de bioenergia do Brasil. Além do aproveitamento do caldo da cana-de-açúcar para a produção de etanol, o bagaço pode ser utilizado para cogeração de energia em processos de combustão e gaseificação. No entanto, o bagaço de cana-de-açúcar também pode ser reaproveitado para produção de materiais particulados.

Como aglomerantes das partículas nos painéis, os adesivos a base de UF apresentam como vantagens a grande disponibilidade, o baixo custo e a facilidade na aplicação. Podem ser aplicadas com auxilio de extensores (geralmente farinha de cereais), que conferem plasticidade à linha de cola, facilitando sua aplicação de forma homogênea. As desvantagens dos adesivos UF são: baixa resistência à umidade, e alta emissão de formol, ao longo da vida útil dos painéis embora já sejam produzidos adesivos de baixa emissão de formol e são muito usadas na produção de chapas aglomeradas de madeira (WIEDMAN, 2002).

Segundo (KANDACHAR, 2002; NICKEL; RIEDEL, 2003; NETRAVALI; CHABBA, 2003) o uso de polímeros naturais que são potencialmente biodegradáveis, é um parâmetro importante para a abertura de oportunidades no desenvolvimento de novos mercados de produtos com valor agregado. Neste enfoque, os painéis particulados produzidos com resíduos agroindustriais, e resinas biodegradáveis são considerados uma nova alternativa sustentável para o aproveitamento de suas propriedades intrínsecas, favorecendo sua capacidade de desempenho para satisfazer às necessidades do usuário final, como também agregação de valor e posicionamento no mercado.

Dentro deste contexto a avaliação da durabilidade de um novo material representa um papel importante para a busca da aceitação de novos materiais. Os métodos de envelhecimento para avaliar a durabilidade de painéis derivados de madeira incluem testes de longo prazo e de curto prazo. Testes de longo prazo (envelhecimento natural) são os ensaios de exposição ao ar livre, para avaliar a influência das intempéries (HAYASHI; MIYATAKE; HARADA, 2002). Os ensaios de intemperismo natural combinam os fatores sob condições naturais ao ar livre, que incluem a umidade, radiação solar , oscilação de temperatura diária , exposição a fungos, oxidação e poluição (RONGZHI, 2000). Como as respostas do envelhecimento natural são lentas, busca-se aplicar ensaios de envelhecimento acelerado (curto prazo) que simulem parcialmente os resultados de envelhecimento natural. Os ensaios de envelhecimento acelerado avaliam as mudanças nas propriedades físico mecânicas em curto tempo através da exposição a diferentes fatores de deterioração (JOHNSTON, 2003).

Diferentes autores têm avaliado o grau de colonização de fungos emboloradores e manchadores em diferentes tipos de madeira e painéis: Painéis tipo strand de bambu e resina fenólica tratados superficialmente (SUN et al., 2010); madeira de *Pinus sylvestris* e spruce (*Picea abies*) (BOK et al., 2013; PERNILLA JOHANSSON; JÖRAN JERMER, 2010); painéis multicamada de madeira cedar , tamarack , spruce e aspen (YANG; WANG; WAN, 2007); painéis (OSB) com resina polifenolica, plywood, e painéis (MDF) de média densidade de fibra (YANG, 2007). Os autores indicam que o crescimento de fungos é dependente da composição dos materiais, assim como a procentagem de umidade relativa do ambiente.

Materiais convencionais têm sido investigados para o estudo da sua susceptibilidade ao crescimento de fungos. Entre tanto há uma escassez de pesquisas publicadas e relacionadas com a afinidade de materiais alternativos para o crescimento de fungos. Além disso, existe a necessidade de estudar a adequação e viabilização do uso de materiais de construção verdes para aplicação em condições locais de alta umidade ou exposição directa da água (HOANG et al., 2010).

A fim de fornecer orientações sobre o comportamento dos painéis alternativos de bagaço de cana-de-açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona e seu uso em locais internos sensíveis à umidade, este estudo contribui com o estudo da durabilidade a partir dos mecanismos e agentes de degradação que podem interferir no seu desempenho.

1.1 Justificativa

Devido ao crescente consumo de painéis de madeira no Brasil e no mundo, e para atender esta demanda existe a necessidade de uma expansão das fábricas e em consequência, as florestas. O plantio de espécies de reflorestamento não tem acompanhado a necessidade do mercado consumidor (MENDES, 2010), o aumento do seu preço e a diminuição da oferta de madeiras nativas comerciais e de madeira de reflorestamento (CARASCHI; LEÃO; COIADO CHAMMA, 2009). Neste contexto a utilização de resíduos agroindustriais, como o bagaço de cana-de-açúcar e os polímeros naturais, para a produção de elementos construtivos, como compósitos poliméricos para a construção civil, se apresenta como uma oportunidade de agregar valor aos resíduos da indústria sucroalcooleira brasileira e introduzir no mercado da construção civil materiais sustentáveis. Em São Paulo encontra-se o 42,9% das usinas produtoras de açúcar e álcool, o maior parque de processamento de cana, de acordo com dados do cadastro do Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2013).

A produção de painéis alternativos, com aproveitamento de resíduos de diferentes origens pode contribuir para o atendimento da demanda de painéis e estimular a produção de novos materiais e de painéis para uso arquitetônico (CHAMMA; LEÃO; CARASCHI, 2009). Desta forma, produzir painéis com bagaço de cana-de-açúcar, com

a mesma qualidade dos painéis de madeira é uma alternativa que pode ajudar a atender o crescente mercado consumidor, tendo em conta a quantidade de bagaço de cana-de-açúcar gerado anualmente no país. No entanto, esses materiais deverão garantir um bom desempenho físico-mecânico e durabilidade, conforme os requisitos técnicos e as necessidades do usuário.

A resina poliuretana (PU) a base de mamona apresenta-se como um diferencial deste trabalho. Trata-se de uma tecnologia nacional, limpa, natural e renovável, adicionalmente, possui vantagens como alta resistência a ação de água e raios ultravioleta, possibilidade de manipulação em temperatura ambiente, possui cura a frio, alta resistência mecânica (JESUS, 2000; SILVA; SANTOS; LAHR, 2008), além de acarretar na redução do consumo de energia, devido a menores temperaturas durante a prensagem dos painéis (BERTOLINI et al., 2013). A resina poliuretana pode ser utilizada para substituir a resina à base de uréia-formaldeído, que é a mais utilizada atualmente para a fabricação de painéis particulados. Segundo Nascimento et al. (2013) a resina libera formaldeído durante a prensagem, e a exposição a esta substância pode provocar dificuldade respiratória, enfisema pulmonar e câncer nos pulmões, quando inalado em altas concentrações.

Logo, o presente trabalho justifica-se pela necessidade de realizar a avaliação da durabilidade de painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar com resina bicomponente poliuretana à base de óleo de mamona usada como adesivo e como revestimento superficial. Alem disso, propõe-se identificar os agentes e mecanismos de deterioração que podem diminuir o seu desempenho físico-mecânico, visando sua aplicação na construção civil.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Estudo da durabilidade e o desempenho físico e mecânico de painéis particulados não convencionais de bagaço de cana-de-açúcar e resina poliuretana bi-componente à base de óleo de mamona, para a sua utilização na construção civil.

1.2.2 Objetivos específicos

Estudar metodologias para avaliar a durabilidade e o desempenho físico e mecânico de painéis particulados não convencionais de bagaço de cana-de-açúcar e resina poliuretana bi-componentes à base de óleo de mamona, visando sua utilização em sistemas construtivos na construção civil.

- Estudar os métodos de ensaio vigentes de envelhecimento acelerado para avaliar desempenho físico-mecânico de painéis particulados, assim como identificar os agentes e mecanismos de degradação.
- Avaliar a viabilidade do revestimento superficial com resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona em painéis fabricados com partículas de bagaço de cana-de-açúcar.
- Identificar, por meio de ensaios de envelhecimento natural durante 3,6 e 12 meses, a influência dos fatores ambientais e biológicos no desempenho físico e mecânico e na durabilidade dos painéis alternativos de bagaço de cana-de-açúcar (BCP) e de painéis comerciais partículas de madeira (MDP);
- Identificar a suscetibilidade ao crescimento de fungos emboloradores em exposição natural e por meio de ensaio acelerado.
- Analisar o desempenho físico e mecânico dos painéis elaborados a partir de bagaço de cana de açúcar (BCP) e comparar com os painéis particulados comerciais MDP;
- Utilizar métodos de ensaio não destrutivos para a análise da durabilidade dos materiais, assim como modelos estatísticos inovadores na interpretação de resultados.

1.3 Eixos de pesquisa

O presente trabalho foi desenvolvido nos seguintes eixos de pesquisa.

A utilização de duas matérias-primas de origem natural e renovável de alta produção no país e com potencial de crescimento, como o bagaço de cana-de-açúcar e a resina poliuretana à base de óleo de mamona, a qual apresenta vantagens desde o ponto de vista de saúde e pegada ambiental.

A avaliação da durabilidade de um material não convencional abrangendo as diferentes metodologias e as técnicas de envelhecimento acelerado, natural, artificial e de biodeterioração por fungos emboloradores, a qual tem sido ainda pouco explorada para materiais alternativos.

Por fim, o uso de técnicas de análise de dados a partir de modelos estatísticos não convencionais aplicados aos resultados experimentais.

1.4 Estrutura do trabalho

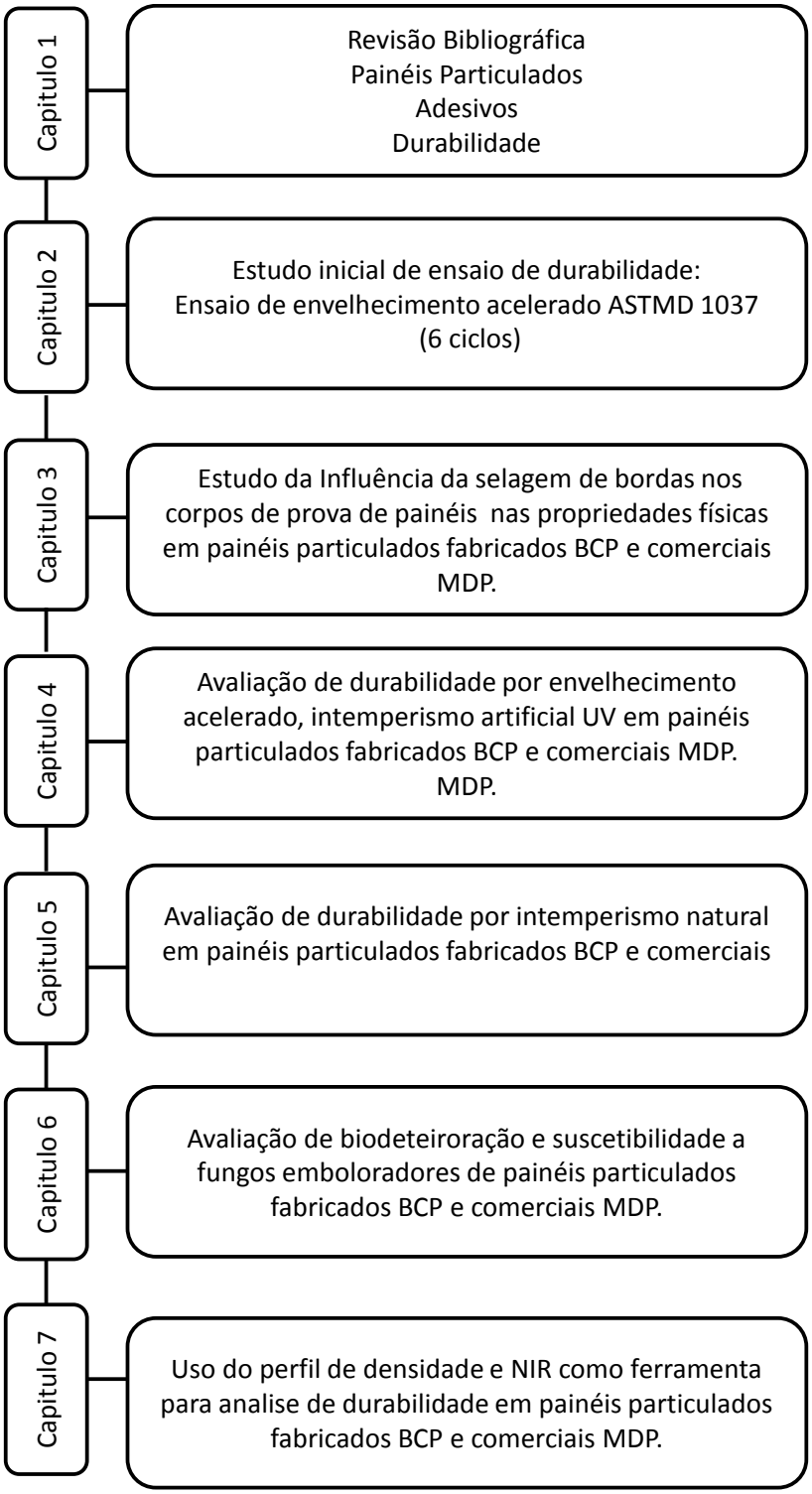
O presente trabalho está dividido em sete capítulos. O **Capítulo 1** foi destinado a Introdução e Justificativa do trabalho, discutindo e contextualizando a importância e o potencial uso de resíduos agroindustriais em materiais particulados. Além disso, a parte da Revisão de Literatura para introduzir conceitos e discussões a cerca do tema relativo à durabilidade e ao desempenho físico e mecânico de painéis particulados, O Capítulo abordou ainda, as metodologias utilizadas para avaliar a durabilidade e os conceitos relacionados aos agentes e mecanismos de deterioração que influenciam o desempenho dos materiais.

O **Capítulo 2** apresenta um estudo preliminar de durabilidade mediante ensaio de envelhecimento acelerado nos painéis de bagaço de cana-de-açúcar (BCP) para conhecer de forma inicial os mecanismos de degradação do material. O **Capítulo 3** contêm o estudo da influência da selagem de bordas na análise das propriedades físicas nos painéis particulados produzidos a partir de bagaço de cana-de-açúcar BCP, e também nos painéis comerciais MDP de madeira. Estes dois estudos serviram de base na tomada de decisão em relação ao tipo de ensaio de durabilidade a ser utilizado em ambos os materiais, BCP e MDP, e também na forma de acondicionamento dos corpos de prova.

O **Capítulo 4** apresenta os resultados obtidos na análise de durabilidade, mediante ensaios de envelhecimento acelerado e intemperismo artificial em ambos os materiais. O **Capítulo 5** abrange o estudo de durabilidade em ambos os materiais através do ensaio de envelhecimento natural durante um ano e são apresentados os resultados de caracterização físico–mecânica e microestrutural dos materiais antes e após a exposição ao intemperismo natural. O **Capítulo 6** apresenta o estudo de

biodeterioração dos painéis particulados a partir da análise do grau de colonização por fungos emboloradores. O **Capítulo 7** apresenta as técnicas de Densitometria de Raios X e Espectroscopia por Infravermelho (NIR) como ferramentas para avaliação do desempenho dos painéis particulados.

Figura 1. Estrutura do trabalho



Fonte: Própria autoria

Capitulo 1 – Revisão Bibliográfica

1 Painéis de partículas de madeira

A tecnologia de produção de painéis de partículas desenvolveu-se principalmente após a Segunda Guerra Mundial, em decorrência da escassez da matéria-prima e, também, por conta da redução das perdas ocorridas, tanto na indústria madeireira como na exploração florestal (MENDES et al., 2003). Os painéis de madeira surgiram com a necessidade de amenizar as variações dimensionais da madeira maciça, diminuir seu peso e custo, e manter as propriedades isolantes, térmicas e acústicas. Adicionalmente, suprem uma necessidade no uso da madeira serrada e ampliam a sua superfície útil, através da expansão de uma de suas dimensões (largura), para otimizar a sua aplicação (IPT, 2003).

Os painéis particulados são definidos como um produto fabricado a partir de materiais lignocelulósicos, principalmente na forma de partículas discretas, combinado com resina sintética ou outro aglomerante adequado e ligados em conjunto sob calor e pressão(IWAKIRI et al., 2004; HILLIG; HASELEIN; SANTINI, 2002). A principal diferença entre aglomerado e outros produtos reconstituídos de madeira, tais como: *waferboard*, *Oriented Strand Board (OSB)*, e os *Medium Density Fiber (MDF)* são os materiais ou partículas utilizados na sua produção (EPA, 2002).

O painel MDP é um produto derivado da madeira, que dentre as diversas tipologias de materiais existentes, é classificado como material composto ou compósito. O painel MDP é composto por matriz polimérica contendo adesivo sintético e a fase de reforço com partículas de madeira, as quais são combinadas com a aplicação de calor e pressão, se consolidando e dando origem ao painel. Pelo fato de ser feito à base de fibras vegetais, o painel MDP pode ser denominado também como compósito lignocelulósico (SILVA et al., 2013)

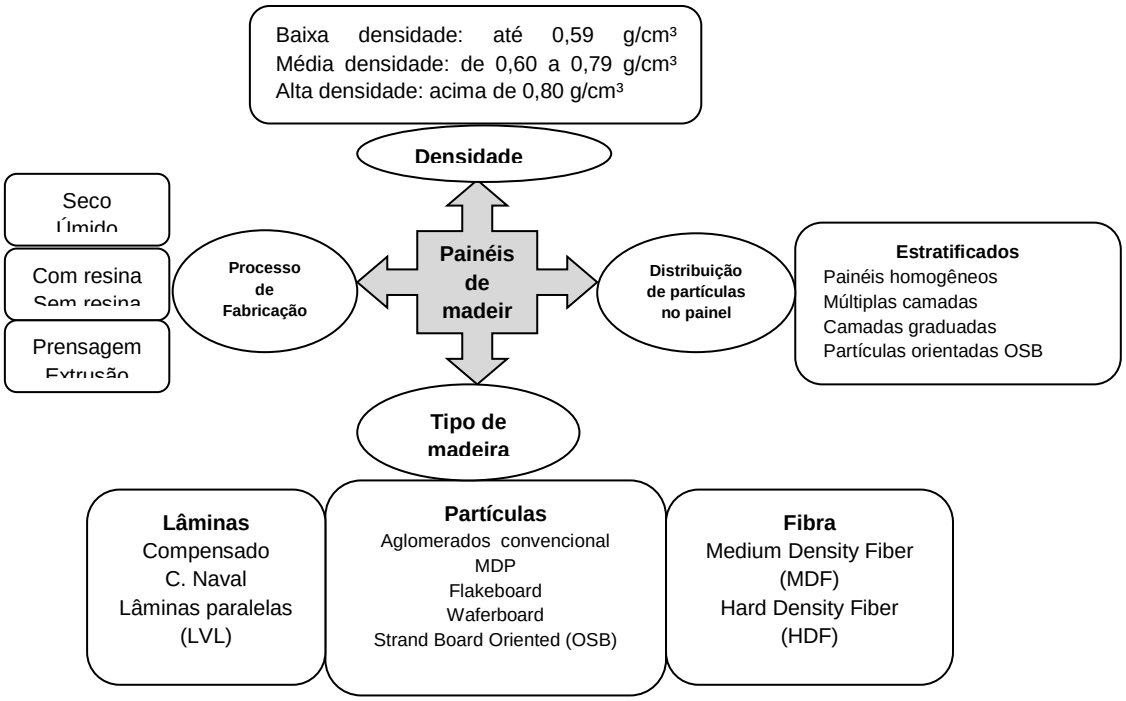
De acordo com a norma NBR 14810 (2002) painéis de partículas de madeira ou MDP (Medium Density Particleboard), ou PPMD (Painel de Partículas de Média Densidade) têm espessura entre 3 a 50 mm, e são constituídos por partículas de madeira aglomeradas, resinas naturais ou sintéticas e termofixas, cuja mistura é submetida a pressão e ao calor. Os tipos de matérias-primas podem ser os seguintes materiais: a) Material florestal proveniente de desbaste e poda; b) Resíduos industriais tais como costaneiras, sobras de destopo, miolos de toras laminadas; c) Resíduos industriais finos, tais como pó-de-serra e cavacos de plaina; d) Cavacos de madeira do beneficiamento de indústria de móveis e carpintaria e)Materiais lignocelulósicos como bagaço de cana, palha de arroz e outros resíduos agrícolas puros ou misturados com partículas de madeira. Os painéis MDP, de acordo com a norma ABNT 31:000.18 –2

(2013) Painéis de partículas de média densidade, são classificados pela aplicação e condição de uso.

- P2- Painéis para uso interno em condições secas;
- P3- Painéis não estruturais para uso em condições úmidas;
- P4-Panéis estruturais para uso em condições úmidas;
- P6-Painéis estruturais para uso em condições severas de carga em condições secas;
- P7- Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em condições úmidas.

O tipo, a razão de aspecto e o tamanho das partículas, assim como o grau de homogeneidade das partículas, os tipos de aglomerantes, a densidade aparente e tipo de processo de fabricação definem o tipo de painel de particulado. Muitos fatores são combinados de modo a influenciar as propriedades de um material compósito, em última análise, no entanto, as propriedades de um compósito são ditas propriedades intrínsecas dos constituintes. (FOWLER; HUGHES; ELIAS, 2006). Dentre eles pode-se destacar: o tipo de adesivo, a densidade do material lignocelulósico, densidade dos painéis, umidade das partículas, razão de compactação e ciclo de prensagem (KELLY, 1977; MALONEY, 1993). Segundo Xu et al. (2009) a densidade do painel e os níveis de teor de resina são importantes para controlar as propriedades de resistência dos painéis aglomerados. A Figura 2 mostra o esquema de classificação dos painéis baseando-se em algumas variáveis, conforme Iwaikiri et al. (2003).

Figura 2. Classificação dos painéis de madeira.



Fonte: adaptado de: IWAKIRI, S. Painéis de madeira: características tecnológicas e aplicações. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 68, ed. esp., 2003.

Os painéis de madeira são amplamente utilizados na indústria moveleira e marcenaria, na produção de produtos comerciais, tais como portas, laterais e fundos de armários e gavetas, divisórias, tampos, barra e cabeceira de cama, estrutura de mesa e prateleira, painel divisório, display, gôndola, artesanato em geral e revestimentos de parede. Na construção civil é utilizado para fabricação de pisos, rodapés, almofadas. Além dessas aplicações, os painéis de madeira são usados como revestimentos de paredes e divisórias, tanto em ambientes internos como externos, garantindo uma estética diferenciada ao local (ABIPA, 2013).

1.1 **Produção Global de Painéis Particulados**

O consumo de painéis de madeira reconstituída foi crescente em todo o mundo na última década. Em 2013 a produção mundial total alcançou 358 milhões m^3 com destaque para os painéis de partículas (aglomerados e OSB), compensados e MDF. Os cinco principais exportadores (China, Malásia, Alemanha, Canadá e Tailândia) exportaram 35 milhões de m^3 em 2013. As exportações da China aumentaram em um 75% durante o período de 2009 a 2012, porém em 2013 deteve o seu crescimento. Nas regiões de Ásia , Pacífico e America Latina e o Caribe a produção aumentou em 59% e 23% respectivamente durante o período de 2009 a 2013. Os quatro principais consumidores de painéis de madeira são também os quatro maiores produtores . O quinto maior consumidor é Brasil, cujo consumo aumentou de 7 milhões de m3 em 2009 a 10 milhões de m^3 em 2013. Estados Unidos foi o principal importador em 2013, seguido de Alemanha, Japão, China e Reino Unido. Juntos, esses cinco países importaram 26 milhões de m^3(35% de todas as importações mundiais) em 2013 (FAO 2013).

A China tem o maior mercado produtor e consumidor de produtos florestais e supera os países desenvolvidos em vários grupos de produtos (por exemplo, está na frente do Canadá na produção de madeira serrada e dos Estados Unidos-USA, no consumo de painéis e de produção de papel e cartão). No comércio internacional de produtos florestais a China é o país que mais importa madeira serrada, madeira em rolo e painéis de fibra, além de ser o maior exportador de painéis de madeira, embora os dados estatísticos sobre importação e exportação da China não sejam completos (FAO 2013).

1.2 Painéis Particulados no Brasil

No Brasil, a produção de painéis de madeira aglomerada teve inicio em 1966 (MENDES et al., 2003). Segundo a (ABIPA, 2013), a valorização dos painéis particulados nos últimos anos aumentou o crescimento das florestas plantadas no país, disponibilizando este material para múltiplos usos, onde a indústria moveleira é a grande consumidora de painéis de madeira industrializados.

Segundo a superintendente da Associação Brasileira de Indústria de Painéis (ABIPA) fazem parte da ABIPA sete indústrias de painéis – Berneck, Duratex, Eucatex. Fibraplac, Guararapes, Masisa e Sudati – que em 2010 tinham a capacidade nominal instalada de 9,1 milhões de metros cúbicos (ABIPA, 2013). O Brasil respondeu com 3,5% da produção mundial e, apesar deste pequeno percentual, o setor apresenta-se em constante crescimento. Na última década houve um incremento de produção de mais de 50%, passando de 6.603.986 m^3 em 2002 para 10.164.022 m^3 em 2012 (FAO, 2013).

A produção e o consumo interno de painéis particulados tiveram investimentos da ordem de US$ 1,2 bilhão, para o período de 2010/2014, e a capacidade instalada brasileira apresentou um salto de 9,1 milhões de m^3 em 2010, para 10,9 milhões de m^3, em 2014. A valorização dos painéis particulados aumentou o crescimento das florestas plantadas no país nos últimos anos, disponibilizando este material para múltiplos usos, onde a indústria moveleira é a grande consumidora de painéis de madeira industrializados, segundo a (ABIPA, 2013).

Segundo Mello, Azambuja e Silva (2013) a exploração florestal em todos os Estados que constituem a Amazônia Ocidental, em sua maior parte, é realizada em floresta nativa, sem aplicação de um plano de manejo, com baixa produtividade e com incipiente reposição florestal. Dos 28 milhões de metros cúbicos extraídos anualmente, cerca de 80% são ilegais e 50% atendem a pequenas serrarias que geralmente possuem equipamentos obsoletos gerando altíssimos percentuais de resíduos. A Amazônia brasileira ocupa um terço das florestas tropicais do mundo. As estimativas de estoque indicam um valor não inferior a 60 bilhões de metros cúbicos de madeira em tora com valor comercial, o que coloca a região como detentora da maior reserva de madeira tropical do mundo. Além de abundantes, os recursos florestais madeireiros existentes na região têm uma rica variedade de espécies, 3500 aproximadamente localizadas em área de terra firma e várzea. No entanto, somente 25 espécies são mais utilizadas nas indústrias de base da região, segundo a SUFRAMA (MELLO; AZAMBUJA; SILVA, 2013). A Tabela 1 lista as florestas plantadas em estados brasileiros para fabricação de painéis de madeira.

Tabela 1. Florestas plantadas para fabricação de painéis de madeira.

Estado	**Pinus**	**Eucaliptus**
	Em 1000 ha	
Minas Gerais	27,5	16,5
São Paulo	8,7	88,3
Paraná	96,0	2,6
Santa Catarina	2,3	330
Rio Grande do Sul	17,0	

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA (ABIPA). **Programa setorial da qualidade de painéis de partículas de madeira (MDP) e painéis de fibra de madeira (MDF)**: condições para o credenciamento de empresas. São Paulo, 2013.

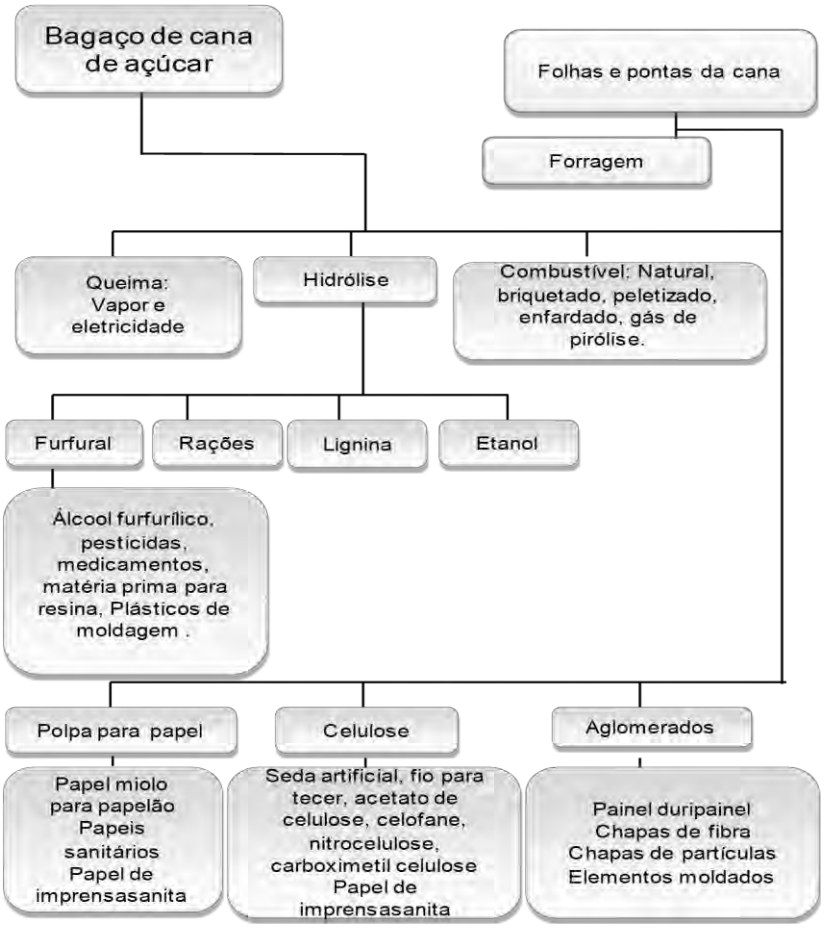
2 Bagaço de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é a principal cultura agrícola cultivada no Brasil seguida de soja e milho. A cana-de-açucar é nativa de clima temperado quente, comum em regiões tropicais como Brasil, Índia, África e Ásia-Pacífico. A cana-de-açúcar é composta por caule e palha. Do caule da cana-de-açúcar extrai-se, por moagem, o suco, que é utilizado para a produção de açúcar (sacarose) ou de álcool (etanol) (CANILHA et al., 2012).

O bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo de fibra celulósica originado a partir do processamento da cana-de-açúcar. Muitas vezes, é queimado para produzir energia para uso industrial (MENDES et al., 2009). O bagaço de cana, que é um conjunto de fibras emaranhadas de celulose, tem sido produzido cada vez em maior quantidade devido ao aumento da área plantada e da industrialização da cana-de-açúcar, decorrentes principalmente de investimentos públicos e privados na produção sucroalcooleira (MENDES et al., 2010).

Segundo dados do (CONAB, 2015), a safra de cana-de-açúcar no Brasil no ano de 2014/15 foi de aproximadamente 634,8 milhões de toneladas, o que representa para o país geração de cerca de 190 milhões de toneladas de bagaço de cana, pois, de acordo com Silva, Gomes e Alsina (2007), dessa produção de cana, o bagaço corresponde a 30% do total produzido de cana moída. Ainda segundo Silva, Gomes e Alsina (2007), o bagaço obtido é de aproximadamente 280 Kg/ton de cana moída. Desse montante 60% são queimados para fornecer calor em forma de cogeração de energia para operação das usinas e 40% são descartados, podendo apresentar usos alternativos, como, por exemplo, a confecção de painéis de partículas (RABELO; COSTA; ROSSELL, 2011). A Figura 3 mostra um esquema com as potencialidades do bagaço de cana-de-açúcar.

Figura 3. Usos potenciais dos subprodutos da indústria sucroalcooleira.



Fonte: RABELO, S. C.; COSTA, A. C.; ROSSELL, C. E. V. Aproveitamento de resíduos industriais. In: SANTOS, F. A. et al. (Orgs.). **Cana-de-açúcar**: bioenergia, açúcar e etanol - tecnologias e perspectivas. 2. ed. Viçosa: Folha da Mata, 2011. v. 1, p. 1-637.

A importância da cana-de-açúcar pode ser atribuída à sua múltipla utilização, no setor alimentício, na produção do etanol como combustível e a eletricidade a partir do seu bagaço. A cana-de-açúcar também é matéria-prima para outros produtos, como alimento animal, insumos para indústria química e farmacêutica, leveduras, polietileno, papéis, plástico biodegradável e painéis aglomerados destinados à indústria de móveis, dentre outros. Uma fração significativa desta biomassa vai para geração de eletricidade.

A liderança mundial brasileira na produção e no uso de combustíveis renováveis gera uma cadeia de comércio internacional, assegurando uma demanda crescente para o plantio de cana-de-açúcar no país. A produção de cana-de-açúcar é lucrativa na medida em que agrega valor a um tipo de resíduo gerado em grande quantidade (CARVALHO, 2012). Entretanto, existem requisitos fundamentais para estabelecer um processo sustentável a longo prazo para a produção de etanol de segunda geração a partir dos resíduos da cana-deaçúcar. (i) Utilização máxima do bagaço e cana- de-açúcar gerada no país (ii) Seleção dos melhores pré-tratamentos e processos de conversão (iii) Destilação barata, rápida e efetiva do etanol e máxima (iv) Subsídios e

incentivos governamentais aos investimento privados para promover a energia renovável (CANILHA et al., 2012).

O interesse em viabilizar painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar justifica-se porque o setor sucroalcooleiro gera anualmente grandes quantidades de resíduos de origem vegetal (bagaço e palha) (CARVALHO, 2012). De igual forma e segundo Mendes et al. (2010), na produção de painéis aglomerados, tal resíduo além de sofrer uma agregação de valor, poderá atender à crescente demanda da indústria de painéis de madeira, além de possibilitar sua expansão, diminuir a utilização de madeira e consequentemente a pressão sobre as florestas, e ainda reduzir os custos de produção dos painéis, tornando- os ainda mais competitivos no cenário econômico.

3 Painéis de Resíduos Lignocelulósicos

Em princípio, os painéis também podem ser fabricados a partir de qualquer outro material lignocelulósico que lhes confiram alta resistência mecânica e peso específico preestabelecido, já que a composição química dos materiais lignocelulósicos é semelhante a da madeira, mais precisamente às madeiras duras, que contêm menor teor de lignina e maior teor de hemiceluloses do tipo pentosanas (ROWELL et al., 2000). A agroindústria brasileira apresenta inúmeros resíduos lignocelulósicos com potencialidades de aproveitamento para fabricação de novos materiais (FIORELLI et al., 2013). Segundo Carashi et al. (2008), os materiais lignocelulósicos provenientes de subprodutos agroindustriais vêm sendo utilizados com sucesso na fabricação de painéis, sendo possível destacar a casca de arroz, folhas de bambu e também o bagaço de cana-de-açúcar. A Tabela 2 apresenta resultados de propriedades de painéis particulados de resíduos agroindustriais

Tabela 2. Propriedades físico mecânicas de painéis particulados à base de resíduos agroindustriais

Material usado	Espessura (mm)/No. De camadas	Densidade (g/cm^3)	Tipo de resina (%)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	AI (MPa)	IE—24 h (%)
Bagaço (Youngquist et al., 1997)	12–20/–	0.52–0.63	UF (8)	1400–2000	16.7–25.5	–	–
Bagaço - milho (Youngquist et al., 1997)	–	0.72	–	3800	16.3	–	–
Kenaf / madeira (Grigoriou et al., 2000a)	16/3	0.7	UF (8–12)	–	17.1–29.58	0.67–1.03	16–26
Kenaf núcleo e chips de fibras (Grigoriou et al., 2000b)	12/1	0.68–0.74	UF (8–12)	–	12.88–30.62	0.31–1.3	23–41
Ramos de palma (Tâmara- Date palm). (Nemli et al., 2001)	20/3	0.65	UF (7–11)	–	14.16–18.94	0.35–0.83	7–18
Poda de árvores / Madeira (Ntalos e Grigoriou, 2002)	16/1	0.64–0.74	UF (8)	1048–2833	8–19.1	0.65–1.13	17–25
Poda de árvores / Madeira (Ntalos e Grigoriou, 2002)	16/3	0.68	UF (8–12)	1518–2798	10.9–18.9	0.7–0.84	12–16
Chips de coco (Papadopoulos et al., 2002)	17.5/1	0.72–0.76	EMDI (2–8)	–	10.58–20.9	0.38–1.21	7.1–36.8
Palha de trigo (Mo et al., 2003)	6.5/1	0.7	MDI (4)	2281	18.1	0.64	27.3
Palha de trigo (Mo et al., 2003)	6.5/1	0.7	UF (8)	1805	6.36	0.11	63.9
Palha de trigo (Mo et al., 2003)	6.5/1	0.7	SPI (10)	1334	5.26	0.12	122.2
Palha de trigo (Mo et al., 2003)	6.5/1	0.7	SF (15)	1518	5.08	0.10	160.6
Cotton talos (Guler e Ozen, 2004)	20/3	0.4–0.7	UF (6–12)	–	3.31–17.95	0.11–0.59	18–35
Núcleo Kenaf (Xu et al., 2004)	12/1	0.15–0.3	None	300	1.1–1.85	0.15	–
Bambu / madeira (Papadopoulos et ai., 2004)	17.5/1	0.73–0.75	UF (10–14)	–	13.85–18.98	0.62–0.95	6.8–23.1
Talos de Girassol / madeira (Bektas et al., 2005)	20/3	0.7	UF (9–11)	1800–2963	15.65–25.3	0.46–0.69	17–25
Carpelo de algodão (Alma et al., 2005)	20/3	0.45–0.69	UF, MUF (9–11)	–	9.4–13.1	–	16–37
Farinha cascas de amendoim (Batalha et al., 2005)	–	0.69–1.04	PF	425–2600	1.7–14.06	–	2.7–5.27
Casca de avelã (Copur et al., 2007)	20/3	0.6–0.7	UF, MUF, PF (8–10)	–	7.7–12	0.33–0.5	16–29

MOE: Módulo de Elasticidade; MOR: Módulo de Ruptura; AI: Adesão Interna; IE: Inchamento em Espessura;MDI: Di-isocianato de difenilmetano ; UF: Ureia-formaldeído; SPI: Proteina de Soja Isolada; EMDI: Emulsão em água Di-isocianato de difenilmetano; SF: Farinha de Soja.

Fonte: Traduzida de KARAKUS, B.; GUNTEKIN, E. Feasibility of using eggplant (Solanum melongena) stalks in the production of experimental particleboard. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 27, p. 354-358, 2008.

Em relação à utilização de bagaço de cana-de-açúcar para fabricação de painéis de partículas, vários estudos foram desenvolvidos visando incorporar valor a esse resíduo. No Brasil, a viabilidade técnica de utilização do bagaço de cana para produção de painéis aglomerados vem sendo estudada (OKINO et al., 1997; TEIXEIRA; SANTANA; COSTA, 1997; BASTTINELLI; MARCILIO; LAHR, 2008; MENDES et al., 2009; MENDES et al., 2010; GARZON et al., 2012; MENDES et al., 2012; FREIRE et al., 2011; SARTORI et al., 2012; BELINI et al., 2014; SILVA; SANTOS; LAHR, 2008; FIORELLI et al., 2012; SARTORI et al., 2012; CASTRO Jr et al., 2014).

Com o objetivo de descrever o estado da arte referente a painéis de partículas à base de bagaço de cana (objeto desta pesquisa), são apresentadas informações de trabalhos desenvolvidos em nível nacional e internacional, indicando os resultados obtidos. A Tabela 3 sumariza as propriedades físico-mecânicos de painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 3. Propriedades físico –mecânicas de painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar

Autor	Tipo de resina (%)	Densidade aparente (g/cm^3)	MOR (MPa)	MOE (GPa)	AI (MPa)	IE (%) 2 h
Okino et al. (1997)	UF(12)	NC	13,1	2,2	4,7	28,9
Youngquist et al. (1999)	UF(8)	0,52-0,63	16,7-25,5	1,4-2	NC	NC
Contreras et al. (2006)	PF(13)	0,65	18	NC	0,35	14,43
Santos (2008)	UF	0,79	15,54	2,156	0,43	
Belini et al. (2011)	UF(14)	0,628	14,2	1,74	0,56	10,5
Tabarsa, Ashori e Gholamzadeh et al. (2011)	UF	0,7	16	2	0,3	18
Barros Filho (2011)	UF	0,7	4,6	0,765	0,2	15,59
Fiorelli et al. (2012)	OM (10/15)	0.89	24,41	2,432	1,29	19,6
Sartori et al. (2012)	OM (15)	0,94	22,6	2,8	1,18	20
Garzon et al. (2012)	OM (15)	0,8	21,9	2,77	1,18	21

OM:à base de Oleo de mamona bicomponente UF: Uréia Formaldeido PF: Fenol Formaldeído

* Partículas de Cana Brava NC: Nada consta, (MOE) Modulo de Elasticidade (MOR) Modulo de Ruptura, (AI) Adesão Interna, (IE) Inchamento em Espessura

Fonte: Própria autoria.

Mendes et al. (2010) avaliou o efeito da porcentagem de associação de bagaço de cana com a madeira de eucalipto em diferentes tipos e teores de adesivos na produção de painéis aglomerados. Os painéis foram produzidos com bagaço de cana em porcentagens de 25%, 50% e 75% complementados com a madeira de eucalipto e com adesivos a base de uréia-formaldeído (UF) e fenol-formaldeído (FF) a 6%, 9% e 12% (com base na massa seca das partículas). Os painéis produzidos com UF a 6% e 75% de bagaço de cana atenderam também a norma brasileira em todas as propriedades, com exceção do módulo de elasticidade, sendo a alternativa economicamente mais viável. A Tabela 4 sumariza as propriedades físico-mecânicos de painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar combinados com outros resíduos lignocelulósicos.

Tabela 4. Propriedades físico-mecânicas de painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar e outros resíduos lignocelulósicos

Autor	Densidade aparente (g/cm³)	Relação Bagaço/ outro material	Tipo de resina (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	IE (%) 2 h
Battistelle et al.(2009)	0,6	100/0 (FB)	UF(12)	9,82±0,394	1167,0±173,8	NC
	0,6	75/25(FB)	UF(12)	7,650±0,893	1009,0±204,4	NC
	0,6	50/50 (FB)	UF(12)	7,17±0,930	998,50±117,0	NC
	0,6	25/75(FB)	UF(12)	9,30±0,550	1028,0±189,4	NC
Castro Jr et al. (2013)	0,55	0/100(M)	OM(15)	5,2 ± 1,8	562,6 ±242,6	5,08±1,11
	0,56	20/80(M)	OM(15)	7,6 ± 2,1	797,3 ±272,0	7,83±0,63
	0,52	40/60(M)	OM(15)	12,0 ± 2,9	1207,0±344,8	8,22±1,15
	0,50	60/40(M)	OM(15)	10,1 ± 2,4	1065,0±223,5	9,22±1,25
	0,52	100/0(M)	OM(15)	18,5 ± 2,6	1702,0±206,2	6,43±1,06

FB: Fibra de Bambu; M: Madeira NC: Nada consta

Fonte: Própria autoria.

4 Resinas para fabricação de Painéis

A resina é usada na fabricação dos painéis para aglomerar as partículas de madeira que compõem o painel, conferindo-lhe forma, sustentação e resistência (ZENID, 2007). Atualmente 70% de todos os painéis fabricados no mundo levam algum tipo de resina (aglomerante), sendo que grande parte utiliza resinas sintéticas. Em relação às resinas para fabricação de painéis, a resina à base de formaldeído, em solução aquosa, é frequentemente utilizada pela indústria em razão do baixo custo. Segundo Melo (2009), 90% de todos os painéis aglomerados produzidos no mundo utilizam resinas de).

A resina à base de Uréia-formaldeído (UF) é o adesivo mais utilizado na produção de chapas aglomeradas que se destinam ao uso interno devido ao baixo custo, facilidade de manuseio, cura rápida e são incolores, não conferindo cor desfavorável à superfície do painel. Entretanto os adesivos a base de formaldeído emitem formol e em razão disso são classificados como de insalubridade máxima (CHIPANSKI, 2006; SILVA; LAHR, 2008, SILVA et al., 2012).

Salthammer et al. (2010) indicam que a liberação de formaldeído a partir de materiais à base de madeira foi significativamente reduzida no lado da produção nos últimos anos, as concentrações de ar no interior das casas pré-fabricadas não diminuíram na mesma proporção. Esse é o caso das casas pré-fabricadas que usam materiais de madeira a base de formaldeído.

Em junho de 2014 a União Europeia classificou o formaldeído como agente cancerígeno formaldeído 1B e mutagênico 2. A categoria 1B indica que o efeito

carcinogénico, e foi avaliada em ensaios realizados em animais e é provável para os seres humanos. (SALTHAMMER, 2015). A Tabela 5 apresenta as características das resinas empregadas na fabricação de painéis de partículas.

Tabela 5. Características das resinas empregadas na fabricação de painéis de partículas

Tipo de Resina	**Aplicações**
Fenol-formaldeído (resinas PF)	Fabricação de produtos que exigem algum grau de durabilidade para exposição exterior, por exemplo, OSB, de contraplacado de madeira macia e tapume. Exigem tempos de prensa mais longos e temperaturas mais altas do que as resinas de ureia-formaldeído. Os produtos que usam resinas PF (muitas vezes referidos como compostos fenólicos) podem apresentar estabilidade dimensional reduzida por causa de teores de umidade mais baixos nos produtos acabados. A cor escura inerente de resinas PF pode torná-las inadequadas para aplicações de produtos decorativos, tais como painéis e mobiliário.
Ureia-formaldeído (UF)	Fabricação de produtos onde a uniformidade dimensional da superfície são de interesse primário, por exemplo, aglomerado e MDF. As resinas são projetados para aplicações em interiores. Podem ser curadas em processos em temperatura ambiente até 150 °C. Às vezes a pressão e a temperatura podem ser moderadas em conformidade ao processo. Resinas de ureia-formaldeído são mais econômicas do que as resinas PF e são mais amplamente utilizadas para produtos compósitos de madeira.
Melamina-formaldeído (MF),	Laminados decorativos, revestimento de papel. São geralmente mais caras do que as resinas PF.
Di-isocianato de difenilmetano (MDI)	Normalmente utilizado na fabricação de produtos compósitos de madeira; é usada principalmente durante a fabricação de OSB. As instalações que usam esta resina devem tomar precaução especial com medidas de segurança do trabalho.

Fonte. Adaptado de: YOUNGQUIST, J. A. **Wood-bases composites and panel products forest products laboratory wood handbook:** wood as an engineering material. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service Forest Products Laboratory, 1999. 463 p. (Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113).

Entre os impactos ambientais mais relevantes na produção de painéis MDP com resina a base de ureia formaldeído, estão as emissões oriundas da produção e uso da resina ureia formaldeído, como o formaldeído livre emitido, e outras emissões provenientes do processo industrial, referentes principalmente às atividades de geração e secagem das partículas de madeira, transporte de cargas e geração de energia térmica (SILVA et al., 2013). Entretanto, existe a tendência mundial para o uso de produtos biodegradáveis, não poluentes e originados de insumos renováveis. A resina

poliuretana é de um polímero com características biodegradáveis, mostra grande versatilidade de aplicação em diferentes segmentos industriais, incluindo a confecção de painéis aglomerados que apresentam propriedades físico-mecânicas superiores aos produzidos com UF (SANTOS, 2008).

Os maiores produtores mundiais de mamona são a Índia, China e Moçambique. No Brasil estima estimada em 90 mil de hectares, de área plantada para a safra 2014/15 e 61,0 mil toneladas de produção (CONAB, 2015). O óleo extraído de suas sementes é matéria-prima para a fabricação de produtos diversos setores como na medicina,na indústria farmacêutica, de cosméticos, aeronáuticas, na produção de biodiesel, plásticos, fibras sintéticas, esmaltes, resinas e lubrificantes, próteses etc. (CANGEMI; SANTOS; CLARO NETO, 2010).

A partir do óleo de mamona, torna-se possível sintetizar polióis e pré-polímeros com diferentes características que, uma vez misturados, dão origem ao poliuretano. A resina a base de óleo de mamona foi desenvolvida pelo Grupo de Química Analítica de Polímeros (GQATP) do Instituto de Química de São Carlos IQSC – USP. O polímero de poliuretano, obtido do óleo de mamona, é usado como matriz para a produção de próteses para várias partes do corpo humano, produção de cimento ósseo e como matéria-prima para a fabricação de produtos elaborados como biodiesel, plásticos, fibras sintéticas, esmaltes, resinas e lubrificantes (CANGEMI; SANTOS; CLARO NETO, 2010). Devido a vasta gama de composições possíveis, as poliuretanas (PU) são utilizadas em diversas aplicações comerciais, tais como revestimentos, espumas, adesivos, selantes, couro sintético, membranas, elastômeros, bem como em muitas aplicações biomédicas.

A resina poliuretana (PU) a base de óleo de mamona apresenta-se como alternativa aos adesivos à base de formaldeído empregados na produção de painéis de madeira, prevenindo inconvenientes relacionados à origem não renovável e emissão de poluentes, além de acarretar na redução do consumo de energia, devido a menores temperaturas durante a prensagem dos painéis (BERTOLINI et al., 2013).

O revestimento superficial nos materiais tem como objetivo a proteção da entrada imediata de água, assim como da biodegradação superficial. Coutinho e Delpech (1999) buscaram determinar a eficiência da resina poliuretana a base de óleo de mamona como revestimento superficial dos materiais e sua viabilidade de uso para a construção civil. Segundo os pesquisadores, as poliuretanas na indústria de revestimentos têm sido utilizadas e apresentaram excelente desempenho para proteção de uma grande variedade de materiais como aço, concreto, plásticos, metais, papel, couro e madeira.

5 Durabilidade de painéis particulados

O desempenho de um produto é o resultado do equilíbrio dinâmico que se estabelece entre o material e o meio que o circula. Para utilizar qualquer produto na construção civil é importante considerar as variáveis que podem influenciar sua durabilidade e seu desempenho. A qualidade na ligação entre as partículas e os adesivos e portanto, o desempenho dos painéis particulados a base de madeira, são determinados por três parâmetros principais: a madeira (superfície e interface), o adesivo e as condições e parâmetros de processo (DUNKY, 2003). O tempo e a forma de exposição ao ambiente (incluindo fatores físicos, químicos e biológicos) causam transformações progressivas aos materiais de construção (AVRAMI; GUILLAUD; HARDY, 2008; MILLER et al., 2008).

O setor de madeira processada mecanicamente, que inclui produtos tais como, painéis, portas, molduras, pisos, entre outros, se prepara para cumprir as exigências da norma de Desempenho de Edificações Habitacionais (ABNT NBR – 15575:2013). Os fabricantes de portas de madeira, por exemplo, se organizaram por meio do Programa de Qualidade para Portas Internas de Madeira (PSQ-PIM), da Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (Abimci). A certificação exige testes e ensaios nas portas para avaliar o comportamento do produto sob a ação de água, calor, umidade, resistência ao fogo e isolamento sonoro (ABIPA, 2013). O Brasil (2011) elaborou as Diretrizes para Avaliação Técnica de Produtos Nº 005. Isso possibilita a aplicação desses painéis em estruturas, paredes (vedação vertical externa ou interna), pisos e coberturas que constituem os componentes estruturais na construção civil (Sistemas leves tipo "*Light Wood Framing*").

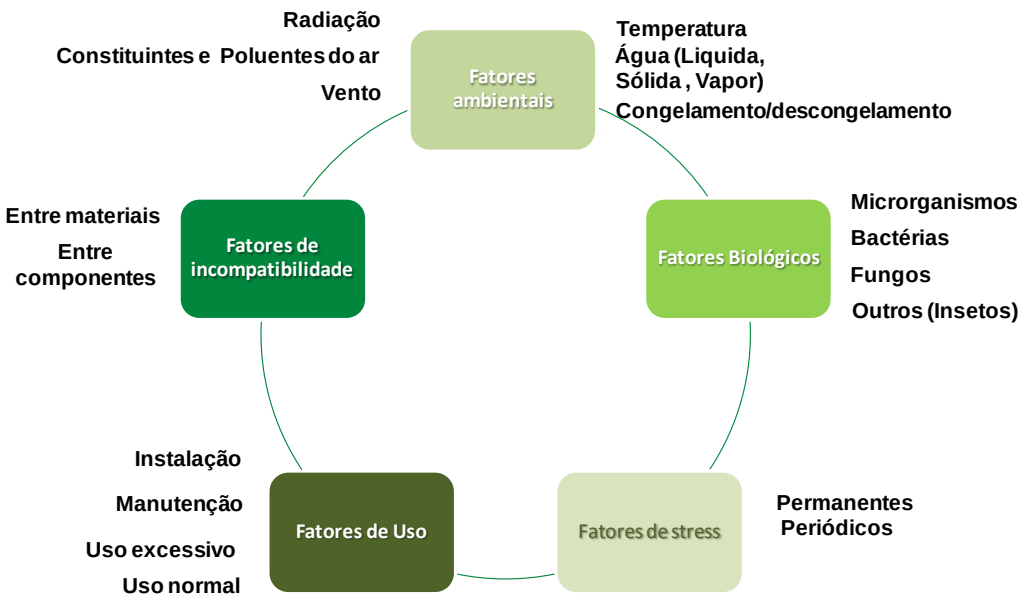
Desse modo, a avaliação da durabilidade e do desempenho de painéis não convencionais e neste caso de painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e resina poliuretana de óleo de mamona é necessária para garantir melhor aceitação e proposição de novos usos para esses materiais. Entretanto, painéis de bagaço de cana-de-açúcar com resina poliuretana a base de óleo de mamona, proposto neste trabalho, por representar uma nova tecnologia, não existe norma que defina uma metodologia de avaliação de durabilidade.

5.1 Agentes ou fatores de deterioração

Os agentes de degradação entendem-se como as ações físicas, químicas, ambientais ou biológicas, bem como seus mecanismos e os efeitos causados em um material ou componente. Vale ressaltar a ação conjunta entre os agentes como fator importante na previsão da degradação do material. Por exemplo, as ações físicas, tais como, impactos sobre os materiais, cargas permanentes e acidentais e fixação de objetos, podem causar deformação no material; agentes mecânicos, tais como, aplicação de tensão, podem gerar alterações na micro e macroestrutura do material. Dentre os vários agentes de degradação, a água é um dos mais importantes agentes (JOHN, 1997). Sua

ação nos diferentes estados: líquido, na forma de chuva, vapor na forma de umidade, sólido na forma de gelo podem contribuir para degradação de vários materiais aplicados na construção civil. Outros agentes de degradação importantes, tais como, temperatura e radiação solar (ultravioleta) podem ocasionar transformações físicas, químicas, micro e macroestruturais no material. A Figura 4 apresenta um esquema com os principais fatores que influenciam na durabilidade de um material ou elemento construtivo, de acordo com a norma ASTM E 632-82.

Figura 4. Fatores ou agentes de degradação que influenciam a durabilidade dos materiais.



Fonte. Baseado na norma: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E 632** - Developed accelerated test t aid prediction of the service life of building components and materials. Philadelphia, 1996. p. 102 - 107.

A descrição dos fatores ou agentes de degradação estão expostos a seguir:

- **Ambientais**: São fatores associados ao ambiente natural incluindo a radiação solar, temperatura, precipitação e a água em outras formas, como congelamento, degelo, umidade, componentes normais do ar, poluentes do ar e vento. Nos fatores ambientais a degradação fotoquímica pode ser designada pela palavra "weathering".
- **Stress**: Fatores que resultam da aplicação externa mantida ou periódica de uma carga.
- **Incompatibilidade:** São fatores que resultam da interação ente os componentes construtivos ou materiais e que geram um detrimento químico e físico.
- **Uso:** Resulta da instalação e procedimentos de manutenção, levados normalmente ao abuso.
- **Biológicos:** São fatores associados com organismos vivos entre eles fungos, bactérias e insetos.

5.2 Mecanismos de degradação

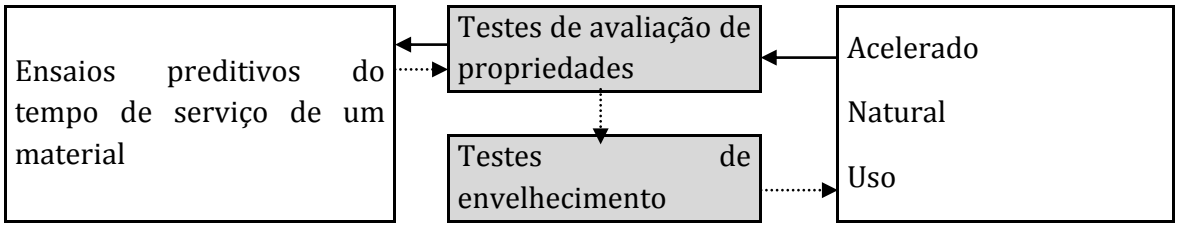
Os mecanismos de degradação são responsáveis pela ocorrência de mudanças nas propriedades físicas e mecânicas. Esses mecanismos podem ser definidos em vários níveis: os associados à degradação física do material, química e biológica. Sua identificação no material vai depender, em grande parte, do conhecimento inicial das características físicas, químicas e biológicas do material ou componente analisado.

5.3 Métodos de avaliação de durabilidade

A deterioração dos materiais é o resultado de diferentes efeitos físicos, químicos e biológicos. A deterioração depende do tipo de material e a influência nas condições específicas e de uso. A deterioração física é relacionada como atrito mecânico da superfície do material, fragilização, falhas de seus componentes pelo rompimento devido ao stress ou mudanças irreversíveis na forma. A presença de poluentes antropogênicos no ambiente podem acelerar essa deterioração. A interação entre os fatores físicos e químicos pode incrementar a degradação dos materiais (DROCHYTKA; PETRÁNEK, 2007).

Os ensaios de envelhecimento são aqueles nos quais os materiais ou componentes construtivos são submetidos ou expostos a fatores de degradação específicos que podem ocorrer no envelhecimento natural, expostos ao ar livre, como, por exemplo, a radiação ultravioleta, umidade, temperatura, com uma intensidade acima da expectativa de serviço. No envelhecimento acelerado o material é exposto a sequência de fatores de degradação em condições controladas até completar um ciclo. Os métodos de envelhecimento para avaliar a durabilidade de painéis derivados de madeira incluem testes de longo prazo e de curto prazo. A Figura 5 mostra o fluxograma dos ensaios de envelhecimento em função da aplicação do material.

Figura 5. Métodos de avaliação da durabilidade



Fonte: Própria autoria.

Testes de longo prazo: são os ensaios de exposição ao ar livre, para avaliar a influência das intempéries (HAYASHI; MIYATAKE; HARADA, 2002). Os ensaios de longo prazo correspondem aos ensaios de exposição ao ar livre em presença de fatores climáticos como: chuva, radiação solar, temperatura, etc.;no entanto, as respostas do envelhecimento natural são lentas. Desse modo, busca-se aplicar ensaios de envelhecimento acelerado que simulem, parcialmente, os de envelhecimento natural.

O uso dos ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório tem a vantagem de fornecer dados em curto prazo sobre a durabilidade, bem como os fatores de degradação. Normalmente, os ensaios de envelhecimento natural são aplicados em paralelo aos ensaios de envelhecimento acelerado, pois os dados obtidos em ambos os ensaios são complementares (KOJIMA; SHIMODA; SUZUKI, 2011).

Testes de curta duração: Permitem a avaliação das mudanças nas propriedades físico-mecânicas, em escala laboratorial, usando fatores de degradação controlados tais como: imersão, vapor, congelamento e umidade. Esses métodos de envelhecimento expõem o material a condições em que estes podem estar sujeitos durante sua vida útil, e definem as limitações da durabilidade e/ou do método empregado. Os ensaios de envelhecimento acelerado, em laboratório, usam câmaras ou equipamentos que fazem a simulação parcial, em condições controladas, tal como luz artificial, para gerar alguns fatores de degradação presentes nas condições reais de uso.

Segundo Crewdson (2009), o uso de algumas condições extremas nos ensaios de envelhecimento pode levar a conclusões erradas e em testes acelerados, pode ser potencialmente enganador. Ensaios de durabilidade ao ar livre, devem ser utilizados para avaliar a eficiência dos ensaios acelerados. Com um procedimento de teste de envelhecimento acelerado correto busca-se correlacionar os dados obtidos com aqueles obtidos do ensaio de envelhecimento ao ar livre. Desse modo, pode-se fazer um desenho experimental do ensaio acelerado que gere os dados próximos dos ensaios de envelhecimento natural, fazendo avaliações apropriadas, e utilizando materiais de controle e realizando uma análise estatística de confiança.

Segundo Credwson (2009) existem alguns aspectos que são de importante análise durante a avaliação da durabilidade de um material, são eles: (1) Os testes acelerados são 100% repetíveis: Os ensaios de envelhecimento acelerado mesmo sendo controlados podem produzir variabilidade nos resultados. Repetir os testes no mesmo dispositivo em laboratórios diferentes podem apresentar grandes diferenças nos resultados, sendo possível reduzir essa variabilidade definindo e aplicando operações padrões. (2) Qualquer degradação significa sucesso: Se a degradação obtida com o ensaio ao ar livre não é reproduzido pelo envelhecimento acelerado, então não se deve usar o teste acelerado. O envelhecimento acelerado deve gerar os mesmos fatores de degradação, e comparação ao envelhecimento ao ar livre. (3) O intemperismo exterior requer 5 anos para fornecer dados úteis. Embora possa ser necessário esperar 5 anos ou mais para identificar os efeitos específicos de degradação as informações obtidas nos 12 primeiros meses são de grande utilidade. (4) Os resultados dos ensaios de envelhecimento são absolutos: A avaliação de uma única propriedade em um único corpo-de-prova exposto pode levar a erros na aprovação ou desaprovação do material. (5) O uso de técnicas para análises de variáveis qualitativas como a classificação de dados “ranked-data” podem ser usados como uma ferramenta poderosa e estabelecer algumas hipóteses em relação ao teste.

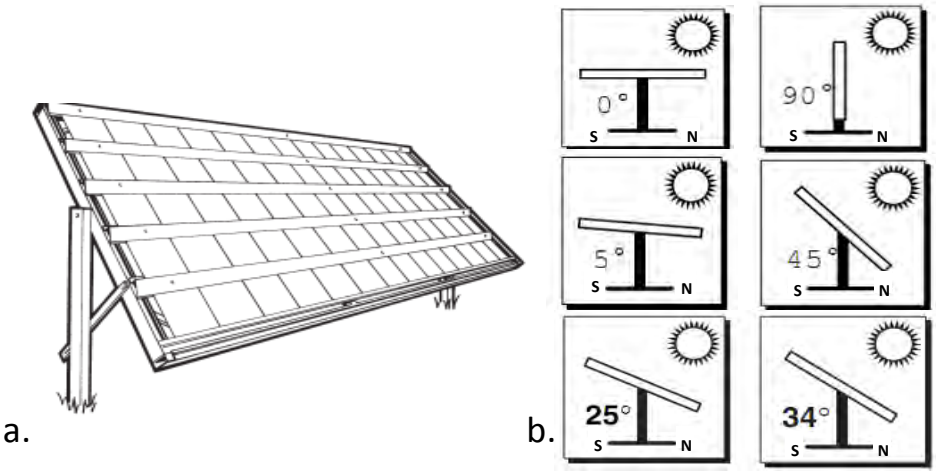
5.3.1 Envelhecimento Natural

A durabilidade de painéis a base de madeira ou de resíduos agroindustriais é um dos aspectos mais importantes para a sua aplicação na construção civil, ou seja, para determinar o uso correto do material, é necessário obter informação do desempenho ao longo prazo. No entanto, a durabilidade dos materiais expostos ao ar livre pode ser diferente dependendo do local, devido às diferenças nas condições climáticas, como por exemplo, radiação solar, umidade relativa, índice pluviométrico evento. Com isso, existem muitos problemas no uso de normas ou resultados de ensaios de envelhecimento ao ar livre obtidos em outros países, com condições climáticas tão diferentes do local no qual será utilizado o painel particulado (OKKONEN; RIVER, 1996).

Exposições do material em diferentes locais, assim como durante vários anos pode aumentar a confiabilidade dos resultados sobre a sua durabilidade do mesmo. Considerando-se a estrutura peculiar e os mecanismos de degradação dos painéis particulados, é necessário proceder a uma exposição ao ar livre e avaliar com mais precisão a durabilidade (SEKINO, 2003). A utilização de campos de exposição natural ou envelhecimento natural são especialmente úteis para identificar: (i) a perda de resistência mecânica e deterioração física do material; (ii) a variação dimensional do material causada pela temperatura e umidade; (iii) estudos de temperatura máxima de serviços; (iv) a mudança de cor, desbotamento e perda de brilho; (v) a presença de rachaduras, deformação e envelhecimento pelo calor; (vi) os mecanismos de biodegradação.

A bancada para expor os corpos-de-prova ao envelhecimento natural depende do ângulo de exposição relativo à horizontal, como mostra a Figura 6. Esse ângulo pode variar dependendo das condições de uso final do material. O ângulo de 0° (sem inclinação da mesa) não é comumente usado para painéis em estruturas planas, uma vez que não há o favorecimento para escoamento da água. O típico ângulo de inclinação da mesa de exposição usado em produtos para a indústria automobilística é de 5°. Ângulos de 25 ou 34° são usados para maximizar a incidência da radiação solar. O ângulo de 45° é usado em materiais que não tem uso final definido e o ângulo de 90° é usado para avaliar os materiais que serão submetidos à baixa temperatura, baixa radiação solar e umidade relativa.

Figura 6. Envelhecimento natural a) bancada b) ângulo de exposição de materiais ao ar livre.



Fonte: Adaptado de Q-Lab.Technical Bulletin. Outdoor Weathering: Basic Exposure Procedures. LL 9025, 2011.8 p.

5.3.1.1 **Mecanismos de degradação associados aos fatores ambientais.**

A madeira, como outras substâncias orgânicas, pode sofrer alterações no desempenho e durabilidade por ação de fatores ambientais associados à radiação solar, temperatura, precipitação e contato com a água em outras formas, como congelamento, degelo, umidade, componentes normais do ar, poluentes do ar e vento. Em particular, as diferentes condições de intemperismo, como temperatura, umidade e radiação UV afetam a vida de serviço de um produto. Os principais efeitos prejudiciais da exposição UV e das condições higrotérmicas são: a deterioração , descoloração e deformação do material (FARUK et al., 2012).

- **Mudança na cor e aparência:** Stark, Matuana e Clemons (2004) e Fabiyi et al. (2008) afirmam que fatores ambientais podem gerar mudanças na cor e aparência da madeira. Esta mudança é basicamente uma reação de superfície. A penetração da luz nas capas de madeira é inferior a 75 micrometros, quando se trata da luz UV e de 200 micrometros quando se trata de luz visível. Entretanto, a mudança de cor pode ser afetada mais profundamente pelas reações derivadas da fotoxidação, que resulta visivelmente em: a) Mudança na cor e perda de brilho; b) aumento da rugosidade; c) laminação, rachaduras e gretas; d) escamação-descamação; e e) amarelamento. A quantidade e o tipo de deterioração que um material pode apresentar dependem da susceptibilidade espectral, que é uma medida quantitativa dos danos causados pela energia da luz, que varia de acordo com os comprimentos de onda da luz (curta ou longa).

- **Degradação de lignina e hemicelulose:** Evans et al. (1996) indicou em análise química da madeira, a degradação da lignina e hemiceluloses e da polimerização da celulose pela exposição natural . Segundo o mesmo autor, a lignina é muito

sensível à luz, e as reações fotoquímicas na madeira são iniciadas pela absorção de luz UV-visível pela lignina, que conduz à formação de fragmentos de grupos α-carbonilos e bifenilos. Estes radicais livres podem causar a *degradação* da lignina e a *fotoxidação* da celulose e hemicelulose. Da mesma forma, a ocorrência de temperaturas elevadas pode levar a um aumento da taxa de degradação fotoiniciada.

- **Inchamento**: Segundo Stark, Matuana e Clemons (2006) a água atua também como um fator degradante. Segundo Stark, Matuana e Clemons (2006) a água acelera a reação de *oxidação* e causa o *inchamento* da fibra de madeira. A degradação dos componentes hidrofóbicos (tais como a lignina) na superfície do compósito conduz a um aumento das quantidades de celulose (componente hidrofílico) na superfície, o que faz com que os compósitos polímero-madeira sejam mais suscetíveis à absorção de umidade.

5.3.2 Envelhecimento Acelerado

Os ensaios de envelhecimento acelerado avaliam as mudanças nas propriedades físico-mecânicas através da exposição em curto prazo a diferentes fatores de deterioração (JOHNSTON, 2003) tais como imersão em água, ar quente e seco, secagem, vapor, congelamento, pressão em diferentes tempos, e considerando em ocasiões sua repetição por ciclos. Alguns dos métodos de envelhecimento acelerado incluem Japanese Industrial Standard Wet-bending B test - JIS-B (NORITA et al., 2008), ASTM 6-cycles -ASTM D1037 treatment (MCNATT; LINK, 1989; KAJITA; MUKUDAI; YANO, 1991; OKKONEN; RIVER, 1996; ZHANG et al., 2001; KARTAL et al., 2012; TOMAK et al., 2012), APA D-1- American Plywood Association treatment V313, VPSD Vacuum Pressure Soaking and Drying treatment (KARLSSON; MCNATT; VERRILL, 1996; KOJIMA YOICHI; SUZUKI SHIGEHIKO, 2010; KOYIMA; SHIMODA; SUZUKI, 2011), European Standard 321 treatment (NADIR AYRILMIS, 2005; SASSONI et al., 2015, BUTYLINA et al., 2012). A Tabela 6 lista as metodologias de envelhecimento acelerado usadas para avaliar a durabilidade de painéis particulados em laboratório.

Tabela 6. Metodologías de envelhecimento acelerado em laboratório

Método	Tipo de Exposição	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	Tempo (h)
Cycle JIS-B	Imersão em água	100	NC	2
	Imersão em água	20	NC	1
	Ar quente e seco	60	NC	21
Cyclic APA D-1	Imersão em água	66	NC	8
	Ar quente e seco	82	NC	14,5
	Acondicionamento	NC	NC	1,5
V313	Imersão em água	20	NC	72
	Congelamento	(-12)	NC	24
	Ar quente e seco	70	NC	72
	Acondicionamento	NC	NC	4
ASTM D 1037 (6 ciclos)	Imersão em água	49	NC	1
	Vapor	93	NC	3
	Congelamento	(-12)	NC	20
	Ar quente e seco	99	NC	3
	Vapor	93	NC	3
	Ar quente e seco	99	NC	18
VPSD	Vácuo	NC	NC	0,5
	Imersão com pressão	NC	290	1
	Ar quente e seco	60	NC	22
EN 321 (3 ciclos)	Imersão em água	20		72
	Congelamento	-20	NC	24
	Ar quente e seco			
	Acondiconamento	70		72
	(50%UR)	25		72

NC: Nada consta
ASTM American Society For Testing And Materials
APA Engineered Wood Association
V313 European Standard
JIS Japanese Industrial Standards
VPSD: Vacuum, Pressure, Soaking and Drying. Ensaio para Melamine Faced Chipboard (MFC)
European Committee for Standardization. European Standard. DINEN 321

Fonte: Própria autoria.

Normalmente, no envelhecimento acelerado o material é exposto à sequência de fatores de degradação em condições controladas de laboratório até completar um ciclo. No entanto, o número de ciclos do envelhecimento acelerado é diferente das condições reais de degradação do material (SEKINO, 2003).

O uso de um teste de envelhecimento acelerado com um método eficaz ajuda a estimar a durabilidade de um material ou componente por meio da comparação ao avaliar, por exemplo, as propriedades físico-mecânicas (KARLSSON; MCNATT; VERRILL, 1996). Em painéis de partículas a base de resíduos agroindustriais tem sido desenvolvido alguns trabalhos com: bagaço de cana-de-açúcar (GARZON et al., 2012); casca de amendoim e partículas de Itaúba (BARBIRATO et al., 2014); fibras de coco verde (FIORELLI et al., 2014); eucalipto (*Eucalyptus grandis*) com adição de casca de aveia (VARANDA, 2012). Nos trabalhos anteriormente mencionados foi relatada a redução das propriedades fisico-mecânicas dos materiais após os ensaios de envelhecimento. A Tabela 7 sumariza trabalhos realizados utilizando diferentes metodologias de envelhecimento em diferentes tipos de painéis.

Tabela 7. Metodologias de envelhecimento acelerado aplicadas em painéis

Pesquisador	Metodo de envelhecimento	Ciclos	Material ou Tipo de painel	Densidade (g/cm3)	Espessura (mm)
Tomak et al (2011)	ASTMD 1037	6	Bambu, madeira	NC	NA
Kojima e Susuki (2010)	JIS B, APA D1, V313, ASTMD 1037,VSPD	1,3,6	Paineis particulados (Madeira)	0.76 , 0.80	12.2, 12.1
			OSB	0.64 ,0.68	12.4 , 11.8
			MDF	0.76 , 0.72	12.2 , 9.1
			Plywood (laminado)	0.64 , 0.68	12.0 , 8.8
Norita et al (2008)	JIS A 5908 JIS B 5908	1	Paineis particulados (Madeira)	0.76 , 0.80	1.2 , 12.1
			OSB	0.64 ,0.68	12.4 , 11.8
			MDF	0.76 , 0.72	12.2 , 9.1
			Plywood (laminado)	0.64 , 0.68	12.0 , 8.8
Karlsson et al (1996)	ASTMD 1037	6	OSB	0.56	NC
	VSP/ S /OD (Imersao a presao de vacuo/vapor/ secagem)	4	Flake board	0.64	NC
	VSP/OD (Imersao a presao de vacuao, secagem)	4	Paineis particulados	0.70	NC
	HW/OD (Imersao em agua quente e secagem)	4	Hard board (A)	0.87	NC
	S/OD (Vapor e secagem)	1	Hard board (B)	0.87	NC
Kajita et al (1991)	ASTMD 1037	6	Paineis particulados	0.71, 0.80, 0.82, 0.77	15
	WCAMA	6			
	BC S669	3			
	APA D1	6			
	Ferver e secar	6			
McNatt e Link (1989)	ASTMD 1037 e suprimindo as etapas de a) congelamento, b) vapor c) congelamento e vapor d(ar seco	1,2,3,4 ,5,6,	Paineis particulados (Madeira) /hardboard	0.88	NC
			Paineis particulados	0.71	NC
			Flake board	0.68	NC
			wafer board	0.59	NC
			OSB	0.65	NC
NA> Aplica , NC Nao consta					

Fonte: Própria autoria.

5.3.3 Ensaios de durabilidade natural e biodeterioração por fungos

A madeira é composta por material orgânico que é mais propenso ao ataque e decomposição por insetos, fungos e bactérias em um processo denominado de biodeterioração. Esse processo causa alterações indesejáveis na estrutura anatômica e nas propriedades químico-físico-mecânicas (BRAZOLIN, 2009).

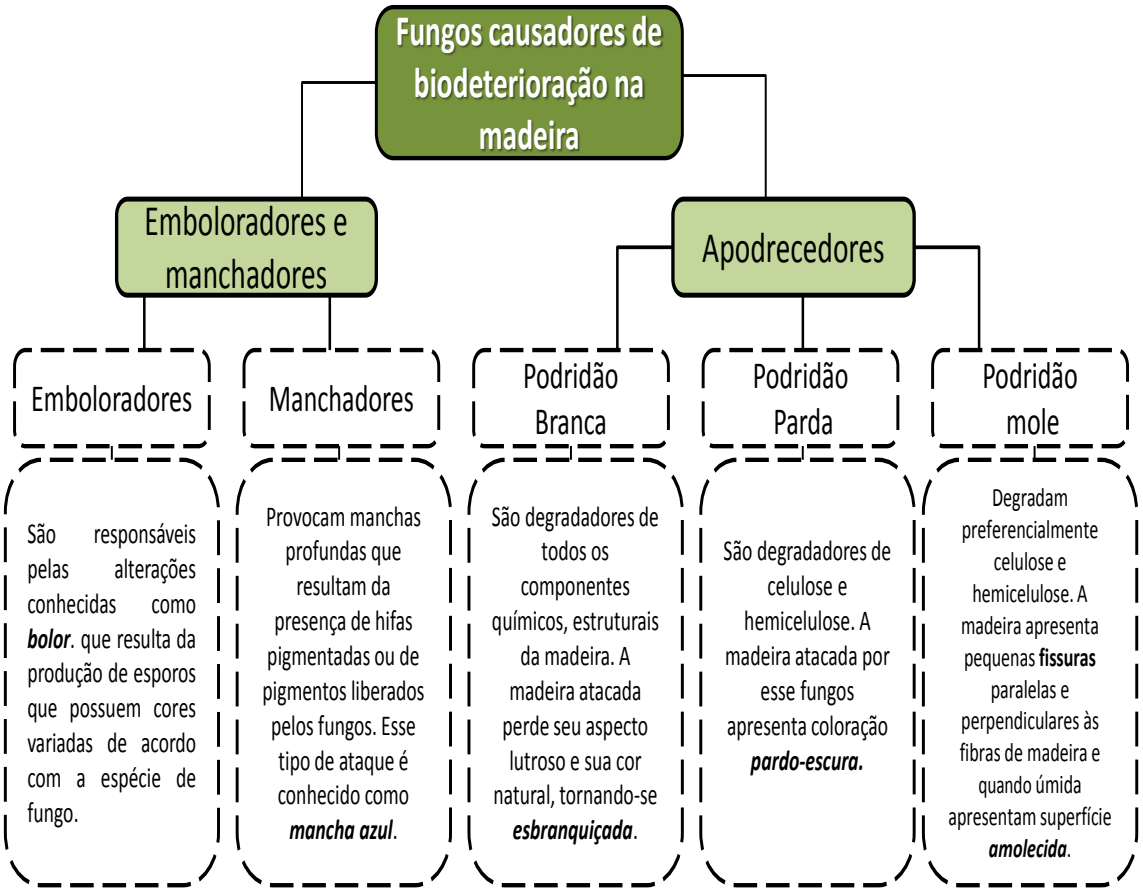
A quantificação da deterioração gerada pelos fatores biológicos é necessária para estimar as medidas de proteção e preservação dos materiais. Segundo Clausen e West (2005) são necessários métodos para avaliar o comportamento da madeira e de materiais compósitos em sistemas (framing), de modo que sejam resistentes ao crescimento de fungos, quando são acidentalmente expostos à chuva durante a produção e instalação do material.

A relação entre os materiais de construção, as estruturas e o clima é complexa, havendo, necessidade de determinar métodos mais precisos para avaliar o desempenho dos componentes construtivos. Por exemplo, em estruturas de madeira revestidas e expostas ao ar livre, o desempenho do material vai depender fortemente do impacto das condições climáticas locais, da qualidade do material e do sistema construtivo (LISO et al., 2006). Segundo Schefer (1971), a biodeterioração biológica gerada por fungos está relacionada diretamente com as condições de precipitação e com a temperatura. Em lugares com climas mais úmidos e quentes os materiais a base de madeira e derivados são mais suscetíveis ao crescimento e ataque de fungos em comparação aos locais com climas mais frescos e secos.

Dentre os vários grupos de organismos capazes de causar danos à madeira, os principais são os xilófagos, pelo fato de a madeira ser seu principal alimento. Os organismos xilófagos de maior importância econômica são os fungos, no grupo dos microrganismos e os cupins e as brocas de madeira, no grupo dos insetos. No caso de madeiras instaladas em ambiente marinho, existem os moluscos e crustáceos, agrupados sob a denominação de perfuradores marinhos (IPT, 2001).

Moreschi (1995) indica que os agentes físicos e químicos atuam com os biológicos na madeira, acelerando o processo de deterioração e conclui que os agentes biológicos são os de maior importância, sendo que os fungos são os responsáveis pela maior proporção de danos causados à madeira. A Figura 7 ilustra os tipos de fungos que utilizam a madeira como alimento (xilófagos) e os tipos de deterioração causada por eles.

Figura 7. Fungos deterioradores da madeira.



Fonte. Adaptado de: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS IPT. **Manual**: biodeterioração de madeiras em edifícios. São Paulo: IPT, 2001. 54 p.

Os fungos que causam descoloração na madeira armazenada e em serviço são geralmente definidos como **fungos manchadores**, e os fungos **emboloradores** que crescem na superficie da madeira as hifas podem penetrar profundamente no alburno sem afetar a coloração da madeira, (OLIVEIRA et al., 1986). Ambos, os emboloradores e os manchadores conferem prejuízo a qualidade estética dos produtos à base de madeira, devido à descoloração. Existem várias metodologias que são amplamente usadas para determinar a resistência natural ao apodrecimento e colonização de fungos da madeira.

O desenvolvimento de microorganismos formando colônias, pode abranger partes significativas dos materiais e estruturas, ocasionando mudanças estéticas e estruturais. Guillite (1995) definiu o conceito de 'bioreceptividade' como sendo a capacidade de um material de ser colonizado por organismos vivos. Embora a colonização natural por agentes biológicos nos painéis possa ser progressiva, heterogênea e lenta, em um laboratório, a avaliação desse fenômeno requer um procedimento delicado que pode ser feito dentro de um período razoável de tempo.

Os métodos acelerados de biodeterioração permitem obter resultados e orientar na escolha do uso final do produto em um tempo relativamente curto, comparado com o tempo que levaria para avaliação em um processo de biodeterioração natural de um material orgânico em condições reais de uso. Algumas normas são citadas na Tabela 8.

Tabela 8. Normas de avaliação a biodeterioração biológica

Fungo avaliado	Norma	Descrição	Tempo de ensaio
Fungos Apodrecedores	**ASTM D 2017/05** Método Acelerado de Laboratório resistência natural de madeiras	Chamado "SOIL BLOCK" por usar como meio de cultura o solo. Avalia a resistência à deterioração natural da madeira ou resistência de materiais orgânicos à fungos apodrecedores. Os fungos especificados pela norma são: Gloeophyllum trabeum, Postia Placenta e Tramestes Versicolor. A resistência do material é avaliada por meio da porcentagem da perda de massa.	16 semanas
	EN 113/ 1996 Comite Europeen de Normalization /CEN Método de ensaio para determinar a eficácia protetora contra destruidores da madeira.	Neste ensaio os corpos-de-prova são tratados com conservante e, em seguida, são expostos ao ataque de fungos sobre um meio "AGAR BLOCK". Dependendo da eficácia do conservante, os fungos de teste atacam as amostras para uma maior ou menor extensão e decompõe a madeira. Após um período de exposição, são calculadas as perdas de massa das amostras. Esta perda de massa é a medida de eficácia. Quanto menor for a perda de massa, mais eficaz é o conservante. Alguns dos fungos usados neste ensaio são: Oligoporus placentus, Coriolus versicolor, Podridão branca**,** Serpula lacrymans, Gloeophyllum abietinum, Gloeophyllum sepiarium e Gloeophyllum trabeum.	16 de semanas
Fungos emboloradores	**ASTM D 3273** Método para a resistência ao crescimento de fungos emboladores sobre a superfície dos revestimentos interiores de uma câmara ambiental.	È um método utilizado para simular um ambiente severo de exposição, principalmente a alta umidade e temperatura. Esse método determina a resistência do material e permite a avaliação se o(s) produto(s) usados como proteção são ou não apropriados e formulados para altas umidades e temperaturas, ao crescimento de fungos emboloradores. Os fungos especificados pela norma são: Aureobasidium pullulans, Aspergillus Níger, Penicillium Citrinum. Após a conclusão do teste, a amostra é classificada de 0 a 10, onde, 0 equivale a ausência de crescimento, e 10 ao crescimento intenso de fungos	28 dias

Fungo avaliado	Norma	Descrição	Tempo de ensaio
Fungos emboloradores	**ASTM D-5590** Resistência dos filmes de tintas e revestimentos relacionados com a desfiguração fúngica em quatro semanas.	Neste método a amostra de teste é colocada em uma placa de Petri contendo um agar nutritivo (batata dextrose ou ágar de malte), para favorecer o crescimento de fungos durante a duração do teste. A amostra é diretamente inoculada em sua superfície horizontal com esporos viáveis. O prato é então colocado em um ambiente com temperatura e umidade controladas até a condição ótima para o crescimento de fungos (temperatura de 28 º C e umidade relativa de 85% a 90%) por um período de 28 dias. Após a conclusão do teste, a amostra é classificada de 0 a 4, onde 0 equivale a ausência de crescimento, e 4 ao crescimento intenso. Alguns dos fungos especificados pela norma são: Aspergillus Níger e Penicillium Citrinum.	16 días
	ASTM G21 – 15 Resistência dos materiais sintéticos poliméricos ao ataque de fungos	Neste metodo é realizada a inoculação das amostras com fungos emboloradores. As amostras são expostas a condições favoráveis ao crescimento dos fungos (Temperatura de 28°C a 30°C e umidade relativa R superior a 85%). Finalmente é realizado um exame e classificação da amostra para o crescimento visual. A classificação varia de 0 a 4, onde 0 equivale a ausência de crescimento, e 4 ao crescimento intenso. Alguns dos fungos especificados pela norma são: Aspergillus brasiliensis, Penicillium funiculosum, Chaetomium globosum Trichoderma virens, Aureobasidium pullulans.	28 dias
	ASTM1413 – 08 Resistência de prevervativos de madeira ao ataque de fungos	Este método de ensaio abrange a determinação da quantidade mínima de preservativos de modo a evitar a deterioração das espécies selecionadas de madeira por fungos selecionados em condições laboratoriais ideais. Alguns dos fungos especificados pela norma são: Neolentinus lepideus, Gloeophyllum trabeum ,Postia placenta, Trametes versicolor.	12 semanas
	ABNT NBR 14941:2011 Resistência de películas não lixiviadas, ao crescimento do fungo Aspegillus niger.	Método para avaliação do desempenho de tintas para edificações não industriais – Determinação da resistência de tintas, vernizes e complementos ao crescimento de fungos em placas de Petri sem lixiviação. Método para determinação da resistência de películas não lixiviadas, de produtos classificados conforme ABNT NBR 11702, ao crescimento do fungo Aspegillus niger, em placa de Petri.	14 dias

Fonte: Própria autoria.

5.3.3.1 Problemas de saúde associados ao crescimento de fungos emboloradores em habitações

Os fungos podem colonizar qualquer substrato (material) que provê quantidade suficiente de nutrientes e água (TANAKA et al., 2010). O fungos geradores de mofo são membros da Ascomycetes e Deuteromycetes (Fungi Imperfecti), embora algumas das bolores são Zygomycetes e são classificados no grupo dos Mucorales (ASTM G21 – 15). Os fungos emboloradores crescem em ambientes de alta umidade e são encontrados em tetos, vigas, paredes e em outras superfícies que são consideradas um dos maiores problemas para proprietários de casas devido aos problemas estéticos e de saúde que podem causar (JAAKKOLA et al., 2002; VOJDANI et al., 2003; YANG; WANG; WAN, 2007; NORBÄCK et al., 2011).

Estudos realizados por Hernberg et al. (2014) associam a presença de mofo com a ocorrência de asma em adultos. Os autores encontraram como indicador de exposição mais comum a umidade em casa, no local de trabalho e exposição a mofo em casa. Jaakkola et al. (2013b) indica evidências de que a presença de umidade e de bolores em casa são determinantes no diagnóstico de doenças, tais como,rinite alérgica e rinoconjuntivite. A exposição à umidade foi relacionada com o aumento do risco de todos os tipos de rinite.

Nielsen (2002) indica que o crescimento de bolor ocorre em prédios ou construções danificadas pela água e umidade, o que está relacionado, em algumas circunstâncias, pela inadequada construção e manutenção dos materiais e sistemas construtivos. Os problemas de saúde observados em edifícios mofados ou úmidos podem ser agrupados em três grandes categorias como visto na Tabela 9.

Tabela 9. Problemas de saúde associados com o bolor e umidade em habitações

Sintomas Gerais	Mucosas	Pulmão
Fadiga Extrema; Falta de concentração e memória; Em casos extremos, como disfunção cognitiva; Náusea; Redução da função imune.	Nariz entupido; Coceira nos olhos; Sensação de queimação da pele; Rouquidão; Infecções das vias aéreas recorrentes, especialmente sinusites.	Tosse; Bronquite; Asma; Hemossiderose pulmonar em crianças.

Fonte: NIELSEN, K. F. **Mould growth on building materials**: secondary metabolites, mycotoxins and biomarkers. 2002. 120 f. Ph.D. Thesis – Technical University of Denmark, Lyngby, 2002.

Tais aspectos se justificam a prevenção e remediação dos problemas de umidade e mofo no interior das habitações, de forma a buscar alternativas para a proteção e procedimentos para o uso adequado dos materiais. Considerando o exposto, o uso de materiais de madeira e de seus derivados, neste caso painéis particulados a base de

resíduos agroindustriais, faz necessário a avaliação da sua suscetibilidade aos fatores biológicos (fungos) e o estudo da sua durabilidade natural.

5.3.3.2 **Mecanismos de degradação associados aos fatores biológicos**

A degradação biológica de resíduos orgânicos pode ser entendida como a ação de microrganismos que utilizam esse material como substrato para o seu crescimento e desenvolvimento. Um dos aspectos determinantes na utilização do substrato como fonte de energia e nutrientes está relacionado com a composição química do material. A decomposição do resíduo é favorecida pela maior ou menor concentração dos componentes químicos. Os resíduos ricos em açúcares, proteínas, amidos e celulose são decompostos de forma mais rápida que aqueles ricos em outras frações, como a lignina. A lignina em materiais lignocelulósicos protege a celulose e a hemicelulose das enzimas que digerem esses polissacarídeos; por isso o teor desse componente relaciona-se inversamente com a taxa de decomposição dos materiais vegetais (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Os materiais que são armazenados ou usados em climas úmidos podem ser alvo de crescimento de bolor ou mofo. No entanto, todos os materiais não são igualmente suscetíveis ao crescimento de fungos, ou seja, para cada material há um nível de umidade crítico. Se esse número for excedido, há um risco de que os fungos emboloradores se desenvolvam no material. Em um edifício, as diferentes estruturas estão expostas a diferentes condições climáticas. Para minimizar o risco de crescimento microbiano, os materiais de construção devem ser escolhidos que são tolerantes às condições climáticas esperados (JOHANSSON, 2012). A avaliação dos fatores que influenciam a bioreceptividadede fungos nos materiais é essencial para garantir a manutenção de suas propriedades físicas, mecânicas, características químicas, estéticas que determinam sua qualidade.

As diferentes espécies de madeira têm diferentes graus de resistência ao ataque biológico , o qual pode ser realizado por diferentes organismos que requerem algumas condições apropriadas para promover seu crescimento (DROCHYTKA; PETRÁNEK, 2007). Segundo Monteiro e Freitas (1997), dois materiais podem apresentar propriedades mecânicas semelhantes, porém apresentar resistência natural ao ataque de biológico diferentes. Segundo Moreschi (1995) existem alguns requerimentos para que os fungos, uma vez instalados, possam se desenvolver celulose, hemicelulose e lignina, e extrativos da madeira que são responsáveis pela sua “resistência natural”, o teor de oxigênio, temperatura, teor de umidade da madeira e seu pH.

Alguns estudos têm focado na análise e no conhecimento dos efeitos das condições de temperatura e umidade, bem como das taxas de crescimento, as quais os fungos emboloradores crescem num ambiente particular (YANG, 2008). Yan D et al (2007) encontraram um grau de colonização de fungos de <5% e 25-50% ao avaliar o crescimento de fungos em painéis de três camadas de madeira de espécies

consideradas duráveis (cedro branco) e não duráveis (aspen) sem revestimento superficial, colocados numa câmara climática a 100% de Umidade relativa e 25°C de temperatura durante 4 semanas.Yang (2010) avaliou amostras de painéis OSB e MDF expostas a 100% de umidade relativa foram encontradas em todas as amostras crescimento de bolor e nenhum crescimento de bolor foi encontrado em amostras expostas a 51% e 84% de umidade relativa. Os painéis de MDF e OSB apresentaram crescimento de bolor aos 4 e 6 dias de exposição respectivamente.

Teor de Umidade na madeira e umidade relativa do ar: Madeira com teor de umidade abaixo de 25% não são degradadas pelos fungos. Entretanto, altos teores de umidade na madeira podem influenciar as condições de aeração do substrato, limitando o crescimento dos fungos, que por serem organismos aeróbios, necessitam de oxigênio para sua sobrevivência (ITP, 2001). Os fungos emboloradores e manchadores podem se desenvolver em umidade entre 20-30% e com umidade relativa do ar de 90% ou superior (SCHEFER, 1979). Assim mesmo, fatores climáticos como o regime térmico e pluviométrico influenciam na velocidade de decomposição (SCHEFFER, 1971).

Um valor crítico de umidade considerado acima do qual existe um risco de que haverá degradação do material a partir da contaminação microbiológica. A mudança pode ser gradual ou súbita. O crescimento do mofo ocorre gradualmente, dependendo do tipo de mofo, umidade relativa, a temperatura, e o tipo de superfície, a estrutura de superfície e tempo. Por isso, a atribuição de um valor fixo crítico de umidade é imprecisa (JOHANSSON, 2005).

Johansson et al. (2012) indicam que a suscetibilidade de materiais de construção para o crescimento de bolor varia. Alguns materiais são tolerantes a alta umidade relativa do ar, sem apresentar crescimento de fungos. Enquanto outros materiais são menos tolerantes, onde o bolor pode crescer em umidade relativa do ar tão baixa quanto 75%. Assim, dentro de um edifício as estruturas são expostas a diferentes temperaturas e umidades relativas. Para minimizar o risco de crescimento microbiano, os materiais de construção devem ser escolhidos para que sejam tolerantes às condições esperadas.

Temperatura: A mínima temperatura para o crescimento de fungos varia de tipo a tipo. Alguns fungos se desenvolvem em temperaturas abaixo do ponto de congelamento, outros a mais de 60°C. Todos os tipos de fungos que geram degradação na madeira são sensíveis e morrem a altas temperaturas. Normalmente os fungosresistem a baixas temperaturas (LISØ, 2006).

Em diferentes partes de uma construção, existe uma variação de umidade relativa e temperatura, devido a mudanças pelas estações do ano e variações de curto tempo (oscilação diária de temperatura). Isto pode causar estresse no crescimento dos fungos nos materiais, o que afeta não só a taxa de crescimento, mas também o tempo de sobrevivência do fungo. A tolerância para períodos extremos varia de espécie para

espécie e, provavelmente, relacionada com o seu crescimento em ambiente natural (JOHANSSON, 2012).

De igual forma cada um dos componentes químicos do material orgânico varia em função da sua assimilação pelos microrganismos e sua persistência no solo. Assimilação ocorre em função das peculiaridades relacionadas a estruturas químicas das moléculas dos componentes químicos do material orgânico, da bioquímica (enzimas e rotas degradativas) e da capacidade degradadora da microbiota. Microbiota é o conjunto de microorganismos que habitam num ecossistema(MOREIRA E SIQUEIRA 2006),. A classificação do grau de assimilação, como prontamente, moderadamente e lentamente assimiláveis, foi listada na Tabela 10.

Tabela 10. Classificação dos substratos naturais quanto à degradabilidade microbiana e persistência no solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Grau de assimilação	**Grau de persistência**	**Exemplos de substratos**
Prontamente assimiláveis	Não persistente	Glicose, frutose, manose e outras hexoses, xilanose e outras pentoses, sacarose, maltose celulose e outros dissacarídeos, ácidos orgânicos e ácidos graxos.
Pronta a moderadamente assimiláveis	Não persistente a moderadamente persistente	Amido e polímeros vegetais de glicose e frutose, glicogênio, hemicelulose, ácidos urônicos, pectinas, lipídeos, complexos de glicerol e ácidos graxos, peptídeos e proteínas.
Assimilação lenta a muito lenta (difícil decomposição)	Persistente a muito persistente	Celulose microfibrilar, agregados de polímeros de glicose, componentes da parede celular vegetal, cutina, lignina, suberina, quitina, queratina, ceras e hidrocarbonetos oleosos.

Fonte: MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.

A decomposição ocorre em diferentes fases, a qual depende dos seguintes aspectos: a) Redução do tamanho das partículas, onde ocorre pouca ou nenhuma decomposição; b) Ataque inicial microbiano, onde as substâncias (proteínas, amido e celulose) são facilmente decompostas e atacadas pelos fungos e pelas bactérias esporulantes. Como consequência, formam biomassa e libera NH_3, H_2S, CO_2, e ácidos orgânicos; c) Ataque microbiano intermediário e; d) Ataque final, onde ocorre a decomposição gradual dos componentes mais resistentes como lignina, por actinomicetos e fungos especialistas (BURNS; MARTIN, 1986).

A parede celular apresenta três constituintes principais: celulose, hemicelulose e lignina e a sua decomposição nos resíduos orgânicos ocorre por meio da quebra desses constituintes, geralmente na forma de polímeros em materiais solúveis que são absorvidos pelas células microbianas. Para isso o processo de decomposição envolve a ação das enzimas específicas que produzem monômeros específicos em função da composição do substrato. O substrato possui cadeias fortemente alinhadas e ligadas entre si, as quais formam uma fita altamente ordenada, cristalina, relativamente inacessível ao ataque enzimático de acordo com a Tabela 11.

Tabela 11. Processo de degradação dos constituintes dos resíduos orgânicos.

	Estrutura molecular básica a ser rompida	**Processo de degradação**
Celulose	Principal componente dos vegetais, está formada por cadeias de unidades de glicose, unindo-se ao C-4 da unidade seguinte por uma ligação de gliosídeo ou ligação β – (1-4)-D.	Sua decomposição ocorre por ação de enzimas (celulases) produzidas por uma diversa população fungica. Fatores físicos como a água, pH, temperatura e oxigênio afetam a decomposição da celulose. Em pH ≤5,5 , há predominância de fungos, enquanto as bactérias do gênero Cytophaga predominam em pH de 5,7 a 6,2; em pH neutro a alcalino, proliferam bactérias do gênero Vibrio.
Hemicelulose	Ligação β – (1-4)-D Xilano Glucuronos Galacturonos	Muitas enzimas são envolvidas na sua degradação, sendo geralmente produzidas por fungos, que parecem iniciar o ataque, seguidos por bactérias.
Lignina	Polímeros de p-hidroxicinamil álcoois	È o biopolímero mais abundante na biosfera, sendo recalcitrante em função do seu alto peso molecular e estrutura química tridimensional que lhe confere alta estabilidade. Por ser uma macromolécula, só pode entrar na célula após a ação enzimática que produz compostos aromáticos capazes de serem absorvidos. As condições de umidade entre 60 e 100%, temperatura de 25 °C, relação C:N de aproximadamente 25:1 e pH na faixa ácida favorecem a decomposição da lignina.

Fonte: Adaptado de: MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.

Nos painéis particulados vários estudos têm sido conduzidos para analisar os efeitos dos fungos apodrecedores em painéis. Teixeira, Santana e Costa (1997) produziram chapas de aglomerado utilizando partículas de bagaço de cana-de-açúcar, coladas com três tipos de resina, sendo duas à base de tanino e uma sintética, à base de ureia-formaldeído. O autores avaliaram a resistência natural ao ataque de fungos xilófagos utilizando dois fungos, um de podridão branca *Pysnporus sanguineus* (Pers.: Fr) Murril, e outro de podridão parda *Gloeophyllum trabeum* (Pers.:Fr.) Murril. Os três tratamentos testados foram classificados como “moderadamente resistentes” ao ataque desses fungos pela norma ASTMD D 2017 -81. A Tabela 12 sumariza trabalhos

realizados utilizando diferentes metodologias de envelhecimento em diferentes tipos de painéis.

Tabela 12. Avaliação de biodeterioração por fungos apodrecedores em painéis

Pesquisador		Resina		Fungos apodrecedores perda de peso (%)				
				Branca	Classe de Resist		Parda	Classe de Resist
Melo et al., 2010	*Madeira de Eucalyptus grandis*	UF	TV	31,11	MR	GT	21,64	R
		Tanino-LPF		36,76	MR		33,44	MR
Stangerlin et al., 2011	Madeira (*Eucalyptus grandis*) / Bambu (*B. Vulgaris*)	UF(8%) Parafina (1%)	TV	41,91	MR	GT	20,34	R
		100/0						
		75/25		46,98	NR		26,64	MR
		50/50		47,32	NR		28,99	MR
		25/75		44,01	MR		22,62	R
		0/100		56,64	NR		20,46	R
Okino et al., 2009	Painéis OSB de Seringueira	UF (5%)	TV	30,72	MR	GT	39,42	MR
		FF(5%)		18,73	R		15,54	R
		UF(8%)		29,78	MR		40,35	MR
		FF(5%)		7,97	AR		4,88	AR
		Madeira		37,7	MR		30,58	MR
Del menezzi et al., 2008	OSB *Pinus sp* comercial	UF	TV	22,1	R	GT	38,8	MR
Okino et al., 1998	Bagaço de cana- de-açúcar: a:acetilização	UF(8%)[a]	TV	2,1	AR	OS	2,1	AR
		TP(8%)[a]		1,9	AR		2	AR
		UF(12%)[a]		2,5	AR		2,4	AR
		TP(12%)[a]		2,7	AR		2,9	AR
	c: controle.	UF(8%)[c]		29,8	MR		36,3	MR
		TP(8%)[c]		39,8	MR		27,4	MR
		UF(12%)[c]		41,3	MR		35,1	MR
		TP(12%)[c]		43,5	MR		30,4	MR
Teixeira, Santana e Costa 1997	Bagaço de cana- de-açúcar	Tanino-LPF (12%)	OS	41,7	MR	GT	42,1	MR
		Phenotan-AG (12%)		36,4	MR		42,3	MR
		UF (12%)		43	MR		42,3	MR
Moubarik et al. 2011	*Pinus maritimus*	UF	CV	15	R	GT	20	R
		Amido de milho :Tanino mimosa: UF (10:4:86)		26	MR		29	MR

Média de perda de peso (% classificação) 0-10 Altamente resistente (AR); 11-24 resistente (R) ; 25-44 moderadamente resistente (MR) ; >45 pouco ou não resistente (PR)/ Ureia Formaldeído: (UF); Fenol Formaldeído: (FF) / Trametes versicolor: (TV); Gloeophyllum trabeum (GT);Pycnoporus sanguineus (PS);Coriolus versicolor(CV); Coniophora Puteana (CP).

Fonte: Própria autoria.

O grau de colonização de fungos emboloradores e manchadores em diferentes tipos de madeira e painéis tem sido avaliados: Painéis tipo strand de bambu e resina fenólica tratados superficialmente (SUN et al., 2010), Madeira de *Pinus sylvestris* e spruce (*Picea abies*) (BOK et al., 2013; JOHANSSON, P; JERMER, J. 2010), painéis multicamada de madeira *cedar , tamarack , spruce e aspen (*YANG; WANG; WAN, 2007), painéis (OSB) com resina polifenolica, *plywood*, e painéis (MDF) de media densidade de Fibra (YANG, 2007).

Johansson et al. (2012) avaliaram os níveis críticos de umidade para materiais de construção (materiais à base de madeira, placas de gesso e placas inorgânicas). Foram inoculadas esporos de seis espécies de fungos emboloradores (*Eurotium Herbariorum, Aspergillus versicolor, Penicillium chrysogenum, Aureobasidium pullulans, Cladosporium sphaerospermum, Stachybotrys chartarum*) e incubados à temperatura entre 10°C e 22°C, e condições de umidade relativa de 75 a 95%. Foi analisado o crescimento de bolor por 12 semanas. O materiais apresentaram diferentes resistências ao crescimento de fungos. Por isso os resultados de um tipo de material de construção não pode ser aplicado para o outro.

Kartal et al. (2012) estudaram fungos emboloradores (*A. niger* , *I. lacteus, P. placenta*) em madeiras de *Pinus sylvestris L*. tratadas com preservativos comerciais durante 12 semanas. Nenhum dos preservativos forneceu inibição completa para o crescimento de fungos. Só os preservativos que apresentavam álcool em sua formulação foram capazes de controlar todos os fungos avaliados, com exceção do *Aspergilus niger*.

O crescimento micelial levou a um maior dano no material de construção do que os esporos, porque o aumento da cobertura de fungos na superfície dos materiais está principalmente relacionado com o micélio que utiliza os materiais e poeira orgânica transportada por via aérea (depositada nas superfícies de materiais) como fontes de nutrientes (CHANG; FOARDE; VANOSDELL, 1995). As construções de madeira de baixa durabilidade devem ser tratadas com presevantes que tem propriedades preservantes fungicidas e/ou insecticidas. Segundo Fojutowski, Kropacz e Noskowiak (2009) o uso dessas substâncias está limitada em alguns países nórdicos devido a aspectos de saúde e ambientais. Esta situação é uma razão para encontrar outros substratos (materiais) e alternativas de processo de tratamento de preservação.

De acordo a o anterior a ampla utilização de Poliuretanos (PU)em nossa sociedade faz com que a sua biodegradação seja de igual importância para a sua fabricação. O equilíbrio entre a produção de polímeros estáveis que resistem a deterioração e ao mesmo tempo geram um minimo impacto ambiental em longo prazo continua a ser um dos maiores problemas para o uso geral desses materiais. Entre tanto apesar da sua resistência microbiana, são eles susceptível ao ataque de fungos e bactérias (NEHA; ANKA, 2015).

Estudos de biodegradação por diferentes micro-organismos na resina poliuretana a base de óleo de mamona tem sido reportados por Spontón et al., (2013), que

analisaram a biodegradação por bactérias *Pseudomonas sp.* em espumas a base de resina poliuretana de óleo de mamona. Nesse estudo foi encontrado crescimento de bactérias e perda de massa, bem como mudanças na estrutura química e morfológica. Cangemi et al., (2006) encontraram mudanças no desempenho térmico em uma poliuretana a base de óleo de mamona avaliando a susceptibilidade ao *Aspergillus e Chryseobacterium meningosepticum.*

Estudos de Oprea (2010) relacionados com biodegradação da resina poiluretana de óleo de mamona utilizou fungos Chaetomium globosum o qual é conhecido pela presença em ambientes internos e é causador de podridão mole na madeira. O autor encontrou que a degradação produzida pelos fungos foi caracterizada pelo desenvolvimento de numerosas cavidades na resina.

Os dados de biodeterioração são mais restritos à madeira sólida do que aos painéis convencionais do tipo chapas aglomeradas e compensadas (OKINO et al., 2009). Entretanto, pouco se conhece sobre os painéis de bagaço de cana-de-açúcar com resina a base de óleo de mamona no Brasil e sobre seu comportamento em relação do ataque de fungos emboloradores e manchadores. Esse comportamento deve ser avaliado para se ter uma previsão da resistência do material quando empregado potencialmente em sistemas construtivos.

6 Comentários

O presente capítulo de revisão bibliográfica serviu de base para a definição dos conceitos da durabilidade aplicados ao compósito pesquisado neste trabalho. A revisão de literatura embasou também os ensaios propostos para o estudo das metodologias de durabilidade e para a avaliação das suas propriedades físico-mecânicas e microestruturais, dos painéis alternativos de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona e painéis comerciais de madeira MDP.

7 Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E 632** - Developed accelerated test t aid prediction of the service life of building components and materials. Philadelphia, 1996. p. 102 - 107.

_____. **ASTM D 5590-00(2010)** e1- Standard test method for determining the resistance of paint films and related coatings to fungal defacement by accelerated four-week agar plate assay. Philadelphia, 2010. 4 p.

_____. **ASTM D1413-07**e1- Standard test method for wood preservatives by laboratory soil-block cultures. Philadelphia, 2007. 8 p.

_____. **ASTM G21-15** - Standard practice for determining resistance of synthetic polymeric materials to fungi. Philadelphia, 2015. 6 p.

_____. **ASTM D 1027** - Accelerated laboratory test of natural decay resistence of woods. Philadelphia, 2008. 5 p.

_____. **ASTM D 1037** - Standard test methods for evaluating properties of wood-based fiber and particle panel materials. Philadelphia, 1996. p. 137-166.

____. **ASTM D 1435-94** - Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics, Philadelphia, 5 p. 1994.

_____. **ASTM D 3273-12 -** Resistence to growth of mold on the surface of interior coatings in na environmental chamber. Pennsylvania, 2012. p. 1-8.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA (ABIPA). **Programa setorial da qualidade de painéis de partículas de madeira (MDP) e painéis de fibra de madeira (MDF)**: condições para o credenciamento de empresas. São Paulo, 2013. Disponível em:<http://www.abipa.org.br/ProgramaSetorialQualidade.php>. Acesso em: 12 maio 2013.

AGENCY ENVIROMENTAL PROTECTION (EPA). **Wood products industry**. In: ____. **AP 42 Compilation of air pollutant emission factors**. 5rd ed. North Carolina: Office of Air Quality Planning and Standards; Environmental Protection Agency, 1995. cap. 10, v. 1. Disponível em:<http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch10/>. Acesso em: 05 jul. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA (ABNT). **NBR 14941** - Tintas para construção civil – método para avaliação de desempenho de tintas para edificações não industriais – Determinação da resistência de tintas, vernizes e complementos ao crescimento de fungos em placas de Petri sem lixiviação. Rio de Janeiro, 2011. 10 p.

____. **NBR 15575/2013** - Edificações habitacionais – desempenho. Rio de Janeiro, 2013. 6 partes.

_____. **NBR 14810** - Chapas de madeira aglomerada - parte 3: métodos de ensaio, terminologia. Rio de Janeiro, 2002. 32 p.

_____. **NBR 14810–2/2013 -** Painéis de partículas de média densidade - parte 2: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. 69 p.

ASOKAN, P.; MOHINI, S.; SHYAM, A. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. **Building and Environment**, Kidlington, v. 42, n. 6, p. 2311-2320, 2007.

AVRAMI, E.; GUILLAUD, H.; HARDY, M. **Terra literature review**: an overview of Earthen architecture conservation. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 2008. 174 p.

BARBIRATO, G. H. A. et al. Painel aglomerado híbrido de casca de amendoim reforçado com partículas de madeira Itaúba. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 685-697, 2014.

BARROS FILHO, R. M. et al. Hybrid chipboard panels based on sugarcane bagasse, ureaformaldehyde and melamine formaldehyde resin. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 33, n. 2, p. 369-373, 2011.

BASTTINELLI, R. A. G.; MARCILIO, C.; LAHR, F. A. R. Emprego do bagaço de cana-de-açúcar (Saccharum officinarum) e das folhas caulinares do bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* na produção de chapas de partículas. **Revista Minerva**, São Carlos, v. 5, n. 3, p. 297-305, 2008.

BELINI,U. L et al. Pilot study for MDF manufacture from sugarcane bagasse and eucalyptus fibers **European Journal of Wood Products**, v. 70, p. 537-539, 2011.

BELINI, U. L. et al. **Painel multicamada com reforço de partículas de bambu**. Scientia Florestalis, Piracicaba, v. 42, n. 103, p. 421-427, set. 2014.

BERTOLINI, S. M. et al. Emprego de resíduos de Pinus sp tratado com CCB e resina PU de mamona na produção de chapas de partículas. In: LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. (Orgs.). **Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos**. São Carlos; EESC/USP, 2013. cap. 2, p. 23-55.

BOK, G. et al. Critical moisture levels and mould resistance of five different wood treatments. In: ANNUAL MEETING OF THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PROTECTION, 44., 2013, Stockholm, Sweden. **Proceedings...** Stockholm, Sweden, 2013. Doc. No. IRG/WP 13-30632.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Diretrizes para avaliação técnica de produtos**: Diretriz SINAT, n. 005: Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo "Light Wood Framing"). Brasília, DF, 2011. 57 p.

BRAZOLIN, S. **Biodeterioração, anatomia do lenho e análise de risco de queda de árvores de tipuana, *Tipuana tipu* (Benth.) O. Kuntze, nos passeios públicos da cidade de São Paulo, SP**. 2009. 266 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **EN 113/80** - Wood preservatives – test method for determining the protective effectiveness against wood destroying basidiomycetes – basidiomycetes determination of the toxic values. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2000. 24 p.

BRITO, E. O. et al. Propriedades de chapas produzidas com resíduos do fruto de coco e partículas de pinus. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 11, n. 2, p. 1-6, 2004.

BURNS, R. G.; MARTIN, J. P. Biodegradation of organic residues in soil. In: MITCHELL, M. J.; NAKAS, J. P. (Eds.). **Microfloral and faunal interactions in natural and agro-ecosystems**. Dordrecht: Martinus Nijhiff, 1986. v. 3, p.137-202.

CANGEMI, J. M. et al. Study of the biodegradation of a polymer derived from castor oil by scanning electron microscopy, thermogravimetry and infrared spectroscopy. **Polímeros**, São Carlos, v. 16, n.2, p. 129-135, 2006.

CANGEMI, J. M.; SANTOS, A. M.; CLARO NETO, S. A revolução verde da mamona. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 3-8, fev. 2010.

CANILHA, L. et al. Bioconversion of sugarcane biomass into ethanol: an overview about composition, pretreatment methods, detoxification of hydrolysates, enzymatic saccharification, and ethanol fermentation. **Journal of Biomedicine and Biotechnology**, New York, v. 2012, art. ID989572, 2012.

CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. L.; COIADO CHAMMA, P. V. Painéis produzidos a partir de resíduos sólidos para aplicação na arquitetura. **Polímeros**, São Carlos, v. 19, n. 1, p. 47-53, 2009.

CARVALHO, S. T. M. **Propriedades térmicas do painel aglomerado de bagaço de cana-de-açúcar (Saccharum officinarum L.)**. Lavras: Editora UFLA, 2012. 73 p.

CASTRO JR., S. L. et al. Particleboards with agricultural wastes: sugar cane bagasse and reforestation wood. **Key Engineering Materials**, Pfaffikon, v. 600, p. 667-676, 2014.

CHAMMA, P. V. C.; LEÃO, A. L.; CARASCHI, J. Avaliação de painéis a partir de resíduos sólidos para uso como elemento arquitetônico. **Polímeros**, São Carlos, v. 19, n. 1, p. 47-53, 2009.

CHANG, J. C. S.; FOARDE, K. K.; VANOSDELL, W. D. Growth evaluation of fungi (Penicillium spp. and Aspergillus spp.) on ceiling tiles. **Atmospheric Environment**, Kidlington, v. 29, n. 17, p. 2331-2337, 1995.

CHIPANSKI, E. R. **Proposição para melhoria do desempenho ambiental da indústria de aglomerado no Brasil**. 2006. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CLAUSEN, C. A.; WEST, M. Test method for assessing resistance of pine lumber and waferboard to mold. **Forest Products Journal**, Madison, v. 55, n. 12, p. 164-166, 2005.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v. 1 – Safra 2014/15, n.4 – Quarto Levantamento**, Brasília, p. 1-29, abr. 2015. Disponível em:<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_04_13_08_45_51_boletim_cana_portugues_-_4o_lev_-_14-15.pdf>. Acesso em: 03 set. 2015.

COUTINHO, F. M. B.; DELPECH, M. C. Poliuretanas como materiais de revestimento de superfície. **Polímeros**, São Carlos, v. 19, n. 1, p. 41-48, 1999.

CREGUT, M. L. New insights into polyurethane biodegradation and realistic prospects for the development of a sustainable waste recycling process. **Biotechnology Advances**, Oxford, v. 31, n. 8, p. 1634-1647, 2013.

CREWDSON, M. **Outdoor weathering must verify accelerated testing**. United States: Q-Lab Corporation, 2009. Disponível em:< http://www.q-lab.com/documents/public/9d677625-3d76-47a0-8099-daf3b24290fc.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2013.

DEL MENEZZI, C. H. S. et al. Properties after weathering and decay resistance of a thermally modified wood structural board. **International Biodeterioration & Biodegradation,** London, v. 62, p. 448-454, 2008.

DROCHYTKA, R.; PETRÁNEK, V. Enviromental deterioration of materials. In: MONCMANOVÁ, A. (Ed.). **Enviromental deterioration of building material**. Slovakia: Slovak Technical University, 2007. p. 249-285.

DUNKY, M. Adhesives in wood industry. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Eds.). **Handbook of adhesive technology**. New York: Marcel Dekker, 2003. p. 887-954.

EVANS, P. D.; THAY, P. D.; SCHMALZL, K. J. Degradation of wood during natural weathering. Effects of lignin and cellulose on the adhesion of acrylic latex primers. **Wood Sci Technol**, v. 30, p. 411-22, 1996.

FABIYI, J. et al. Wood plastic composites weathering: visual appearance and chemical changes. **Polymer Degradation and Stability**, London, v. 93, n. 8, p. 1405-14, 2008.

FARUK, O. et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. **Progress in Polymer Science**, London, v. 37, n. 11, p. 1552-1596, 2012

FIORELLI, J. et al. Particleboards with waste wood from reforestation. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 36, p. 251-256, 2014.

FIORELLI, J. et al. Sugarcane bagasse and castor oil polyurethane adhesive-based particulate composite. **Materials Research**, São Carlos, v. 16, n. 2, p. 439-446, 2013.

FIORELLI, J. et al. Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: an eco-efficient product. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 40, p. 69-75, 2012.

FOJUTOWSKI, A.; KROPACZ, A.; NOSKOWIAK, A. The resistance of thermo-oil modified wood against decay and mould fungi. In: ANNUAL MEETING OF THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PROTECTION, 40., 2009, Beijing, China. **Proceedings...** Beijing, China, 2009. res. 40448.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Datos y cifras globales de productos forestales 2013**. 2013. Disponível em: <http://www.fao.org/forestry/statistics/80938/es/>. Acesso em: 04 nov. 2015.

FOWLER, P. A.; HUGHES, M. J.; ELIAS, R. M. Review biocomposites: technology, environmental credentials and market forces. **Journal of the Science of Food and Agriculture,** Chichester, v. 86, p. 1781-1789, 2006.

FREIRE, S. C. et al. Propriedades físicas de painéis aglomerados comerciais confeccionados com bagaço de cana e madeira. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 18, n. 2, p. 178-185, 2011.

GARZON, N. et al. Durability evaluation of agroindustrial waste based particle boards using accelerated aging cycling tests. **Key Engineering Materials**, Pfaffikon, v. 517, p. 628-634, 2012.

GATANI, M. P. **Utilização de casca de mani para fabricação de chapas de partículas**. Pirassununga: USP, 2009. (Relatório de Pesquisa, Laboratório de Construções e Ambiência, FZEA/USP).

GUILLITE, O. Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 167, p. 215-220, 1995.

HAYASHI, T.; MIYATAKE, A.; HARADA, M. Outdoor exposure tests of structural laminated veneer lumber. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 48, p. 69-74, 2002.

HILLIG, E.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J. Propriedades mecânicas de chapas aglomeradas estruturais fabricadas com madeiras de pinus, eucalipto e acácia-negra. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 59-70, 2002.

HOANG, C. P. et al. Resistance of green building materials to fungal growth. **International Biodeterioration & Biodegradation**, London, v. 64, n. 2, p. 104-113, 2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Madeira**: uso sustentável na construção civil. Dados internacionais de catalogação na publicação (CIP). São Paulo: IPT, 2003.

_____. **Manual**: biodeterioração de madeiras em edifícios. São Paulo: IPT, 2001. 54 p.

IWAKIRI, S. et al. Produção de painéis de madeira aglomerada de Grevillea robusta A. Cunn. ex R. Br. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, p. 883-887, 2004.

IWAKIRI, S. Painéis de madeira: características tecnológicas e aplicações. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 68, ed. esp., 2003.

JAAKKOLA, M. S. et al. Indoor dampness and molds and development of adult-onset asthma: a population-based incident case control study. **Environmental Health Perspectives**, Pittsburgh, v. 110, n. 5, p. 543-547, 2002.

JAAKKOLA, M S. et al.b, Association of indoor dampness and molds with rhinitis risk: A systematic review and meta-analysis Journal of Allergy and Clinical Immunology Rhinitis, sinusitis, and upper airway disease. Volume 132, Issue 5, Pages 1099–1110. 2013.

JOHANSSON, P; JERMER, J. Mould growth on wood-based materials – a comparative study. *Proceedings IRG Annual Meeting,* IRG/WP 10-20455, 8 p. 2010.

JOHANSSON, P. et al. Laboratory study to determine the critical moisture level for mould growth on building materials. **International Biodeterioration & Biodegradation**, London, v. 73, p. 23-32, 2012.

JOHANSSON, P. et al. Microbiological growth on building materials – critical moisture levels. State of the art. **Extracts from the report SP Rapport**, Sweden, n. 11, 2005. Diponível em:<http://www.kuleuven.be/bwf/projects/annex41/protected/data/SP%20Oct%202005%20Paper%20A41-T4-S-05-3.pdf. Acceso em: 30 out. 2015.

JOHANSSON, P. **Critical moisture conditions for mould growth on building materials**. Lund: Lunds University, 2012. 119 p.

JOHNSTON, J. The physical testing of pressure-sensitive adhesive systems. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Eds.). **Handbook of adhesive technology**. New York: Marcel Dekker, 2003.

KAJITA, H.; MUKUDAI, J.; YANO, H. Japanet al durability evaluation of particle boards by accelerating aging test. **Wood Science and Technology**, Heidelberg, v. 25, p. 239-249, 1991.

KARAKUS, B.; GUNTEKIN, E. Feasibility of using eggplant (Solanum melongena) stalks in the production of experimental particleboard. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 27, p. 354-358, 2008.

KARLSSON, P.; MCNATT, J. D.; VERRILL, S. P. Vacuum-pressure soak plus ovendry as an accelerated-aging test for wood-based panel products. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 46, p. 84-88, 1996.

KELLY, M. W. **Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard**. Madison: U.S. Departmente of Agriculture, Forest Service. Forest Products Laboratory, 1977. 65 p. (General Technical Report FPL-10, 1977).

KOJIMA, Y.; SHIMODA, T.; SUZUKI, S. Evaluation of the weathering intensity of wood-based panels under outdoor exposure. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 57, p. 408-414, 2011.

KOJIMA, Y.; SUZUKI, S. Evaluating the durability of wood-based panels using internal bond strength results from accelerated aging treatments. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 57, p. 7-13, 2010.

LISØ, K. R. et al. Decay potential in wood structures using climate data. **Building Research & Information**, Abingdon, v. 34, n. 6, p. 546-551, 2006.

NEHA, M.; ANKA, G. New insights into the microbial degradation of polyurethanes. **RSC Advances,** Cambridge, v. 52, n. 5, p. 41839-41854, 2015.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. 2. ed. São Francisco: M. Freeman, 1993. 689 p.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. Relação das unidades produtoras cadastradas no departamento da cana-de-açucar e agronergia. Brasília: MAPA. Disponível em: <http://www. agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_

Sustentavel/Agroenergia/Orientacoes_Tecnicas/Usinas%20e%20 Destilarias%20Cadastradas/DADOS_PRODUTORES_22-10-2012.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2013

MCNATT, J. D.; LINK, C. L. Analysis of ASTM D 1037 accelerated-aging test. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 39, n. 10, p. 51-57, 1989.

MELLO, S. S. A.; AZAMBUJA, M. A.; SILVA, S. A. A. Avaliação da densidade aparente de chapas de madeira aglomerada confeccionadas com partículas de madeira tropical e poliuretana derivado de óleo de mamona. In: LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. (Orgs.). **Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos**. São Carlos: EESC/USP, 2013. cap. 4, p. 91-110.

MELO, R. R. et al. Resistência de painéis aglomerados produzidos com diferentes proporções de madeira e casca de arroz a fungos e cupins xilófagos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 3, p. 501-511, jul./set. 2010.

MELO, R. R. Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados produzidos com diferentes proporções de madeira e casca de arroz. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 3/4, p. 449-460, 2009.

MENDES, R. Efeito da associação de bagaço de cana, do tipo e do teor de adesivo na produção de painéis aglomerados. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 161-170, 2012.

MENDES, L. M.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; IWAKIRI, S. **Revista da Madeira Wood Magazine**, Edição Especial "Painéis", p. 12, 2003.

MENDES, R. F. et al. Painéis aglomerados produzidos com bagaço de cana em associação com madeira de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, p. 285-295, 2010a.

MENDES, R. F. et al. The adhesive effect on the properties of particleboards made from sugar cane bagasse generated in the distiller. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 32, p. 209-218, 2010b.

MILLER, A. Z. et al. Reproducing stone monument photosynthetic-based colonization under laboratory conditions. **Science of Total Environment**, Amsterdam, v. 405, p. 278-285, 2008.

MONTEIRO, M. B.; FREITAS, A. R. Método de ensaio acelerado para avaliação da durabilidade natural de madeiras. **Revista Árvore,** Viçosa, v. 21, n. 4, p. 555-561, 1997.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.

MORESCHI, J. C. Os causadores de danos a madeira. **Revista da Madeira**, Sao Paulo, v. 4, n. 24, p. 20-22, 1995.

MOUBARIK, A. F. et al. Biological and mechanical performances of particleboard panels made from maritime pine (Pinus pinaster) and glued with cornstarch- mimosa tannin-urea formaldehyde adhesive. In: ANNUAL MEETING OF THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PROTECTION, 42., Queenstown, New Zealand, 2011. **Proceedings...** Queenstown, New Zealand, 2011.

NASCIMENTO, M. F Viabilidade do emprego de Eucalyptus tratado com CCA e CCB na produção de painéis particulados de alta densidade. In: LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. (Orgs.). **Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos**. São Carlos; EESC/USP, 2013. cap. 3, p. 57-91.

NIELSEN, K. F. **Mould growth on building materials**: secondary metabolites, mycotoxins and biomarkers. 2002. 120 f. Ph.D. Thesis – Technical University of Denmark, Lyngby, 2002.

OKINO, E. Y. A. et al. Ensaio acelerado de laboratório de chapas OSB de seringueira submetidas ao ataque de fungos apodrecedores. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, p. 99-107, 2009.

OKINO, E. Y. A. et al. Physico-mechanical properties of chemically modified sugar cane bagasse particleboads. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 52, p. 35-42, 1997.

OKKONEN, E. A.; RIVER, B. H. Outdoor aging of wood-based panels and correlation with laboratory aging: Part 2. **Forest Products Journal**, Madison, v. 46, p. 68-74, 1996.

OPREA STEFAN. Dependence of fungal biodegradation of PEG/castor oil-based polyurethane elastomers on the hard-segment structure. **Polymer Degradation and Stability.** v.95, p. 2396 -2404, 2010.

PABLO, A. A.; PEREZ, E. B.; ELLA, A. B. **Development of particleboard on a pilot-plant and semi-commercial scale using plantation and secondary wood species and agricultural fibrous waste materials**. Philippines: Forest Products Research and Industries Development Commission; University of the Philippines, 1975.

PASSOS, P. R. A. **Destinação sustentável de cascas de coco verde (Cocos nucifera)**: obtenção de telhas e chapas de partículas. 2005. 166 f. Tese (Doutorado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PNUMA. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável e a erradicação da pobreza** – síntese para tomadores de decisão. 2011. Disponível em:< http://www.unep.org/greeneconomy/Portals/88/documents/ger/Green_Economy_Full_report_pt.pdf >. Acceso em: 05 maio 2013.

Q-LAB. **Technical Bulletin LL-9025** - Outdoor weathering: basic exposure procedures. 2011. 8 p. Disponível em: <http://www.q-lab.com/resources/technical-bulletins.aspx>. Acesso em: 05 fev. 2012.

RABELO, S. C.; COSTA, A. C.; ROSSELL, C. E. V. Aproveitamento de resíduos industriais. In: SANTOS, F. A. et al. (Orgs.). **Cana-de-açúcar**: bioenergia, açúcar e etanol - tecnologias e perspectivas. 2. ed. Viçosa: Folha da Mata, 2011. v. 1, p. 1-637.

ROWELL, R. M.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S. Characterization and factors affecting fiber properties. In: FROLLINI, E. (Ed.). **Natural polymers and agrofibers based composites**: preparation, properties and applications. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2000; Botucatu: UNESP. 2000.

SALTHAMMER, T.; MENTESE, S.; MARUTZKY, R. Formaldehyde in the indoor environment. **Chemical Reviews**, Washington, v. 110, n. 4, p. 2536-2572, 2010.

SALTHAMMER, T. The formaldehyde dilemma. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, Muenchen, v. 218, n. 4, p. 433-436. 2015.

SANTOS, R. C. et al. Chapas de partículas aglomeradas produzidas a partir de resíduos gerados após a extração do óleo da madeira de candeia (Eremanthus erythropappus). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 84, p. 437-446, dez. 2008.

SARTORI, D. et al. Painel em madeira de reflorestamento e chapas de partículas para instalações rurais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, p. 171-178, 2012.

SCHEFFER, T. C. A climate index for estimating potential for decay in wood structures above ground. **Forest Product Journal**, Peachtree Corners, v. 21, n. 10, p. 25-31, 1971.

SEKINO, N. Outdoor and indoor exposure test of wood based panels. **Wood Industry**, Tokyo, v. 58, n. 7, p. 298-304, 2003.

SILVA, L. D. A. et al. Avaliação do ciclo de vida (ACV) de painéis de madeira: uma revisão bibliográfica com foco sobre a importância e as necessidades para o contexto brasileiro. In: LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. (Orgs.). **Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos.** São Carlos: EESC/USP, 2013. cap. 6, p. 123-164.

SILVA, A. J. P.; SANTOS, W. L. F.; LAHR, F. A. R. Partículas longas e orientadas de bagaço de cana-de-açúcar na produção de painel similar ao OSB. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 11., 2008, Londrina. **Resumos...** Londrina, 2008. p. 1-10.

SILVA, S. A. M. et al. Strength properties of medium density fiberboards (MDF) manufactured with pinus elliottii wood and polyurethane resin derived from castor oil. **International Journal of Composite Materials**, Rosemead, v. 3, p. 7-14, 2012.

SILVA, S. A. M.; LAHR, F. A. R. Chapas de partículas confeccionadas com resíduos de madeiras tropicais de baixa densidade. In: CHAHUD, E. (Org.) **Reciclagem de resíduos para a construção civil**. Belo Horizonte: FUMEC, 2008. cap. 14, p. 343-365.

SILVA, V. L. M. M.; GOMES, W. C. O.; ALSINA, L. S. Utilização do bagaço de cana de açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 2, p. 27-32, 2007.

SPONTÓN, M. et al. Biodegradation study by pseudomonas sp. of flexible polyurethane foams derived from castor oil. **International Biodeterioration & Biodegradation**, London, v. 85, p. 85-94, 2013.

STANGERLIN, D. M. et al. Durabilidade natural de painéis aglomerados confeccionados com Eucalyptus grandis e Bambusa vulgaris em ensaio de apodrecimento acelerado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 8, ago. 2011.

STARK, N. M.; MATUANA, L. M.; CLEMONS, C. M. Effect of processing method on surface and weathering characteristics of wood-flour/HDPE composites. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, v. 93, p. 1021-1030, 2004.

SUN, F. et al. Study on the thickness swelling of mould-resistant chemical treated bamboo strand woven outdoor flooring. In: ANNUAL MEETING OF THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PROTECTION, 41., 2010, Biarritz, France. **Proceedings...** Biarritz, France, 2010. res. 10-40489.

TABARSA, T.; ASHORI, A.; GHOLAMZADEH, M. Evaluation of surface roughness and mechanical properties of particleboard panels made from bagasse. **Composites: Part B Engineering**, Kidlington, v. 42, p. 1330-1335, 2011.

TEIXEIRA, D. E.; SANTANA, M. A. E.; COSTA, A. F. Aglomerados de bagaço de cana-de-açúcar: resistência natural ao ataque de fungos apodrecedores. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 52, p. 29-34, 1997.

VARANDA, L. D. **Produção e avaliação do desempenho de painéis de partículas de Eucalyptus grandis confeccionados com adição de casca de aveia**. 2012. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

VOJDANI, A. et al. Antibodies against molds and mycotoxins following exposure to toxigenic fungi in a water-damaged building. **Archives of Environmental Health**, Chicago, v. 58, n. 6, p. 324 336, 2003.

WIDYORINI, R. et al. Manufacture and properties of binderless particleboard from bagasse: effects of raw material type, storange methods and manufacturing process. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 52, n. 6, p. 648-654, 2005.

XU, X. et al. The influence of wax-sizing on dimensional stability and mechanical properties of bagasse particleboard. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 29, p. 80-85, 2009.

YANG, D. Q.; WANG, X. M.; WAN, H. Biological protection of composite panel from moulds and Decay. In: ANNUAL MEETING OF THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PROTECTION, 38., 2007, Jackson, USA, 2007. **Proceedings...** Jackson, USA, 2007. res. 07-10612.

YANG, D.Q Water absorption of various building materials and mold growth. In: ANNUAL MEETING OF THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PROTECTION, 39., 2008, Turkey. **Proceedings...** Turkey, 2008. res. WP08-10657.

YANG D.Q Drying Rates and Mold Growth on Various Building Materials under different Environmental Conditions. In: 41ST ANNUAL MEETING Biarritz, France **Proceedings...** France. Doc. No. IRG/WP 10-20454. 2010.

YANG, D. Q. Control of moisture content in wood materials for mold growth. In: SYMPOSIUM INTERNATIONAL UNION OF FOREST RESEARCH ORGANIZATION, 5., 2007, Taipei, Taiwan. **Proceedings...** Taipei, Taiwan, 2007. res. IRG/WP07-10630. 2007.

YOUNGQUIST, J. A. **Wood-bases composites and panel products forest products laboratory wood handbook:** wood as an engineering material. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service Forest Products Laboratory, 1999. 463 p. (Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113).

ZENID, G. J. Madeiras e suas características. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Eds.). **Tecnologias aplicadas ao setor Madeireiro.** Jerônimo Monteiro: Suprema Gráfica e Editora, 2007. p. 125 -158.

ZHANG, J. Y. et al. Residual properties of reformed bamboo/aluminium laminates after hygrothermal aging. **Composites Science and Technology**, Kidlington, v. 61, p. 1041-1048. 2001.

Capitulo 2 - Avaliação de durabilidade de painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar usando ensaios de envelhecimento acelerado por ciclos ASTMD 1037

Artigo publicado em periódico: **GARZON, N.** ; SARTORI, D. ; ZUANTETTI, I. ; BARBIRATO, G. H. A. ; RAMOS, R. D. ; FIORELLI, J. ; SANTOS, S. F. ; SAVASTANO JUNIOR H .Durability evaluation of agroindustrial waste based particle boards using accelerated aging cycling tests. **Key Engineering Materials**, Pfaffikon, v. 517, p. 628-634, 2012.

RESUMO

A deterioração de painéis particulados a base de resíduos agroindustriais foi avaliada por comparação de suas propriedades físicas e mecânicas. Os painéis particulados foram preparados com partículas de bagaço de cana-de-açúcar (85% em peso do compósito) aglomeradas com resina bi-componente a base de óleo de mamona (15% em peso). As partículas e a resina foram misturadas entre 2 a 3 minutos, e posteriormente foi formado um colchão. As condições de prensagem foram: temperatura, 100°C; pressão, 5 MPa; e tempo de prensagem, 10 minutos. As dimensões dos painéis produzidos foram 0.40 m x 0.40 m x 0.01 m e dos corpos de prova foram de 0.25 m × 0.05 m × 0.01 m. O ensaio de envelhecimento acelerado foi baseado na norma ASTM D 1037 (2006), para determinação dos principais fatores e causas de deterioração, assim como identificar sua influência no desempenho físico-mecânico. O ensaio consistiu em 6 ciclos, cada um com seis etapas. (i) Imersão em água a 49°C por 1 h (ii) vapor a 93°C por 3 h, (iii) congelamento a -12°C por 20 h, (iv) ar quente e seco a 99°C por 3 h, (v) vapor a 93°C por 3 h, e (vi) ar quente e seco a 99°C por 18 h. Módulo de Ruptura (MOR), Módulo de Elasticidade (MOE), Adesão Interna (AI), Absorção de Água (AA%) e Inchamento em Espessura (IE%), foram mensuradas antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado. Os painéis particulados antes do ensaio de envelhecimento acelerado apresentaram desempenho mecânico aceitável. MOR: 21.86 ± 2.16 MPa, MOE: 2.77 ± 0.26 GPa, and AI: 1.18 ±0.40. O desempenho dos painéis particulados após o ensaio de envelhecimento acelerado apresentaram os seguintes valores: MOR: 6.25 ± 0.70 MPa, MOE: 0.52 ± 0.10 GPa, e AI: 0.15 ± 0.07. Após o ensaio de envelhecimento acelerado os materiais apresentaram desempenho físico e mecânico similar a painéis particulados de baixa densidade (LD1).

Palavras-chave: Resíduos agroindustrial. painéis particulados. deterioração. durabilidade. envelhecimento acelerado.

ABSTRACT

The degradation of agro-industrial waste-based particle boards reinforced with sugar cane bagasse was evaluated by comparing their physical and mechanical properties. The particle boards were prepared with sugar cane bagasse particles (85% by weight of composite) and mixed with bi-component polyurethane resin based on castor oil (15% by weight). After mixing for 2 to 3 min, the resulting mixtures were pre-pressured. Standard molding conditions were: temperature, 100°C; pressure during heating, 5 MPa; and heating time, 10 min. The dimensions of the particle boards produced in the laboratory were 0.40 m x 0.40 m x 0.01 m. The boards were cut into testing specimens with dimensions 0.25 m × 0.05 m × 0.01 m. The accelerated aging test was carried out based on the ASTM D 1037(2006) standard in order to determine the main factors that cause degradation and to identify their influence. The test consists of cycles of six treatment steps, i.e., immersion in water at 49°C for 1 h, steaming at 93°C for 3 h, freezing at -12°C for 20 h, drying at 99°C for 3 h, steaming at 93°C for 3 h, and drying at 99°C for 18 h. This cycle was applied six times for all specimens. Modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), internal bonding strength (IB), water absorption (WA%) and thickness swelling (TS%) were measured before and after the cycles of accelerated aging. The performance of the particle boards before accelerated aging presented acceptable mechanical performance, MOR: 21.86 ± 2.16 MPa, MOE: 2.77 ± 0.26 GPa, and IB: 1.18 ±0.40. The performance of the particle boards decreased after accelerated aging showed, MOR: 6.25 ± 0.70 MPa, MOE: 0.52 ± 0.10 GPa, and IB: 0.15 ± 0.07. The results were influenced by the temperature, relative humidity and warm water. After the accelerated aging process, the materials showed mechanical behavior similar to Low-Density grade Particleboard (LD1).

Key words: agro-industrial waste. particle boards. degradation. durability. accelerated aging test.

1 Introdução

O uso de fontes alternativas para substituir a madeira na indústria da fabricação de painéis particulados tem aumentado nos últimos anos, principalmente, devido ao esgotamento dos recursos florestais. Entre os substitutos potenciais podem-se incluir, resíduos de colheita de madeira, cascas, plantas anuais, resíduos vegetais, resíduos de fábricas de celulose e papel reciclado (AKGÜL; ÇAMLIBEL, 2008).

As características dos materiais compósitos produzidos a partir de resíduos agroindustriais com vários aditivos são determinadas por reações internas que ocorrem com o envelhecimento. O processo de envelhecimento pode reduzir consideravelmente o desempenho físico-mecânico de tais materiais.

A indústria de painéis de partículas no Brasil prefere utilizar resíduos de madeira de pinho de reflorestamento e algumas espécies de eucalipto (IWAKIRI et al., 2004). No entanto, à partir de resíduos agroindustriais de materiais lignocelulósicos surge alternativa viável na produção de painéis de partículas. O aumento da produção agrícola brasileira (e, posteriormente, a produção de resíduos agroindustriais) contribui para estes novos desenvolvimentos na fabricação de painéis de madeira.

O bagaço de cana-de-açúcar é um material lignocelulósico composto por um material polimérico hidrófilo natural, com muitos grupos-OH, que é capaz de se combinar com as moléculas de água. No entanto, nenhuma mudança significativa ocorre na microestrutura do compósito, se quando usado como reforço é encapsulado na matriz de um polímero hidrofóbico (YANG et al., 2006).

Os estudos sobre a produção de painéis de partículas reforçado com bagaço de cana-de-açúcar, tem sido desenvolvidos por vários autores. Battistelle, Marcilio e Lahr (2009) avaliaram a possibilidade de produção de painéis de partículas a partir do bambu (bambu-gigante) fibras do tronco, folhas e bagaço de cana-de-açúcar (Saccharum officinarum) e resina de uréia como matriz polimérica. Os resultados mostraram que o bagaço de cana-de-açúcar tem um bom potencial para a produção de painéis de partículas e as propriedades físicas e mecânicas atendem as recomendações formuladas pelos documentos normativos. Por esta razão, a durabilidade de painéis reforçados com bagaço de cana-de-açúcar deve ser analisada.

Um dos métodos para avaliar a durabilidade de painéis de partículas e outros painéis à base de madeira, submetidas a exposição severa é a aceleração por teste de envelhecimento de seis ciclo, apresentado na norma ASTM D 1037(2006) MCNATT; LINK, 1989; KAJITA; MUKUDAI; YANO, 1991; OKKONEN; RIVER, 1996; ZHANG et al., 1998; KARTAL; GREEN, 2003; TOMAK et al., 2012). O teste foi desenvolvido na década de 1930 pelo National Bureau of Standards (NBS) para determinar a durabilidade em painéis de fibra (DUNKY, 2003). O ensaio ASTM D 1037(2006) inclui etapas de congelamento que não são realistas em regiões tropicais como o Brasil. Isso abre a oportunidade de discutir o ajuste da metodologia do teste de envelhecimento acelerado para diferentes climas.

O ensaio de envelhecimento acelerado, tem como objetivo simular em um curto período de tempo uma ou mais condições ambientais extremas que podem ser esperadas à partir de um produto real em uso. Os problemas mais frequentemente relatados com o ensaio estabelecido na norma ASTM D 1037 (2006) é que é muito longo para ser utilizado como uma verificação de controlo de qualidade, na fábrica. Em comparação com outros métodos padrão, o procedimento de ASTM D 10379 (2006) (6 ciclos) é o tratamento mais severo (KOJIMA; NORITA; SUZUKI, 2009). Cada um dos seis ciclos contém seis passos individuais de exposição e o ensaios demora um total normalmente 2 -1/2 semanas, uma vez que pode ser interrompida apenas na etapa de congelação. Adicionalmente é necessário tempo adicional para reacondicionar os

corpos de prova, antes de realizar os ensaios das propriedades físico-mecânicas (MCNATT; LINK, 1989).

O objetivo do presente estudo foi avaliar o desempenho físico e mecânico dos compósitos reforçados com resíduos de cana-de-açúcar e resina de poliuretana bi-componente à base de mamona, submetidos ao envelhecimento acelerado. Após a realização dos ensaios de envelhecimento acelerado, foram avaliadas e determinadas as propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova. Este ensaio permitiu identificar a degradação inicial dos painéis de bagaço de cana-de-açúcar à partir do ensaio de envelhecimento acelerado ASTM D 1037 (2006).

2 Materiais e Métodos

2.1 Fabricação de painéis de partículas não convencionais

Os painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar (BCP) com resina bicomponente a base de mamona foram produzidos em escala de laboratório seguindo as recomendações estabelecidas por Maloney (1996) e adaptado por Sartori et al. (2012). O processo iniciou com a coleta do bagaço de cana-de-açúcar em duas usinas da região de Pirassununga-SP.

O material foi peneirado em malha de 2 mm para retirar as partículas mais finas. Posteriormente, foi picado em um moinho de facas com peneira de 8 mm e seco em estufa (60 °C) até atingir umidade de equilíbrio de 12%. Como aglomerante de partículas do bagaço de cana-de-açúcar, foi utilizada a resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona, sendo um dos componentes o poliol derivado do óleo vegetal e o outro o isocianato polifuncional (catalisador), em uma proporção de 1 parte de poliol para 2 partes do catalisador , em 15% da massa das partículas.

A resina e as partículas foram misturadas em um batedor planetário durante 3 minutos. Posteriormente, as partículas foram inseridas em um molde formador de painel (50 x50 cm) e inserida em prensa termo-hidráulica a condições de 100°C e 5 MPa de pressão, por 10 minutos. O painel foi esquadrejado retirando as bordas para seu acabamento final (Figura 8).

Figura 8. Fluxograma ilustrativo do processo de fabricação dos painéis particulados com bagaço de cana-de-açúcar

Fonte: Própria autoria.

2.2 Tratamento superficial

A metade dos corpos de prova extraídos dos painéis, tanto os elaborados com bagaço de cana-de-açúcar quanto o comercial, foram tratados superficialmente com resina poliuretana à base de óleo de mamona, como revestimento externo. Foi misturada uma proporção de 1 parte de poliol para 1 parte do catalisador. A aplicação foi realizada por meio de um pincel.

2.3 Ensaio de envelhecimento acelerado ASTM D 1037:2006

O objetivo principal desse estudo de caso foi determinar os fatores de degradação (temperatura, absorção de água, congelamento e absorção de umidade) do ensaio de envelhecimento acelerado proposto pela norma ASTMD 1037-2006, conforme aTabela 13.

Tabela 13. Condições de exposição no ensaio ASTMD 1037:2006

Método	*Etapa*	*Temperatura (°C)*	*Tempo (horas)*	*Equipamento utilizado*
ASTM D 1037 6 ciclos	Imersão água	49	1	Banho térmico com circulação de água (BT)
	Vapor	93	3	BT
	Congelamento	(-12)	20	Freezer
	Ar quente e seco	99	3	Estufa
	Vapor	93	3	BT
	Ar quente e seco	99	18	Estufa
	Acondicionamento	Temp: 20+-3 C Umidade: 65+-2 % Tempo: 48 horas		Câmara Climática
	Total		**48**	

Fonte: Própria autoria.

O conceito do valor retido de uma determinada propriedade física e ou mecânicas, após os ensaios de envelhecimentos acelerado ou natural tem sido usado como critério para avaliar a durabilidade dos painéis (RIVER, 1994; NORITA; KOJIMA; SUZUKI, 2008; KOJIMA; SUZUKI, 2010). Foram analisadas as propriedades físico-mecânicas, tais como módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e adesão interna (AI) dos painéis de bagaço de cana-de-açúcar (BCP), sem selagem na borda, com e sem revestimento superficial, antes e após envelhecimento acelerado. São discutidos os efeitos do envelhecimento acelerado. Para tanto, foram calculados os percentuais de retenção de cada propriedade AI retido % 100 (Eq. 1), MOE retido % X 100 (Eq. 2) e MOR retido %(Eq. 3) de cada propriedade após o envelhecimento.

$$Adesão\ interna\ (\%) = \frac{AI\ após\ envelhecimento}{AI\ antes\ de\ envelhecimento} \text{x } 100 \qquad \text{(Eq. 1)}$$

$$MOE\ (\%) = \frac{AI\ após\ envelhecimento}{AI\ antes\ de\ envelhecimento} \text{X } 100 \qquad \text{(Eq. 2)}$$

$$MOR\ (\%) = \frac{AI\ após\ envelhecimento}{AI\ antes\ de\ envelhecimento}\ x100 \qquad \text{(Eq. 3)}$$

3 Resultados e Discussão

Após cada uma das 6 etapas do ensaio, foram realizadas inspeções em cada corpo de prova para identificar os efeitos gerados por cada um dos fatores de degradação. A Tabela 14 resume os tipos de degradação identificados em cada etapa e/ou ciclo. Vale ressaltar que todas as etapas completa 1 ciclo. Neste trabalho, os corpos de provas foram submetidos a 6 ciclos. Observe-se o aparecimento do inchamento nos corpos de prova desde o primeiro ciclo. Segundo Kajita, Mukudai e Yano (1991) o maior inchamento em espessura acontece nos dois primeiros ciclos como causa da exposição a vapor. De igual forma não se apresenta diferença no inchamento entre as etapas de vapor e congelamento em cada ciclo. Entretanto, os autores indicam que o aumento no inchamento após a etapa de congelamento é causada pela expansão volumétrica da umidade que penetra nas partículas de madeira e/ou entre os espaços vazios entre as partículas.

Tabela 14. Agentes e mecanismos de deterioração identificada no ensaio de envelhecimento acelerado ASTM D 1037 em painéis particulados à base de bagaço de cana-de-açúcar, com (BCP CR) e sem (BCP SR) revestimento superficial.

Etapas	BCP CR	BCP SR
Imersão em água	Delaminação (2) Deformação de extremos (4)	Inchamento (1) Absorção de água (1)
Vapor de água	Delaminação (1)	Inchamento,(1) Empenamento(1) Delaminação (1)
Congelamento	Delaminação(1)	Delaminação (1) empenamento (2)
Calor em ar seco	Inchamento (1), Delaminanação (1), Rugosidade superficial (4) Mudança de cor (6)	Agravamento do empenamento (1), Intensificou a delaminação (3), Descoloração (5)
Vapor de água	Inchamento (1)	Ganho de massa (1)
Calor em ar seco	Empenamento (1)	Perda de massa (1)

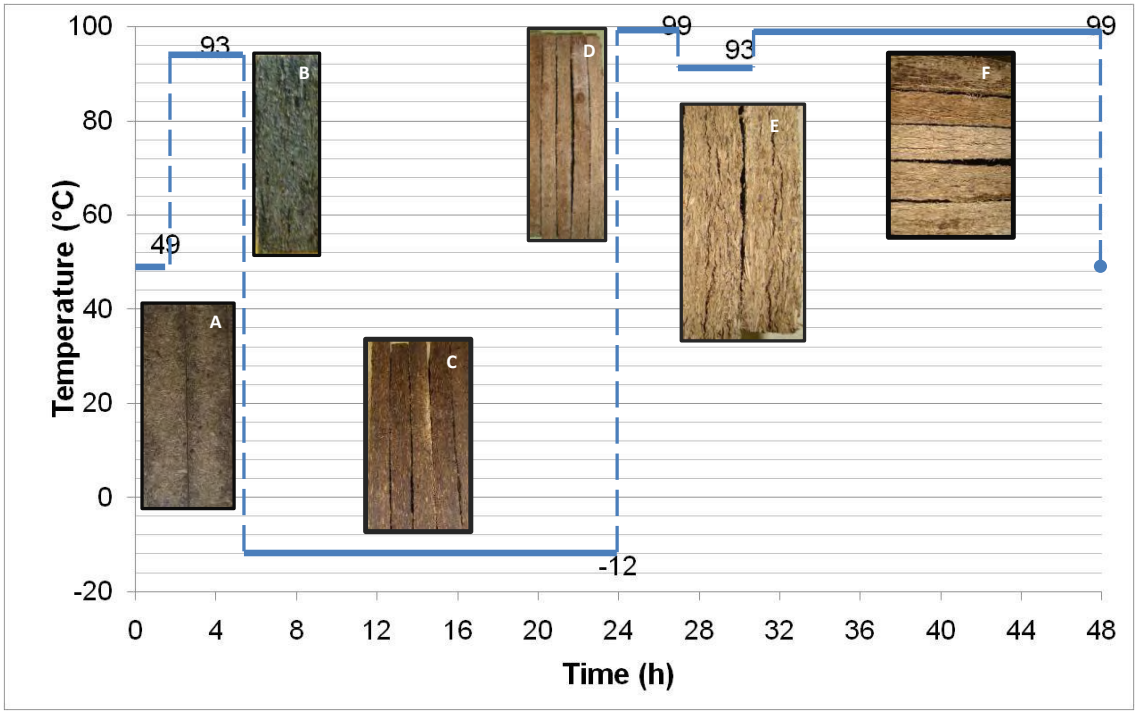
( ) Número do ciclo que a partir do qual foi identificada a degradação

Fonte: Própria autoria.

A Figura 9 apresenta de forma esquemática os passos do ensaio de envelhecimento acelerado e as alterações das características físicas dos corpos de prova dos painéis particulados a base de bagaço de cana-de-açúcar. Na primeira etapa espécimes foram imersos em água (imersão). Nesta etapa foi observada a absorção de água e consequentemente, uma mudança na cor do material. Na segunda etapa nos corpos de prova submetidos a vapor, foi identificada uma expansão e inchamento em espessura. Na etapa de congelamento foi observado ganho de peso e umidade nas amostras. Nas

etapas, D e F os corpos de prova foram submetidos ao ar seco. Os danos foram observados nas faces laterais a delaminação em camadas, que ocorreu aumento no número de ciclos.

Figura 9. Etapas de ensaio de envelhecimento acelerado ASTMD 1037 em painéis de bagaço de cana-de-açúcar sem revestimento superficial.



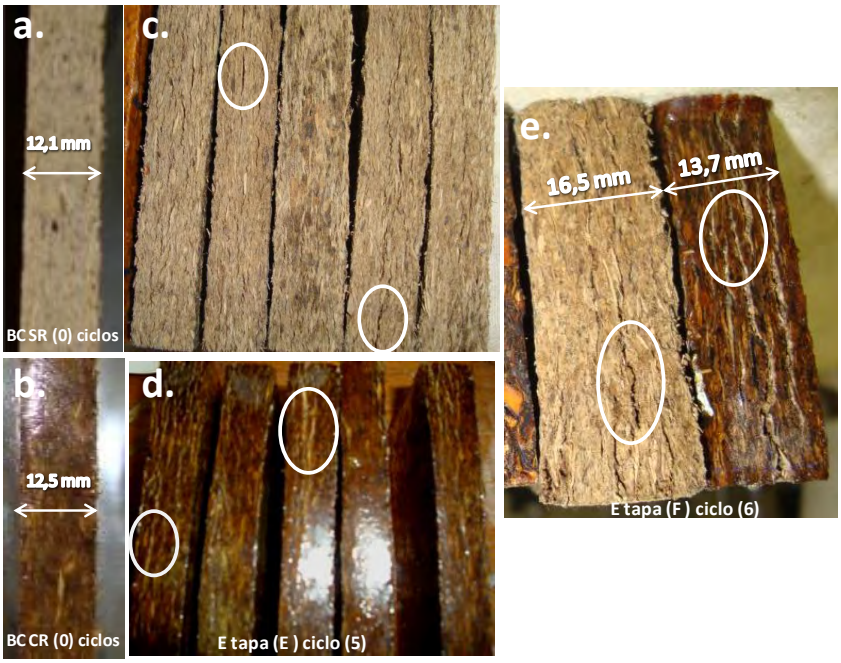
Fonte: Própria autoria.

A Figura 10a e Figura 10b apresentam as bordas laterais dos corpos de prova sem envelhecimento dos corpos de prova BCSR e BCCR. Exemplos da delaminação nos corpos de prova causada pela absorção de água após as etapa (E) do ciclo 5 e ao finalizar o ensaio de envelhecimento acelerado são apresentados na Figura 10c para BCSR e na Figura 10d para BCCR. A Figura 10e mostra inchamento em espessura do ensaio de envelhecimento acelerado delaminação ao final das etapas dos 6 ciclos ASTMD 1037: a) imersão em água; b) Vapor de água; c) Congelamento; d) Calor ar seco; e) Vapor de água; e f) calor em ar seco nos corpos de prova sem e com revestimento superficial. (MCNATT; LINK, 1989) avaliaram e analisaram a contribuição de ASTMD 1037 para cada etapa do ensaio na deterioração em painéis Hardboard, particleboard, flakeboard, waferboard, and oriented strandboard. Os autores encontraram que a taxa de deterioração diminuiu com cada ciclo sucessivo de envelhecimento. De igual forma quatro ciclos de envelhecimento acelerado tinham essencialmente o mesmo efeito na resistência à flexão e rigidez como os seis ciclos.

Os corpos de prova que foram revestidos superficialmente com resina, apresentaram menor delaminação, deformação e inchamento em espessura, assim como um desempenho mecânico superior em relação a MOR e MOE, dos painéis sem revestimento superficial. Nestes painéis ocorreram a diminuição da adesão interna

entre as partículas, e a resina ocasionando a redução na resistência à tração e aumentando os microvazios e a absorção de água, ciclo por ciclo.

Figura 10. Delaminação e inchamento na espessura em corpos de prova no ciclo 5 etapas de ensaios ASTMD 1037 E . 0 ciclos: a)BCSR b)BCCR c) BCSR d)BCCR. (e) Etapa F calor em ar seco 6 ciclos. Os círculos indicam a delaminaçao nas bordas do corpo de prova.



Fonte: Própria autoria.

A Tabela 15, lista os resultados do inchamento em espessura (IE), assim como o percentual de acréscimo após o envelhecimento acelerado. Observa-se que o percentual de acréscimo dos corpos de prova sem revestimento superficial foi de 36%, ou seja, o envelhecimento acelerado resultou no aumento do IE. Essa percentagem é típica de painéis planos de flocos de madeira sem revestimento superficial em painéis Waffer e OSB (MCNATT; LINK, 1989). No entanto, o percentual de acréscimo de IE para os painéis de bagaço de cana-de-açúcar com revestimento superficial foi de apenas 9%, valor inferior ao obtido pelos autores para painéis particulados com resultado de 13%.

Tabela 15. Resultados do ensaio de inchamento em espessura residual (IE) de painéis de bagaço de cana-de-açúcar

Material	**Ciclos**	**Espessura (mm)**			**IE residual %**
BCP SR	0	12,10	±	0,43	36
BCP SR	6	16,50	±	0,94	
BCP CR	0	12,53	±	0,27	9
BCP CR	6	13,68	±	0,92	

Fonte: Própria autoria.

Segundo Yang et al. (2006), os valores de inchamento em espessura e a absorção de água para os compósitos particulados são influenciados pela taxa de preenchimento de água, da característica do revestimento superficial (por exemplo, hidrofóbico ou hidrofílico) e do tipo de resina como aglomerante. A resina superficial atuou como um agente de proteção no qual ajudou a diminuir o inchamento em espessura do material. Entretanto, conforme Vilaplana, Strömberg e Karlsson (2010) a penetração da umidade em biocompósitos é conduzida por três mecanismos diferentes, ou seja, (i) difusão das moléculas de água dentro de microvazios entre cadeias poliméricas e a fibras; (ii) transporte capilar entre microvazios e falhas entre a resina e a fibras e; (iii) transporte através das micro trincas da matriz formadas durante o processo de cura.

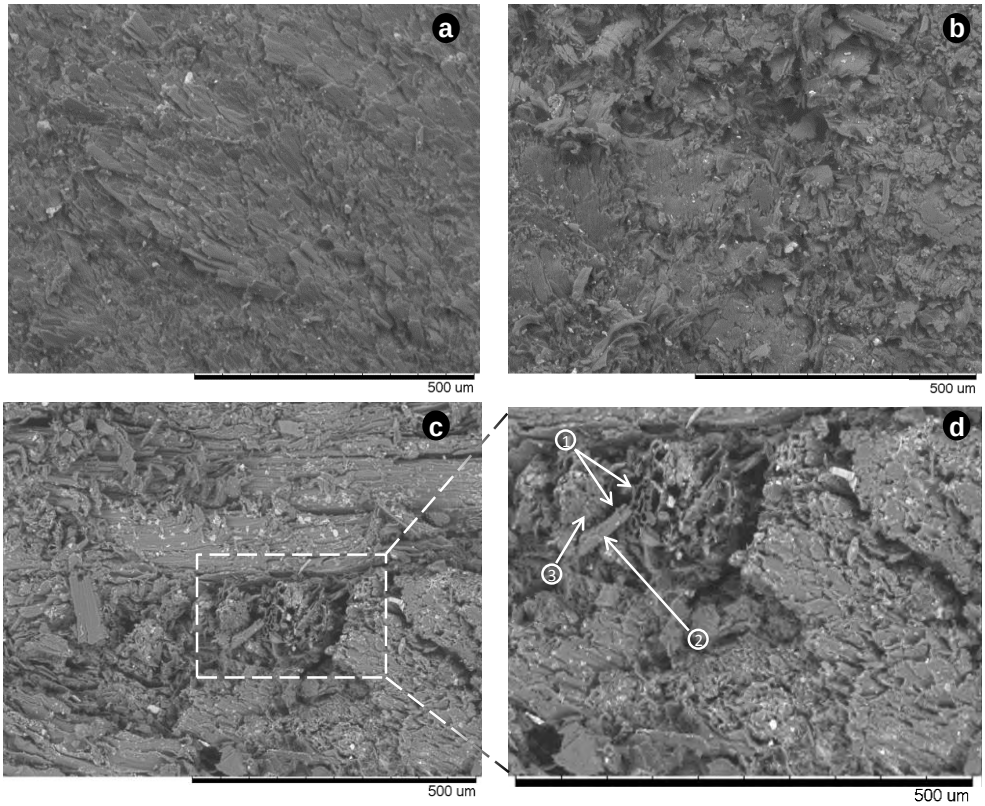
Segundo River (1994) o inchamento do material aumenta a espessura resultante da exposição a água e, consequentemente, a força de adesão interna. As etapas de imersão, de vapor de água, seguidas de etapas de congelamento, de calor em ar seco geram forças de expansão que podem diminuir a adesão interna das partículas. Além disso, a água atua como um fator de degradação da interface (parede celular do material lignocelulósico) entre as partículas, além de saturar as mesmas (LIU; McNATT, 1989).

A seguir serão apresentadas as figuras das micrografias realizadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos corpos de prova de painéis de bagaço de cana-de-açúcar antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado. A análise dessas micrografias permite realizar considerações sobre a interação entre as partículas e a resina poliuretana bi componente à base de óleo de mamona usada como aglomerante, relacionando-as com as propriedades físico-mecânicas.

A Figura 11a, apresenta os corpos de prova antes do envelhecimento acelerado. Nesta figura as partículas de bagaço ficam envolvidas na resina mostrando uma adesão regular. Na Figura 11b correspondente aos corpos de prova com revestimento superficial após ensaio de envelhecimento acelerado, observa-se ou constata-se a diminuição da adesão das partículas e a presença de vazios que permitiram a penetração da água e a umidade. A Figura 11c nos corpos de prova sem revestimento foi observado um aumento dos espaços vazios e a falta de aderência entre a fibra e a resina, ocasionando uma maior deformação do material no momento da ruptura, verificado após os ensaios mecânicos.

Como observado nos resultados para as propriedades mecânicas, houve uma influência significativa do envelhecimento acelerado na redução das propriedades, e essa redução está diretamente associada a deterioração das partículas, devido à sua natureza hidrofílica que é transferida ao biocompósito (LE DUIGOU; DAVIES; BALEY, 2009). A Figura 11d, apresenta um detalhe dos vazios gerados pela deterioração do material, assim como a separação das fibras e a resina que aumentaram a entrada da água e como consequência da hidrofilicidade do material.

Figura 11. Micrografia obtida por MEV de corpos de prova de painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar BCPCR a) Sem envelhecimento (0 Ciclos); b) Após 6 ciclos. BCPSR c) Apos envelhecimento (6 ciclos) d) Detalhe de corpos de prova envelhecidos 1-vazios 2-Resina 3- Partículas de bagaço de cana de cana-de-açúcar.



Fonte: Própria autoria.

A Tabela 16 lista os resultados obtidos para as propriedades mecânicas de MOR, MOE e adesão interna (AI) para os corpos de prova de painéis de bagaço de cana-de-açúcar, com e sem revestimento superficial, após o ensaio de envelhecimento acelerado. De igual forma, apresenta as porcentagens do MOR e do MOE retido dos corpos de prova dos painéis particulados com e sem revestimento superficial, após envelhecimento acelerado de acordo com a norma ASTMD 1037-2006. Observa-se uma diminuição nos valores médios das propriedades mecânicas (MOR e MOE) dos corpos de prova que foram expostos aos 6 ciclos em relação ao material de referência (0 ciclos).

Constata-se que os materiais com proteção superficial apresentaram um melhor desempenho mecânicos após o envelhecimento. De acordo com a norma ANSI/A 208.1, os painéis com bom desempenho mecânico devem manter 50% do valor recomendado do MOR, após o ensaio de envelhecimento acelerado, segundo a norma ASTMD 1037-2006.

Tabela 16. Valores médios das propriedades mecânicas dos painéis particulados antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado de acordo com a norma ASTMD-1037-2006.

Material	Ciclos	AI (MPa)	AI ret %	MOR (MPa)	MOR ret %	MOE (GPa)	MOE ret %
BCP SR	0	1,2 ± 0,4	13	21,7 ± 2,2	29	2,8 ± 0,3	19
BCP SR	6	0,2 ± 0,1		6,3 ± 0,7		0,5 ±0,1	
BCP CR	0	1,2 ± 0,1	27	21,8 ± 3,8	68	2,2 ±0,3	69
BCP CR	6	0,3 ± 0,1		14,8 ± 2,1		1,5 ±0,4	

Fonte: Própria autoria.

Os valores de MOE após o ensaio de envelhecimento acelerado apresentaram diferença estatística (P-valor < 0,0004) entre os corpos de prova com e sem revestimento superficial. Embora o valor retido de MOE seja acima de 50%, a norma ANSI/A208.1-1999 estabelece critérios de desempenho mecânico após o envelhecimento acelerado baseando-se apenas no valor do MOR retido. Kojima e Suzuki (2010) avaliaram painéis de partículas de madeira e resina de fenol-formaldeído para comparar várias metodologias de envelhecimento acelerado. Os pesquisadores mostraram que esses painéis de partículas de madeira apresentam o valor retido de MOE de 5%, enquanto o painel de bagaço de cana-de-açúcar sem revestimento superficial estudado neste trabalho apresentou um valor retido de MOE de 13%, após o envelhecimento acelerado de acordo com a norma ASTMD 1037.

Os valores de MOR obtidos após o ensaio de envelhecimento acelerado baseado na norma ASTMD 1037-2006 apresentaram diferença estatística entre os corpos de prova com e sem revestimento superficial (P-valor 0,0001). De acordo com a norma ANSI/A208.1-1999 da American National Standard, os painéis de partículas com bagaço de cana-de-açúcar sem revestimento superficial apresentaram valores de MOR de painéis de baixa densidade. No caso dos materiais com revestimento superficial atingiram valores de MOR de painéis de média densidade. Fiorelli et al. (2012) avaliaram painéis particulados de fibras de coco e resina poliuretana a base de óleo de mamona durante 6 ciclo no ensaio ASTMD 1037, e os resultados obtidos pelos pesquisadores foram de 63,2% (MOR) e 46,48 (MOE) e 48,3% para (AI). Neste estudo os autores indicam que os painéis devem ser utilizados em ambientes com menor exposição a umidade.

Após o envelhecimento acelerado os painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar com e sem revestimento superficial apresentaram o valor retido de adesão

interna acima de 50%. Segundo Kajita, Mukudai e Yano (1991) a adesão interna está relacionada com a deterioração e delaminação como consequência da absorção de água, que consequentemente é responsável pela variação da espessura nos corpos de prova depois dos seis ciclos no ensaio de envelhecimento acelerado conforme a norma ASTMD 1037 (6 ciclos).

Segundo (MCNATT; LINK, 1989) a supressão da etapa de congelamento de 20 horas no ensaio de envelhecimento acelerado ASTMD1037 não teve nenhum efeito sobre o resultado da exposição. No entanto, a deleção da etapa de vapor implica numa menor deterioração dos painéis. A eliminação de ambas as etapas, congelamento e vapor produzem aproximadamente a mesma deterioração nos painéis, assim como, a eliminação única da etapa de vapor. Indicando oportunidades concretas para o desenvolvimento de uma alternativa reduzida para diminuir o tempo de execução do ensaio de 6 ciclos.

Karlsson, Mcnatt e Verrill (1996), Kartal e Green (2003), Kojima e Suzuki (2010), avaliaram e compararam o ensaio de envelhecimento acelerado ASTMD 1037 (6 ciclos) com outros ensaios em diferentes ciclos 1, 3 e 6 ciclos. Concluíram e indicaram o ensaio de ASTMD1037 (6 ciclos), como o ensaio mais agressivo. Kojima e Suzuki (2010) avaliaram e compararam o ensaio ASTM com 5 anos de exposição ao intemperismo natural e os ensaios de envelhecimento acelerado JIS-B , APA D-1, V313 ,ASTM e VPSD, em painéis particulados a base de fenol formaldeído. Os autores concluíram que os efeitos produzidos pelo tratamento acelerado foram semelhantes aos encontrados após a exposição natural. De igual forma, indicam como os ensaios JIS-B, V313, e 5 ciclos de VPSD produziram efeitos de média severidade nos painéis. Finalmente, os autores encontraram uma correlação de 1 para um entre o ensaio ASTM (6 Ciclos) e APA D1 (6 ciclos). Sendo assim, os autores sugerem a similaridade entre os ensaios JIS-B e ASTM.

4 Considerações Finais

- Os valores médios de resistência da adesão interna (AI), módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) das amostras submetidas ao envelhecimento acelerado, com base nas normas ASTM D 1037, são estatisticamente menores do que aquelas antes do envelhecimento. No caso da propriedade de resistência da adesão com a adição do revestimento, a adesão e ligação interfacial entre as partículas de bagaço e a resina poliuretana apresentaram 27% da propriedade retida, em comparação dos 13% apresentado nos corpos de prova sem revestimento superficial. No entanto, o ensaio de envelhecimento mostrou-se severo.

- O inchamento em espessura residual (após 6 ciclos) dos bio-compósitos aumentou após o ensaio de envelhecimento acelerado para os corpos de prova

que tiveram revestimento superficial de (9%), quando comparados com aqueles sem revestimento superficial. Em função disto, apresentaram um inchamento em espessura residual de (36%), indicando uma baixa resistência da adesão interna das partículas aos agentes extremos de degradação, que foram simulados nas 6 etapas dos 6 ciclos como a imersão de água, congelamento, descongelamento e alta umidade.

- O revestimento superficial mostrou-se um agente de compatibilização e de proteção do material em relação as propriedades de MOR, indicando a retenção de 68%, em comparação aos 29% dos corpos que não foram revestidos. Deste modo, permitindo satisfazer o requisito estabelecido de valor retido% na norma ANSI ANSI/A208.1-1999 da American National Standard de 50%.

- Para MOE os valores obtidos após o ensaio de envelhecimento acelerado nos corpos de prova mostraram-se inferiores dos corpos de prova sem envelhecimento. No entanto, os corpos de prova com revestimento superficial apresentaram um valor retido de 69%, em comparação ao valor de 19%, obtido para os corpos de prova sem revestimento.

- Devido a norma ASTM D 1037 que inclui a fase de congelamento, esta não corresponde às condições de exposição das regiões tropicais, como o Brasil. De igual forma e de acordo com os ensaios descreitos na revisão bibliográfica, os ensaios V313 e EN321 incluem congelamento. O ensaio VPSD utiliza vácuo e é usado para análise de painéis fabricados com melanina, e o ensaio JIS-B que inclui uma exposição curta mediante imersão em água e temperatura. Pelo anterior foi determinada a utilização de outro ensaio de envelhecimento que simula os efeitos predominantes de temperatura e exposição a umidade. Com base nos resultados e na revisão da literatura, foi definida para a etapa seguinte deste trabalho a utilização do ensaio APA D1, uma vez que ele inclui as condições de temperatura e exposição a umidade.

5 Referências

AKGÜL, M.; ÇAMLIBEL, O. Manufacture of medium density fiberboard (MDF) panels from rhododendron (R. ponticum L.) biomass. Building and Environment, Kidlington, v. 43, p. 438–443, 2008.

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE (ANSI). Particleboard ANSI A208.1-1999. Gaithersburg: Composite Panel Association, 1999. 7 p. (Table A).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM D 1037-12: Standard test methods for properties of wood-based fiber and particle panel materials. Philadelphia: ASTM International, 2006. 32 p.

_____. ASTM D 3878: Standard terminology for composite materials. Philadelphia: ASTM International, 2007.

BATTISTELLE, R. A. G.; MARCILIO, C.; LAHR, F. A. R. Emprego do bagaço da cana-de-açúcar (saccharum officinarum) e das folhas caulinares do bambu da espécie dendrocalamus giganteus na produção de chapas de partículas. Revista Minerva, São Carlos, v. 5, n. 3, p. 297-305, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14810-3: Chapas de madeira aglomerada. Parte 3: métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1999. 32 p.

DUNKY, M. Adhesives in wood industry. In: PIZZI. A.; MITTAL, K. L. (Eds.). Handbook of adhesive technology. New York: Marcel Dekker, 2003.

IWAKIRI, S. et al. Produção de painéis de madeira aglomerada de Grevillea robusta A. Cunn. ex R. Br. Revista Árvore, Viçosa, v. 28, p. 883-887, 2004.

KAJITA, H.; MUKUDAI, J.; YANO, H. Durability evaluation of particle boards by accelerating aging test. Wood Science and Technology, Heidelberg, v. 25, p. 239- 249, 1991.

KARLSSON, P.; MCNATT, J. D.; VERRILL, S. P. Vacuum-pressure soak plus ovendry as an accelerated-aging test for wood-based panel products. Forest Products Journal, Peachtree Corners, v. 46, p. 84-88, 1996.

KARTAL, S. N.; GREEN, F. Decay and termite resistance of medium density fiberboard (MDF) made from different wood species. International Biodeterioration & Biodegradation, London, v. 51, p. 29-35, 2003.

KOJIMA, Y.; NORITA, H.; SUZUKI, S. Evaluating the durability of wood-based panels using thickness swelling results from accelerated aging treatments. Forest Products Journal, Peachtree Corners, v. 59, p. 35-41, 2009.

KOJIMA, Y.; SUZUKI, S. Evaluating the durability of wood-based panels using internal bond strength results from accelerated aging treatments. Journal of Wood Science, Japan, v. 57, n. 1, p. 7-13, 2010.

LE DUIGOU, A.; DAVIES, P.; BALEY, C. Seawater ageing of flax/poly (lactic acid) biocomposites. Polymer Degradation and Stability, London, v. 94, n. 7, p. 1151-1162, 2009.

LIU, J. Y.; MCNATT, J. D. Thickness swelling and density variation in aspen flake-boards. Wood Science and Technology, Heidelberg, v. 25, p. 73-82, 1989.

MALONEY, T. M. The family of wood composite materials. Forest Products Journal, Peachtree Corners, v. 46, n. 2, p. 19-26, 1996.

McNatt, J. D.; LINK C. L. Analysis of ASTM D 1037 accelerated-aging test. Forest Products Journal, Peachtree Corners, v. 39, n. 10, p. 51-57, 1989.

NORITA, H.; KOJIMA, Y.; SUZUKI, S. The aging effects of water immersion treatments in wet-bending for standardized testing of wood panels. Journal of Wood Science, Japan, v. 54, p. 121-127, 2008.

OKKONEN, E. A.; RIVER, B. H. Outdoor aging of wood-based panels and correlation with laboratory aging: Part 2. Forest Products Journal, Peachtree Corners, v. 46, p. 68-74, 1996.

OLIVEIRA, A.M.F., LELIS, A.T DE, LEPAGE, E.S., LOPES, G.A.C., OLIVEIRA, L.C.S., CAÑEDO, M.D., MILANO, S. Agentes destruidores de madeira. In: Lepage, E.S. (ed.) Manual de Preservação de madeiras. Vol. 1. IPT, São Paulo. p.99-278. 1986.

RIVER, B. H. Outdoor aging of wood-based panels and correla-tions with laboratory aging. Forest Products Journal, Peachtree Corners, v. 44, p. 55-65, 1994.

SARTORI, D. L. et al. Painel em madeira de reflorestamento e chapas de partículas para instalações rurais. Floresta e Ambiente, Rio de Janeiro, v. 19, n. 2, p. 171-178, 2012.

TOMAK, E. D. et al. Effect of accelerated aging on some physicaland mechanical properties of bamboo. Wood Science and Technology, Heidelberg, v. 46, p. 905-918, 2012.

VILAPLANA, F.; STRÖMBERG, E.; KARLSSON, S. Environmental and resource aspects of sustainable biocomposites. Polymer Degradation and Stability, London, v. 95, n. 15, p. 2147-2161, 2010.

YANG, H. S. et al. Water absorption behavior and mechanical properties of lignocellulosic filler–polyolefin bio-composites. Composite Structures, London, v. 72, n. 4, p. 429-437, 2006.

ZHANG, M. et al. Manufacture and properties of high-performance oriented strand board composite using thin strands. Japan Wood Science, Japan, v. 44, p. 191-197, 1998.

Capítulo 3 - Influência da selagem de bordas nas propriedades físicas de inchamento em espessura e absorção de água em painéis particulados

Trabalho apresentado em Evento:

GARZÓN, N. et al. Influence of sealing of edges for physical properties of swell and water absorption in particleboards. In: AMAZON GREEN MATERIALS CONGRESS, 5., 2014, Manaus/AM. **Proceedings...** Manaus/AM, 2014.

RESUMO

O inchamento em espessura e absorção de água são propriedades físicas de grande importância na avaliação do processo de produção de painéis particulados. O incremento destas propriedades está relacionado a fatores como o fluxo de água que ocorre de forma superficial e lateral, a adição de agentes de compatibilização ou revestimento superficial para reduzir o inchamento, e o tipo de matriz. O objetivo deste estudo foi avaliar o uso da selagem de bordas para minimizar o efeito de borda nos corpos de prova; assim como avaliação do efeito do revestimento superficial utilizando resina poliuretana a base de óleo de mamona, para proteger contra a absorção de água pela superfície em painéis particulados comerciais de média densidade (MDP) e painéis não convencionais produzidos em laboratório, com partículas de bagaço de cana-de-açúcar (BCP). Corpos-de-prova foram preparados para determinar as propriedades físicas em função do tempo de imersão. As propriedades de inchamento em espessura e absorção de água foram determinadas através da avaliação da modificação da espessura e o ganho de peso messurado após 2 a 24 horas. Os corpos de prova de ambos os tipos de materiais foram testados com e sem revestimento de superfície e com e sem selamento lateral. Observou-se que os corpos com selagem lateral e revestimento superfícial mostraram valor mais baixo para a absorção de água em comparação com aqueles que não foram revestidos superficialmente. A adição de revestimento de superfície melhorou o valor obtido em 31,8% em relação às amostras que não foram revestidas na superficie e 57,1% em relação aos corpos sem qualquer proteção (superficie e lateral).

1 Introdução

Os painéis particulados são um importante segmento da indústria de derivados de madeira, especialmente na indústria de móveis. Esta produção e consumo aumenta a cada ano. O painel particulado é utilizado em diversas áreas e são adequados para aplicações não estruturais, como móveis e aplicações em interiores (KWON; AYRILMIS; HAN, 2013). As indústrias de painéis particulados e de fibras, no Brasil, utilizam preferencialmente cavacos de madeira de reflorestamento provenientes de *Pinus sp* e de algumas espécies de *Eucaliptus sp,* (IWAKIRI et al., 2004). Os paineis de

partículas de resíduos agroindustriais representam uma alternativa viável para atual produção de novos materiais devido ao aumento da produção agrícola no Brasil e, consequentemente, a geração de resíduos agro-industriais, um cenário favorável para o uso desses materiais na produção de painéis partículados. Entre os resíduos potenciais para uso, é possível destacar o bagaço de cana-de-açúcar, a casca da fibra de coco verde, a casca de amendoim, entre outros (GARZÓN et al., 2011; AKGÜL; CAMLIBEL, 2008; SARTORI et al., 2012; FIORELLI et al., 2012).

Os painéis particulados absorvem água e isto resulta em um aumento na sua espessura. Esse fenômeno indesejável é estimado pela medição de fatores como o inchamento em espessura e a absorção de água. Além destes fatores, a interação entre a água (umidade) e a madeira de partículas conduz ao desenvolvimento de estresse induzido higroscópico pelo inchaço, que causa a "separação" das partículas no interior do painel e, por consequencia, a falha da ligação entre as partículas de resina. (MEDVED; ANTONOVIC; JAMBREKOVIC, 2011). Os ensaios de inchamento em espessura fornecem informações sobre a ligação interna dos painéis após terem sido imersos em água (FIORELLI et al., 2012).

A selagem de borda foi aplicada baseando-se em alguns estudos que utilizam a selagem de bordas para ensaios envelhecimento acelerado (KOJIMA; SUZUKI, 2010a) e exposição natural (KOYIMA; SHIMODA; SUZUKI, 2011), onde um agente de proteção reveste as quatro bordas dos corpos-de-prova para evitar o excesso de inchamento devido ao contato com a água durante a exposição ao ambiente. Sekino, Sato e Koji (2014) relatam que ocorre uma maior deterioração da propriedade física de inchamento em espessura e da propriedade mecânica de adesão interna, nas bordas dos painéis e isto indicam a importância de se utilizar um protetor lateral para prevenir a penetração da água.

O objetivos deste estudo foram: (i) avaliar as propriedades físcas de inchamento em espessura e absorção de água em dois tipos de painéis particulados de densidade média: painéis alternativos de bagaço de cana-de-açúcar usando como adesivo a resina poliuretana a base de óleo de mamona e painéis de partículas de madeira comerciais (Medium Density Particleboard – MDP). (ii) Investigar o efeito da resina poliuretana bicomponente a base de óleo de mamona como revestimento superficial nas propriedades físicas. (iii) Avaliar o efeito da selagem lateral dos corpos de prova para efetuar os ensaios de inchamento e absorção, a fim de minimizar o efeito de borda que representa o 30% da superfície do corpo de prova e verificar o desempenho físico de cada um dos painéis (MDP e BCP) com e sem revestimento superficial.

2 Materiais e Métodos

2.1 Painéis de partículas não convencionais

Os painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar (BCP) com resina bicomponente a base de mamona foram produzidos em laboratório seguindo as recomendações estabelecidas por Maloney (1996) e adaptadas por Sartori et al. (2012). O bagaço de cana-de-açúcar foi coletado em duas usinas da região de Pirassununga-SP. O material foi peneirado em malha de 2 mm para retirar as partículas mais finas. Posteriormente, foi picado em um moinho de facas com peneira de 8 mm e seco em estufa (60 °C) até atingir umidade de equilíbrio de 12%. Como aglomerante de partículas do bagaço de cana-de-açúcar foi utilizada resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona, sendo seus componentes o poliol derivado do óleo vegetal e o isocianato polifuncional (catalisador), em uma proporção de 1 parte de poliol para 2 partes do catalisador, em 15% da massa das partículas. A resina e as partículas foram misturadas em um agitador planetário durante 3 minutos. Posteriormente, o material homogeneizado foi inserido em um molde (50x50 cm) e inserido em prensa termo-hidráulica a condições de 100°C e 5 MPa de pressão, por 10 minutos. O painel foi esquadrejado retirando as bordas para seu acabamento final. As características finais do painel são: Dimensões: 0,40 x 0,40 m, Espessura:12 mm, Densidade: 800 kg/m^3 Tipo de painel: Aglomerado convencional, Distribuição de partículas no painel: Homogenia e Método de prensagem: Convencional.

2.2 Painéis de madeira comercial (MDP)

Os painéis denominados MDP (Medium Density Particleboard) foi adquirido um painel comercial de 15x1830x2750 mm, sendo confeccionado com partículas de *Eucaliptus* sp e com resina de uréia-formaldeído.

2.3 Tratamento superficial e lateral dos corpos-de-prova

Para cada um dos tipos de painéis BCP e MDP foram cortados 40 corpos-de-prova de 0,025 x 0,025 m. A área superficial de um corpo-de-prova para o ensaio de inchamento em espessura e absorção de água é de 49%, a área lateral 51%em relação á área total do corpo-de-prova. Assim, durante a imersão na água o corpo de prova incrementa a carga de inchamento na espessura "Filler loading'" impedindo verificar a ação principal da água na superfície do material e o efeito dos revestimentos superficiais aplicados no material.

2.3.1 Tratamento superficial

A metade dos corpos-de-prova (20) de ambos os tipos de painéis foram tratados superficialmente com resina poliuretana à base de óleo de mamona, como revestimento externo, com o objetivo de ser avaliada como proteção superficial contra agentes de degradação (água e umidade) presentes no ensaio de propriedades físicas. Entretanto, foi necessário definir a proporção ideal dos componentes da resina para o tratamento superficial, assim como a metodologia de aplicação sobre a superfície do corpo-de-prova.

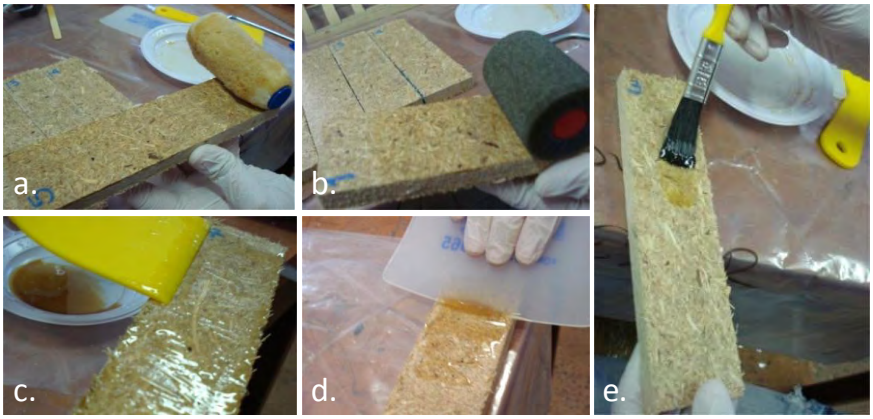
2.3.1.1 Determinação da proporção da resina para revestimento superficial

A proporção da resina foi definida realizando-se uma mistura dos componentes da resina bi-componente a base de óleo de mamona. As proporções poliol:catalisador em volume, foram 60:40; 70:30; 80:20; 90:10; 40:60; 30:70; 20:80; 10:90; 50:50. As proporções foram misturadas dentro de copos individuais e posteriormente após 24 horas de secagem foram avaliadas: a secagem total, presença mínima de bolhas na superfície, aparência visualmente uniforme em cada uma das amostras.

2.3.1.2 Metodologia de aplicação da resina como revestimento superficial

Foram avaliadas 6 metodologias manuais de aplicação de resina bicomponente de óleo de mamona, conforme ilustra a Figura 12a (Rolo de lã sintética), Figura 12b (Rolo de espuma), Figura 12c (Espátula rígida), Figura 12d (Espátula Suave) e Figura 12e (Pincel). A escolha da metodologia foi baseada em indicadores como: falta de uniformidade da resina, dificuldade de aplicação e presença de bolhas. Foi considerado como critério de escolha o tempo de aplicação manual, pois a resina tem um tempo de cura rápido, consequentemente apresenta-se um aumento da viscosidade com o passar do tempo.

Figura 12. Metodologias avaliadas para a aplicação revestimento superficial em painéis particulados a)Rolo de lã sintética b)Rolo de espuma c)Espátula rígida d)Espátula Suave e)Pincel

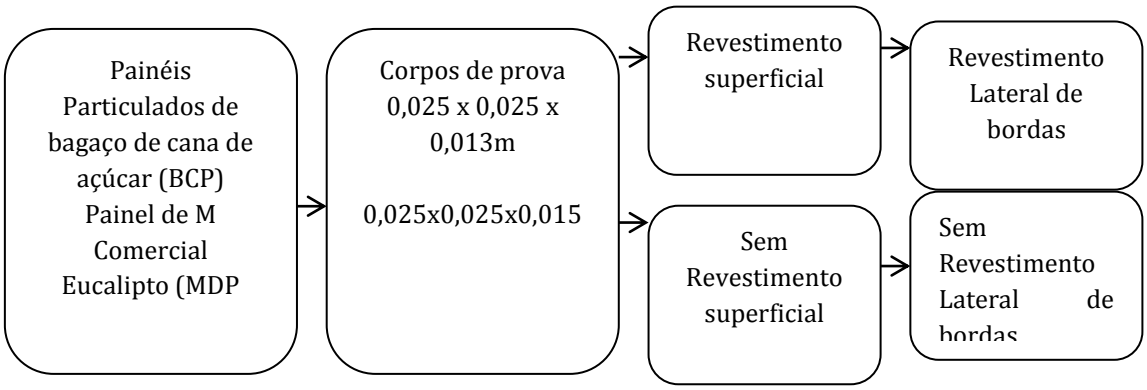


Fonte: Própria autoria.

2.3.2 Tratamento Lateral

Foi realizada a selagem das bordas para assegurar que a entrada de água ocorresse através da superfície em cada um dos quatro grupos de painéis MDP e BCP, com revestimento superficial (CR) e sem revestimento superficial (SR) durante os ensaios de inchamento e absorção de água. Os corpos-de-prova foram divididos em dois grupos, a metade recebeu tratamento lateral, que consistiu em aplicar a selagem das bordas. A Figura 13, indica o fluxograma adotado.

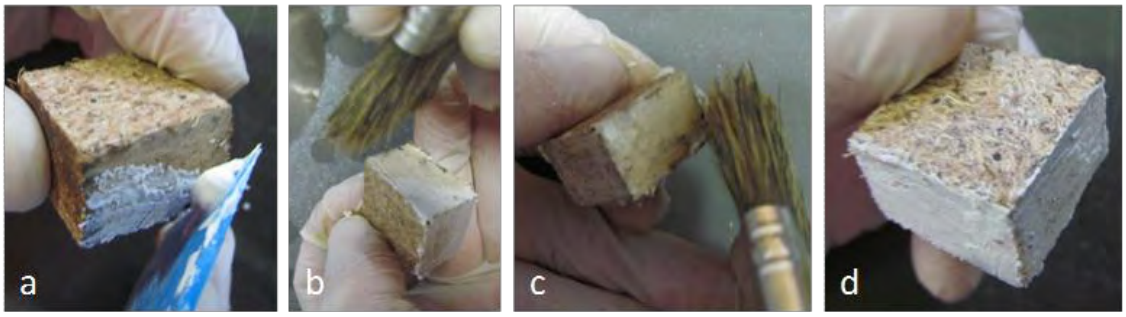
Figura 13. Fluxograma de definição do tratamento superficial e do tratamento lateral dos corpos de prova**.**



Fonte: Própria autoria.

As bordas dos corpos-de-prova foram revestidas com três diferentes componentes: (a) Resina a base de acrílico (massa para madeira); (b) seladora concentrada SM280 Suvinil e (c) verniz com duplo filtro solar marca Suvinil, para garantir que a entrada da água ocorra pelas superfícies (Figura 14).

Figura 14. Tratamento lateral nos corpos de prova i.e BCP a) Aplicação de resina acrílica para madeira, b) Aplicação de selante, c) Aplicação de verniz, d) Corpo-de-prova acondicionado para ensaio.



Fonte: Própria autoria.

2.3.3 Propriedades físicas de inchamento em espessura (IE) e absorção de água (AA)

Os ensaios das propriedades físicas de inchamento e absorção foram realizados com base na norma ABNT: NBR 14810-06. Dez (10) Corpos-de-prova de cada tipo de painel foram imersos em água durante 2 e 24 horas para avaliação através da mudança na espessura e no ganho de massa do material.

2.3.4 Delineamento estatístico

Os valores experimentais das propriedades físicas foram avaliados por meio de um tratamento estatístico descritivo com o objetivo de organizar e sumarizar os dados. As análises foram realizadas por meio do programa S.A.S, versão 9.3, com nível de significância 5%. Foram avaliados os efeitos dos tipos de painéis (BCPe MDP), do tempo de imersão (2 e 24h), revestimento superficial (CR e SR) e selagem da lateral das bordas (Sim e Não) sobre as propriedades físicas em ambos tipos de painéis. Diferenças significativas entre os valores médios dos tipos de painéis foram determinadas pelo teste de Fisher. Os efeitos principais para cada resposta (inchamento em espessura e absorção de água) são representados pelos nomes das próprias variáveis (indicados pelas letras A, B, C e D), como descritos a seguir(Tabela 17).

Tabela 17. Efeitos dos tratamentos analisados estatisticamente

Respostas	**Efeitos**					
	Principais				**Cruzados**	**Aninhados**
	Código	**Fonte de variação**	**Níveis**			
Inchamento e absorção	A	Materiais	BCP	MDP	AxC	A(B C)
	B	Revestimento Superficial	Com	Sem	BxC	AxB(C)
	C	Selagem lateral	Sim	Não	AxB	----
	D	Tempo (h)	2	24	AxBxC	----
					AxBxCxD	----

Fonte: Própria autoria.

Neste trabalho foi adotado o modelo estatístico conforme a Eq.4 para avaliar as propriedades físicas:

$$Yijk = \mu + ti + bj + eijk \qquad \text{(Eq. 4)}$$

Onde:
yij = valor observado para a variável resposta
μ = média de todas as observações;
Ti = efeito do tratamento i na parcela
Bj = efeito do bloco j no valor observado Yij;
eijk= erro experimental associado à observação yijk.

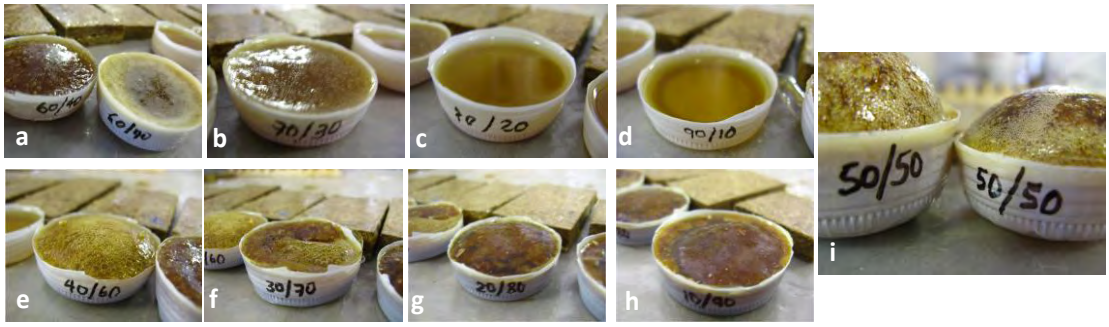
3 Resultados e discussão

3.1 Tratamento superficial

3.1.1 Determinação da proporção dos componentes da resina poliuretana a base de óleo de mamona

A Figura 15 apresenta as amostras realizadas para a obtenção da proporção (poliol:catalisador) dos componentes da resina a base de óleo de mamona. Após 24 horas a proporção que apresentou melhores características de secagem, presença mínima de bolhas na superfície e aparência visualmente uniforme, correspondeu à proporção 60:40 (poliol:catalisador) apresentada na Figura 15a.

Figura 15. Fotos que ilustram o ensaio para definição de proporção da resina de óleo de mamoma como revestimento superficial. Proporções poliol: catalisador em volume testadas: a) 60:40, b) 70:30, c) 80:20, d) 90:10, e)40:60, f) 30:70, g) 20:80, h)10:90, i) 50:50.



Fonte: Própria autoria.

Conforme os resultados obtidos, a proporção da resina definida para aplicação como revestimento superficial foi a que continha 40% pré-poliol (Catalizador) e 60% poliol, que apresentou um tempo de secagem total de 24 horas de acordo com as observações da Tabela 18.

Tabela 18. Determinação de proporção de resina como revestimento superficial

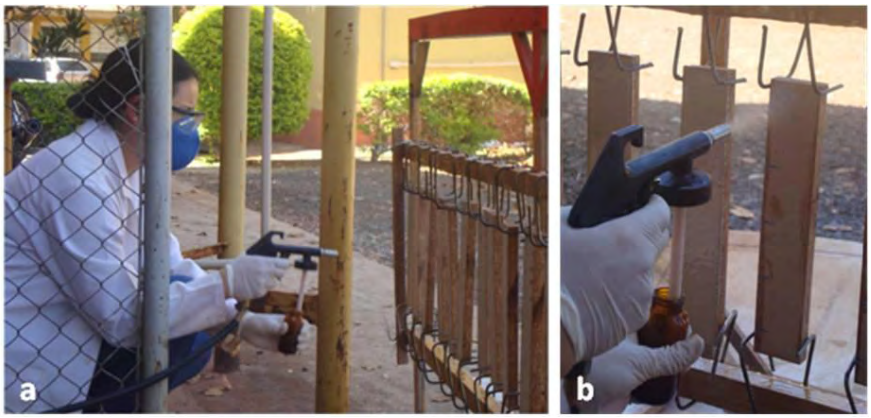
	Resina		Secagem 24 horas	Observações
	Poliol (%)	**Catalizador (%)**		
a	60	40	Sim	Secagem total e presencia mínima de bolhas na superfície.
b	70	30	Parcialmente	Com contato a resina não apresentou secagem total.
c	80	20	Não	NC*
d	90	10	Não	NC*
e	40	60	Sim	Presença de bolhas e ocorrência de estufamento
f	30	70	Sim	Distribuição não uniforme
g	20	80	Sim	Rigidez da resina
h	10	90	Sim	Distribuição não uniforme
i	50	50	Sim	Instabilidade da mistura

*NC: Nada Consta Fonte: Própria autoria.

3.1.2 Forma de aplicação da resina como revestimento superficial

Embora os corpos-de-prova revestidos superficialmente com resina usando pincel tenham apresentado o melhor aspecto exterior comparado às demais formas e ferramentas de aplicação manual, foi concebida uma outra metodologia de aplicação mais rápida e que garantisse mais uniformidade de resina na superfície visando a simulação de uma aplicação industrial. Para tanto, foi adotada a aplicação de resina com uma pistola de ar comprimido como mostra a Figura 16a e a Figura 16b. Para a montagem dos corpos-de-prova foi usado um sistema de gancho para permitir a aplicação do revestimento em toda a área superficial. Uma vez realizada a aplicação da resina os corpos-de-prova permaneceram em área coberta para secagem por 24 horas.

Figura 16. Aplicação da resina com pistola de ar comprimido a) montagem dos corpos de prova para aplicação revestimento e b) Aplicação de resina



Fonte: Própria autoria.

3.2 Propriedades físicas de inchamento em espessura e absorção de água

Os valores de inchamento e absorção de água das amostras em função do revestimento superficial e da borda lateral são apresentados na Tabela 19. Freire et al. (2011) avaliaram e compararam painéis de bagaço de cana–de-açúcar importados da China com painéis comerciais particulados de madeira de *Eucalyptus sp*. em mistura com madeira de *Pinus sp*., produzidos no Brasil, sendo ambos vendidos comercialmente. Cinco (5) corpos-de-prova de cada painel receberam uma camada de parafina nas laterais, os outros cinco na superfície. Os demais corpos de prova não receberam nenhuma obstrução com parafina. Cabe ressaltar que os autores não indicaram o tipo de resina usada como adesivo. Os resultados obtidos pelos autores para os corpos sem parafina lateral nos painéis de madeira para IE2h (8%) e IE24h (16%), similares aos encontrados no presente trabalho.

Para os painéis de bagaço de cana-de-açúcar IE2h(7%) e IE24h(11%), inferiores aos obtidos neste trabalho. Isto pode ser explicado possivelmente pela diferença na resina usada como adesivo. Segundo os autores a obstrução dos corpos-de-prova com parafina não resultou na diminuição da absorção de água, uma vez que a absorção total foi estatisticamente igual à absorção lateral após 2 horas de imersão, e inferior a ambas as absorções laterais e superficiais após 24 horas de imersão.

Tabela 19. Propriedades de Inchamento e Absorção de água

Material	**Revestimento Superficial**	**IE 2 h (%)**		**IE 24 h (%)**		**AA 2 h (%)**		**AA 24 h (%)**	
		Selagem Lateral							
		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
BCP	Sem	6	12	22	32	4	12	31	44
BCP	Com	2	9	9	21	1	8	20	34
MDP	Sem	3	7	14	17	4	17	42	54
MDP	Com	2	6	10	14	1	12	32	41
Erro Padrão	0,23								

Fonte: Própria autoria.

Para absorção de água os resultados da ANOVA apresentaram interação significativa (Tempo x Material x Selagem lateral) com (p valor <.0001) e (Revestimento superficial x Selagem lateral) com (p <.0001). A propriedade de absorção de água (%) para 2 horas para os dois tipos de painéis avaliados (MDP e BCP) apresentaram diferenças nos corpos-de-prova que foram selados lateralmente, os valores mostraram uma diminuição de 76,3% para os corpos-de-prova de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e 83,5% para o painel comercial MDP de partículas de madeira.

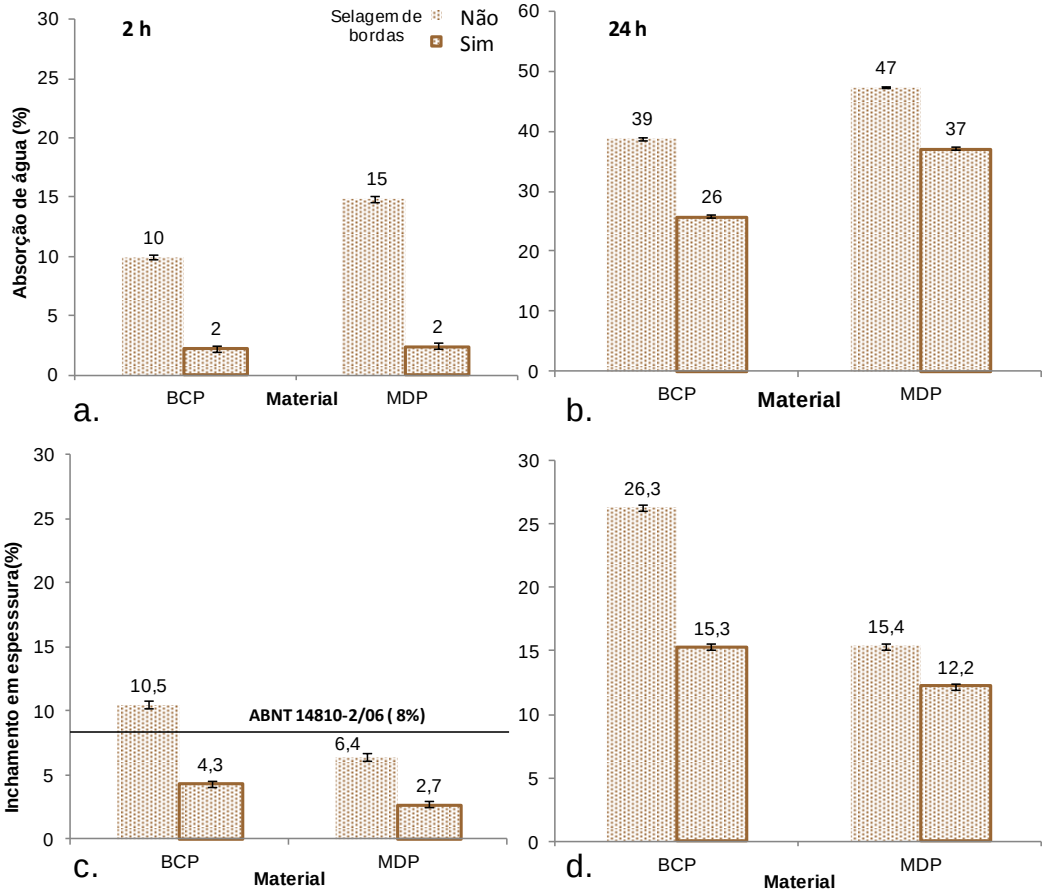
Analisando o efeito da borda nos dois tipos de painéis avaliados não foi encontrada diferença entre os valores de absorção de água para 2 horas nos corpos que tiveram selagem na borda, sendo que os corpos-de-prova de BCP apresentaram desempenho igual em relação ao painel referência MDP Figura 17a e Figura 17b. Os corpos-de-prova que foram selados lateralmente apresentaram média de 76,3% para os corpos-de-prova de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e 83,5% para o painel comercial MDP de partículas de madeira em relação aos corpos-de-prova que não tiveram selagem lateral.

Os valores obtidos para os painéis de bagaço de cana-de-açúcar (BCP) podem ser influenciados pela quantidade de açúcar que contêm, pois ela atua como uma substância hidrofílica (BARROS FILHO; MARIN; NOVACK, 2011). Contudo os corpos-de-prova dos painéis de bagaço de cana-de-açúcar que tem como adesivo a resina poliuretana a base de óleo de mamona mostrou-se superior frente aos do painel comercial de madeira MDP fabricado industrialmente com resina de ureia formaldeído. Segundo Kajita et al. (1991) a diferença de adesivos usados na fabricação de um painel exercem influencia nos resultados de Inchamento em espessura. Fiorelli et al. (2012) fabricaram e avaliaram painéis de fibra de coco utilizando resina a base de óleo de mamona (OM) e ureia formaldeído (UF) e encontraram valores de 80% (UF) e 38% (OM). Os autores atribuem esse fato à microestrutura formada entre as partículas e resina bicomponente a base de óleo de mamona a qual preenche os vazios entre as partículas.

Para inchamento em espessura os resultados da ANOVA indicaram interação significativa Tempo x Material x Selagem lateral com (p valor <.0001) e (Tempo x Revestimento superficial x Material) com (p <.0001). Para ambos os tipos de painéis avaliados, BCP e MDP, selados lateralmente, os corpos-de-prova apresentaram uma diminuição de 59% e de 57,8%, respectivamente, de inchamento em espessura para 2 h em relação aos sem selagem de borda como indica a Figura 17a. Os resultados obtidos indicam que o painel de partículas de bagaço de cana-de-açúcar não foram protegidos lateralmente, de acordo com as recomendações mínimas estabelecidas pelos documentos normativos ANSI A.208.1:1999, sendo considerados dentro da categoria **D** manufacturing home decking, ou seja, o painel poderia ser usado na construção de decks em habitações, além disso, o painel sem selagem de borda apresentou os mesmos requerimentos físicos estabelecidos para painéis de média densidade.

Adicionalmente, os resultados sugerem que os painéis com selagem na borda atendem a norma ABNT 14810:2006 que indica 8% o valor máximo de inchamento para painéis, como mostra a Figura 17c. Após o ensaio de inchamento por 24 h os corpos-de-prova protegidos lateralmente apresentaram 41,8% e 20,8% de diminuição, respectivamente para BCP e MDP, em relação aos corpos-de-prova que não foram protegidos, como mostra a Figura 17d.

Figura 17. Efeito do tempo x selagem lateral x material nas propriedades físicas para painéis BCP e MDP: Absorção de água % (a) 2 h (b)24 h. Inchamento em espessura (a) de 2 h e (b) de 24 h.



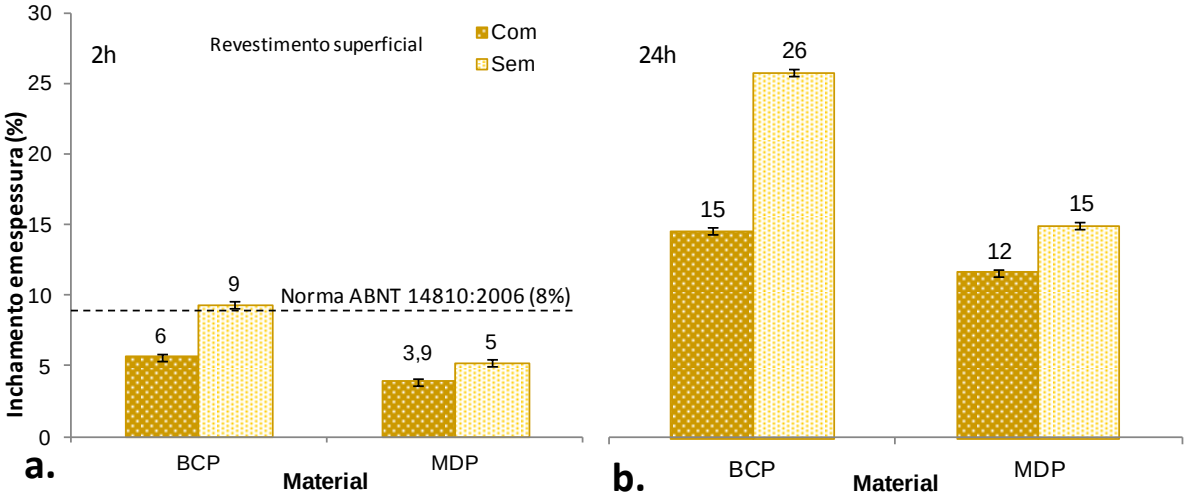
Fonte: Própria autoria.

Durante as primeiras 2 horas de ensaios os corpos-de-prova revestidos de ambos materiais apresentaram valores inferiores de inchamento em relação aos sem revestimento superficial, verificando o efeito da resina superficial como agente protetor contra a água. No caso dos painéis não revestidos, após as duas primeiras horas de ensaio, para os corpos-de-prova dos compósitos de BCP não conseguiram manter o inchamento dentro dos requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR 14810-2:2006 de 8% (Figura 18a).

Para os corpos-de-prova de MDP em relação aos não revestidos, apresentaram um melhoramento na porcentagem de inchamento de 40% e 25%. Após 24 h o efeito do revestimento foi mais sensível nos corpos-de-prova de BCP que tiveram uma redução de 43,3 % e 22,2% em relação ao MDP. Segundo Yang et al. (2006) o inchamento e a absorção de água aumentam em relação a fatores como: carregamento de água, a adição de agentes de compatibilização que diminuem o inchamento e o tipo de matriz polimérica. Neste trabalho, considerou-se que a aplicação de um revestimento

superficial é equivalente a adição de um agente compatibilizador com o material que poderia exercer uma proteção contra a absorção de água pela superfície, como mostra os resultados da Figura 18b.

Figura 18. Medias de Inchamento em espessura (%) para Tempo x Revestimento x Material em painéis BCP e MDP (a) 2 horas (b) 24 horas



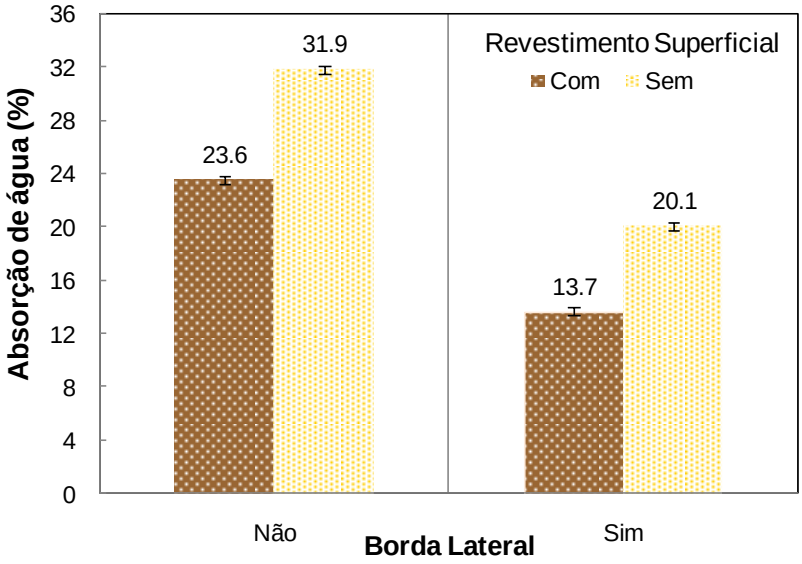
Fonte: Própria autoria.

O tamanho das partículas de bagaço é maior em comparação às partículas da camada externa do painel (MDP) e se os corpos são submetidos ao ensaio sem selagem natural a entrada da água vai ser pelas vias lateral e superficial, o que vai permitir a entrada de àgua. Uma vez que é colocada a selagem lateral em ambos painéis pode se observar que para as duas primeiras horas os dois materiais apresentam o mesmo comportamento indicando que embora as partículas do bagaço sendo maiores, a ligação realizada com a resina impede o ingresso da água assim como no MDP.

A partir das 24h a camada externa do MDP não consegue suportar a carga e as forças da água penetrando na camada interna onde as partículas são maiores, onde aumenta a área superficial. Isto segundo Iwaikiri et al. (2005) permite uma maior absorção de água, uma vez que cria uma área de contato maior, e uma menor disponibilidade da resina por partícula. A geometria da partícula incluindo a forma e o tamanho é um parâmetro importante que pode criar um impacto significativo sobre as propriedades dos painéis (FRYBORT et al., 2008; HASHIMA et al., 2010).

A Figura 19 mostra a análise realizada verificando o efeito de revestimento superficial e selagem lateral nos painéis para a propriedade de absorção de água (%). Observou-se que os materiais que tiveram selagem lateral e foram revestidos mostraram o menor percentual de absorção de água (%) comparados aos que não foram revestidos superficialmente. A adição do revestimento superficial melhorou os valores obtidos 31,8% em relação aos corpos que não foram revestidos superficialmente e 57,1% em relação aos que não tiveram nenhum tipo de proteção (superficial e lateral).

Figura 19. Médias de absorção de água (%) por revestimento superficial e a selagem da borda



Fonte: Própria autoria.

4 Considerações finais

- A selagem da borda mostrou-se como uma ferramenta de identificação e avaliação da adesão interna entre a resina aglomerante e as partículas em cada tipo de painel. De igual forma foi possível inferir sobre o efeito da geometria das partículas das camadas externas e internas, nos painéis de madeira multicamadas.

- A selagem lateral permitiu avaliar a superfície exposta do material à entrada da água pela superfície avaliando o efeito dos agentes de degradação. De igual forma permitiu avaliar o efeito da resina poliuretana a base de óleo de mamona como revestimento superficial.

5 Referências

AKGÜL, M.; ÇAMLIBEL, O. Manufacture of medium density fiberboard (MDF) panels from rhododendron (R. ponticum L.) biomass. **Building and Environment**, Kidlington, v. 43, n. 4, p. 438-443, 2008.

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE (ANSI). **Particleboard ANSI A208.1-1999**. Gaithersburg: Composite Panel Association, 1999. 7 p. (Table A).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14810-3**: Chapas de madeira aglomerada. Parte 3: métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1999. 32 p.

BARROS FILHO, R. M.; MARIN M. L.; NOVACK, K. M. Hybrid chipboard panels based on sugarcane bagasse, urea formaldehyde. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 33, n. 2, p. 369-373, 2011.

FIORELLI, J. et al. Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: an eco-efficient product. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 40, p. 69-75, 2012.

FRYBORT, S. et al. Cement bonded composites – a mechanical review. **BioResources**, Raleigh, v. 3, p. 602-26, 2008.

GARZÓN, N. et al. Durability evaluation of agro-industrial waste -based particle boards using accelerated aging cycling tests. **Key Engineering Materials**, Pfaffikon, v. 517, p. 628-634, 2011.

HASHIMA, R. et al. Effect of particle geometry on the properties of binderless particleboard manufactured from oil palm trunk. **Materials and Design**, London, v. 31, p. 4251-4257, 2010.

IWAKIRI, S. et al. Produção de painéis de madeira aglomerada de Grevillea robusta A. Cunn. ex R. Br. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, p. 883-887, 2005.

KOJIMA, Y.; SHIMODA, T.; SUZUKI, S. Evaluation of the weathering intensity of wood-based panels under outdoor exposure. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 57, p. 408-414, 2011.

KOJIMA, Y.; SUZUKI, S. Evaluation of wood-based panel durability using bending properties after accelerated aging treatments. **Journal of Wood Science**, Tokyo v. 57, p. 126-133, 2010a.

KWON, J. H.; AYRILMIS, N.; HAN, H. T. Enhancement of flexural properties and dimensional stability of rice husk particleboard using wood strands in face layers. **Composites Part B: Engineering**, Kidlington, v. 44, n. 1, p. 728-732, 2013.

MALONEY, T. M. The family of wood composite materials. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 46, n. 2, p. 19-26, 1996.

MEDVED, S.; ANTONOVIC, A.; JAMBREKOVIC, V. Impact of resin content on swelling pressure of three layer particleboard bonded with urea–formaldehyde adhesive. **Drvna Industrija**, Zagreb, v. 62, n. 1, p. 37-42, 2011.

SARTORI, D. L. et al. Painel em madeira de reflorestamento e chapas de partículas para instalações rurais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, p. 171-178, 2012.

SEKINO, N.; SATO, H.; KOJI, A. Evaluation of particleboard deterioration under outdoor exposure using several different types of weathering intensity. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 60, p. 141-151, 2014.

YANG, H. S. et al. Water absorption behavior and mechanical properties of lignocellulosic filler-polyolefin bio-composites. **Composite Structures**, London, v. 72, p. 429-437, 2006.

Capitulo 4 - Avaliação da durabilidade por ensaios de envelhecimento acelerado e intemperismo artificial em painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar e madeira.

Resumo

O presente trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho físico-mecânico e a durabilidade através de ensaios de envelhecimento acelerado, intemperismo artificial e crescimento de fungos de painéis de média densidade de partículas alternativos de bagaço de cana-de-açúcar com resina bicomponente á base de mamona (BCP), e compará-los com painéis de partículas de madeira comerciais (*Medium Density Particleboard* - MDP). Os desempenhos físico e mecânico dos painéis particulados foram analisados com base nas prescrições dos documentos normativos ABNT NBR 14810 (2006) e ANSI A208.1 (1999). Os painéis foram revestidos superficialmente com resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona. A avaliação das propriedades físico-mecânicas e mudanças de cor e brilho foram avaliadas antes e após os ensaios de envelhecimento. Imagens de microscopias eletrônicas mostraram a biodeterioração gerada nos ensaios realizados neste trabalho. A exposição aos ciclos de condensação, exposição à UV e aspersão de água conduziram à diminuição nas propriedades mecânicas de adesão interna, módulo de ruptura e módulo de elasticidade, dos painéis de BCP e à deterioração completa dos painéis comerciais de madeira MDP. A resina poliuretana a base de óleo de mamona, como material de recobrimento, se apresentou como um fator importante para manutenção das propriedades físico-mecânicas dos materiais testados. Adicionalmente, o melhor desempenho dos painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar sugere o potencial deste resíduo para fabricação de painéis, principalmente em áreas secas e em condições de baixa umidade quando utilizada a resina poliuretana a base de óleo de mamona como revestimento superficial.

Palavras chave: Intemperismo artificial, Durabilidade, cor, propriedades mecânicas, UV, resina, mamona.

1 Introdução

A durabilidade de um produto é a capacidade deste em resistir à perda de determinadas propriedades físicas, químicas e mecânicas ao longo do tempo de exposição. Ou seja, um produto durável é aquele que não mostra perda de propriedades durante a sua vida em serviço. A durabilidade da madeira, de adesivos, e compósitos podem se deteriorar a uma taxa determinada de acordo com os níveis de temperatura e de umidade, tensão, em alguns casos, por concentrações de certas substancias químicas e presença de microorganismos (VICK,1999; JOHNSTON, 2003).

O efeito do intemperismo na madeira tem sido atribuído aum conjunto complexo de reações induzidas por um número de fatores. Os fatores atmosféricos responsáveis pelas alterações na superfície da madeira são radiação solar (UV, visível e luz IR), umidade (orvalho, chuva, neve e umidade), temperatura e nível de oxigênio. Destes fatores, a energia dos fótons em radiação solar é o componente mais prejudicial do ambiente exterior e inicia uma grande variedade de modificações químicas em superfícies de madeira. Muitos dos fatores de biodeterioração têm surgido com a presença de poluentes atmosféricos, como dióxido de enxofre, dióxido de azoto e do ozono, na presença ou ausência de luz UV (FEIST; HON, 1984).

Estudos sob intemperismo artificial que avalia a influencia da luz UV têm sido aplicados em diferentes materiais tais como; painéis particulados (NASCIMENTO, 2003; BERTOLINI et al., 2013), compósitos de poliestireno de alto impacto (HIPS) reforçados com bagaço de cana-de-açúcar branqueado (BENINI et al., 2011), compósitos madeira – plástico (KAMDEM et al., 2004.; STARK; MATUANA, 2007.; GARCÍA et al., 2009; BUTYLINA et al., 2012.; PENG et al., 2014), poliuretanos termoplasticos (JANA;BHUNIA, 2008) e revestimentos de madeira (ALOUI et al., 2007), tintas para revestimento a base de água para madeira (CRISTEA et al., 2010), e resina poliuretana a base de óleo de mamona (ALMEIDA; FERREIRA. 2006). Nestes trabalhos foi constatado que existem diferenças significativas em propriedades físico e mecânicas dos materiais antes e após o ensaio de envelhecimento, assim como foram identificadas mudanças na superfície, tais como aparência e cor.

Os ensaios de envelhecimento acelerado avaliam as mudanças nas propriedades físico mecânicas dos materiais em curto tempo, quando comparados com ensaios de envelhecimento natural, por meio de exposição a diferentes condições de deterioração (JOHNSTON, 2003), tais como imersão em água, em ar quente e seco, secagem, sob vapor, congelamento, pressão em diferentes tempos e considerando as repetições por ciclos. Existem alguns métodos ou normas de envelhecimento acelerado, normalmente visando avaliar os materiais em condições climáticas específicas, como: Japanese Industrial Standard Wet-bending B test - JIS-B (NORITA et al 2008), ASTM 6-cycles - ASTM D1037 treatment (MCNATT;LINK, 1989; KAJITA et al., 1991; OKKONEN; RIVER, 1996; ZHANG et al., 2001; KARTAL; et al., 2012; TOMAK et al., 2012; GARZON et al., 2012; FIORELLI et al., 2014), APA D-1- American Plywood Association treatment V313, VPSD Vacuum Pressure Soaking and Drying treatment (KARLSSON et al., 1996; KOJIMA;SUZUKI, 2011; KOYIMA et al., 2011), European Standard 321 treatment (SASSONI et al., 2015; BUTYLINA et al., 2012). Existem vários trabalhos que utilizaram as normas mencionadas e relataram a redução nos valores de algumas propriedades fisico-mecânicas em compósitos particulados após os ensaios de envelhecimento acelerado.

Segundo Clausen e West (2005) são necessários métodos para avaliar a resistência a biodeterioração da madeira e de materiais compósitos em sistemas (*framing*) quano sujeitos ao crescimento de fungos e quando são acidentalmente expostos à chuva na

manufatura e instalação. Estudos tem se focado em analisar e conhecer os efeitos da temperatura e da umidade nas taxas de crescimento dos fungos emboloradores em ambientes particulares (YANG, 2008). Diferentes pesquisadores têm avaliado o grau de colonização de fungos emboloradores e manchadores em diferentes tipos de madeira e painéis: painéis tipo *strand* de bambu e resina fenólica tratados superficialmente (SUN, et al., 2010), madeira de *Pinus sylvestris* e *spruce* (*Picea abies*) (BOK et al., 2013; JOHANSSON; JERMER, 2010), painéis multicamada de madeira cedar , *tamarack* , *spruce* e *aspen* (YANG et al., 2007), painéis (OSB) com resina polifenolica, *plywood*, e painéis (MDF) de media densidade de Fibra (YANG, 2007).

Estudos sobre fabricação de painéis particulados de madeira e resíduos agroindustriais utilizando resina poliuretana a base de óleo de mamona estão sendo desenvolvido. Por exemplo, utilizando resíduos de espécies de reflorestamento (SARTÓRIO et al., 2013); resíduos de Pinus sp (BERTOLINI et al., 2013); bagaço de cana-de-açúcar (SARTORI et al., 2015; CASTRO et al., 2014); fibra de Coco (FIORELLI et al., 2012; FIORELLI et al., 2015;); sacas de cimento (CRAVOet al., 2015); casca de amendoim (GATANI et al., 2014; FIORELLI et al., 2014); eucalyptus (NASCIMENTO et al., 2013); madeira (Silva et al., 2013; ANÉRIS et al., 2013), fibras de sisal (CHRISTOFORO et al., 2013), eucalyptus grandis e casca de aveia (DONIZETI et al., 2013). Nestes trabalhos foi constatado o bom desempenho dos compósitos na sua utilização da resina poliuretana a base de óleo de mamona como adesivo. Além disso, Nascimento (2003), Almeida e Ferreira (2006)e BERTOLINI et al.(2013a)avaliaram compósitos com resina poliuretana a base de óleo de mamona sob intemperismo artificial (ensaio de envelhecimento acelerado) e mostraram que não ocorreram mudanças significativas nas propriedades do revestimento polimérico no período estudado.

O óleo de mamona ou óleo de rícino, conhecido internacionalmente como "*Castor Oil*" e é extraído de uma planta conhecida no Brasil como mamona ou caturra, é uma planta da família das Euforbiáceas e é abundantemente encontrada em regiões tropicais e subtropicais (SILVA et al., 2013). A partir do óleo de mamona é possível sintetizar poliois e pré-polímeros com diferentes características, quando misturados, originam poliuretanas. A mamona pode ser plantada em união com outras culturas ou "solteiro", ou seja, sem ser associado a outras culturas; o teor de óleo contido em cada planta é da ordem de 50%; requer pouco uso de produtos químicos, facilidade na colheita (não exige máquinas) e é resistente à seca (NASCIMENTO et al., 2013).

A resina poliuretana (PU) a base de mamona apresenta-se como um diferencial deste trabalho. Trata-se de uma tecnologia nacional, limpa, natural e renovável, possui vantagens como alta resistência a ação de água, alta resistência mecânica e a raios ultravioleta. O material pode ser manipulado em temperatura ambiente o que facilita a cura a frio (JESUS, 2000; SILVA; LAHR, 2008). Além disso, a utilização do PU proporciona a redução do consumo de energia na fabricação de painéis, devido ao uso de menores temperaturas durante a prensagem. (BERTOLINI et al., 2013b). Desse modo, o PU pode ser plenamente utilizada para substituir a resina à base de ureia-

formaldeído (UF), a mais utilizada atualmente para a fabricação de painéis particulados. Segundo Nascimento et al. (2013) a resina libera formaldeído na prensagem, o que ocasiona problemas ocupacionais decorrentes da exposição do trabalhador a esta substância pode provocar dificuldade respiratória, como a enfisema e, até mesmo, câncer nos pulmões quando inalado em altas concentrações. ao UF é o adesivo mais utilizado na produção de chapas aglomeradas que se destinam a ambientes internos. Sua coloração é branca, de aspecto leitoso e são muito usadas na produção de chapas aglomeradas de madeira. Adicionalmente, os adesivos a base de UF são preferidos devido ao baixo custo, facilidade de manuseio, cura rápida e são incolores, não conferindo uma cor indesejável à superfície do painel (VALARELLI et al., 2013).

Desse modo, neste trabalho propõe-se a estudar o aproveitamento de bagaço de cana-de-açúcar e a resina poliuretanas derivada de óleo de mamona como adesivo na confecção de painéis particulados homogêneos, assim como revestimento superficial desses painéis. Com este trabalho pretende contribuir para minimizar os problemas com os resíduos que poluem o meio ambiente e usar a resina natural a base de mamona.

Para tanto, o presente trabalho teve como finalidade avaliar os efeitos produzidos pela exposição a ensaios de envelhecimento acelerado (por ciclos e intemperismo artificial) e crescimento de fungos emboloradores fazendo uma comparação do desempenho físico e mecânico de painéis de bagaço de cana-de-açúcar fabricados com resina a base de óleo de mamona e painéis comerciais de partículas de madeira com ureia-formaldeído.

2 Materiais e Métodos

2.1 Painéis particulados

Os painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e resina bicomponente a base de mamona foram produzidos em escala de laboratório seguindo as recomendações estabelecidas por Maloney (1996) e adaptadas por Sartori et al. (2012). O processo iniciou-se com a coleta do bagaço de cana-de-açúcar em duas usinas da região de Pirassununga - SP. O material foi peneirado em malha de 2 mm para retirar as partículas mais finas. Posteriormente, foi picado em um moinho de facas com peneira de 8 mm e seco em estufa (60 °C) até atingir uma umidade de equilíbrio de 12%. Como aglomerante de partículas de bagaço de cana-de-açúcar foi utilizada resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona, sendo um dos componentes o poliol derivado do óleo vegetal, e o outro o isocianato polifuncional (catalizador), em uma proporção de 2 partes de catalizador para 1 de poliol. Foi utilizada 15% em massa de partículas de bagaço de cana-de-açúcar da massa total do painel. A resina e as partículas foram misturadas em um batedor planetário durante 3 minutos. Posteriormente, as partículas foram inseridas em um molde formador de painel (50 x

50 cm) e inserida em prensa termo-hidráulica a condições de 100°C e 5 MPa, por 10 minutos. O painel foi esquadrejado retirando as bordas para seu acabamento final. A espessura do painel foi em torno de 13 mm.

Foi adquirido o painel denominado comercial Medium Densiy Particleboard (MDP) indicado como MADEPAN CRU 15 x 1830 x 2750 mm, confeccionado com partículas de eucalipto, fabricado em processo de escala industrial com resina ureia-formaldeído, com espessura final de 15 mm.

2.2 Tratamentos lateral e superficial dos corpos-de-prova

O tratamento lateral consistiu em usar corpos-de-prova de 27 x 5 cm de BCP e MDP que por sua vez foram submetidos a uma selagem com massa acrílica das bordas, com objetivo de diminuir a entrada de água pelas laterais do corpo-de-prova, durante os ensaios de envelhecimento natural (Figura 20a). Com isso, foi possível controlar melhor absorção de água e avaliar a eficiência do tratamento superficial do topo e da base dos corpos-de-prova (KOJIMA; SUZUKI,2010), como apresentado na Figura 20b. Para o tratamento superficial, metade dos corpos-de-prova extraídos dos painéis comerciais (MDP) e não convencionais (BCP) foram revestidos superficialmente com resina poliuretana à base de óleo de mamona, que continha 40% pré-poliol (catalizador disocianato polifuncional 1,6-hexametileno disocianato (HDI) e 60% poliol (a base de óleo de mamona) fabricado pela empresa Plural Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda. Este tratamento teve como objetivo avaliar a eficiência da resina poliuretana como revestimento superficial para proteger painéis contra os agentes (água, umidade e temperatura) e aos seus respectivos mecanismos de degradação nos ensaios de envelhecimento. De igual maneira verificar a eficiência da resina de óleo de mamona como revestimento superficial. A resina foi aplicada utilizando uma pistola de ar comprimido. A Figura 20c, ilustra o procedimento adotado. Foram obtidos 4 grupos de corpos-de-prova BCP com revestimento BCPCR, BCP Sem revestimento BCPSR; MDP com revestimento MDPCR com revestimento e MDP sem revestimento superficial MDPSR, como exemplificado na Figura 20d.

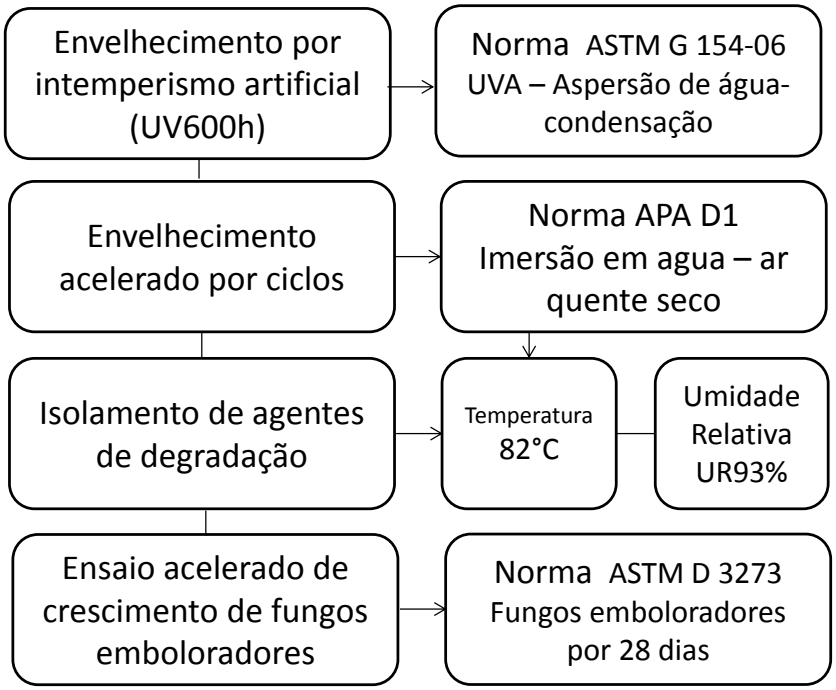
Figura 20. (a) Selagem de bordas com massa acrílica, (b) Aplicação de selante e aplicação de verniz marítimo. Resina poliuretana à base de óleo de mamona: c) Aplicação de resina com pistola de ar comprimido d) Corpos-de-prova BCP com revestimento.

Fonte: Própria autoria

2.3 Ensaios de envelhecimento acelerado

Foram realizados ensaios de envelhecimento acelerado baseados em algumas normas e os agentes de deterioração como se apresenta na Figura 21.

Figura 21. Ensaios de envelhecimento acelerado realizados em painéis de bagaço de cana-de-açúcar e painéis de madeira MDP.



Fonte: Própria autoria

2.3.1 Ensaio de envelhecimento por intemperismo artificial

O ensaio de envelhecimento artificial foi realizado para acelerar e identificar o processo de deterioração, perda de brilho, fragilização dos materiais, através da ação da irradiação numa câmara de envelhecimento UV EQUILAM modelo EQUV (Figura 22), que opera com lâmpada de xenônio de 6500 W, de acordo com a norma ASTM G 154-06 "Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials".

Figura 22. Câmara de envelhecimento UV EQUILAM modelo EQUV

Fonte: Própria autoria

Os corpos-de-prova foram submetidos a 600 horas de exposição, correspondente a 50 ciclos do ciclo 7 da norma ASTM G 154-06 (Tabela 20), que é utilizada para avaliar a resistência ao choque térmico e a erosão de revestimentos em materiais de madeira.

Tabela 20.Etapas de exposição no ciclo 7 para envelhecimento artificial por UV ASTM G 154-06.

Etapa	Ação	T (°C)	Tempo(h)
1	UVA-340	60±3	8
2	Aspersão de água		0,25
3	Condensação	50±3	3,75
Ciclo			12

Fonte: Própria autoria

2.3.2 Ensaios por ciclos de envelhecimento acelerado APA D1:1999

Os corpos-de-prova foram submetidos a seis ciclos de envelhecimento acelerado, tendo como variáveis a umidade relativa e a temperatura. Os equipamentos utilizados foram: banho térmico com circulação de água (Figura 23a), estufa com circulação de ar (Figura 23b) e câmara climática (Figura 23c). Antes do início dos testes, os corpos-de-prova foram armazenados por 48 ± 0,5 h à temperatura de 20 ± 5°C e umidade relativa de 65 ± 2%. Tabela 21 apresenta as condições de exposição do ensaio de envelhecimento.

Tabela 21. Condições de exposição no ensaio APA D1:1994

Método	Etapa	Temperatura(°C)	Tempo (h)
APA D 1 Ciclo	Imersão água	66	8
	Ar quente e seco	82	14,5
	Acondicionamento		1,5
Total			24

Fonte: Própria autoria

Figura 23. Etapas do ensaio APA D-1: a) Imersão em água, b) ar quente e seco e c) acondicionamento.

Fonte: Própria autoria

2.3.3 Exposição a agentes isolados de envelhecimento acelerado

A fim de determinar o efeito dos agentes de envelhecimento acelerado, os corpos-de-prova foram submetidos a duas exposições. Estas condições foram definidas a partir das condições estabelecidas na norma APA D1. Primeiramente a temperatura correspondeu exatamente a condição indicada pela norma APA D1 de tentar identificar a deterioração dos materiais causada pela exposição da água foi definida uma exposição a alta umidade conforme detalhado na Tabela 22.

Tabela 22.Condições de exposição aos agentes de degradação isolados.

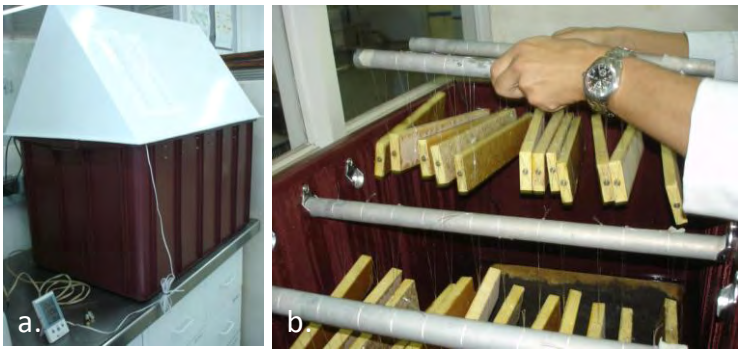
Condição 1 (UR93%)			Condição 2 (T82°C)		
Agente de degradação	**Valor**	**Tempo (h)**	**Agente de degradação**	**Valor**	**Tempo (h)**
Umidade relativa (%)	93	8	Temperatura (°C)	82	14,5
Acondicionamento	UR = 65% T = 20°C	1,5	Acondicionamento	UR = 65% T = 20°C	1,5

Fonte: Própria autoria

2.3.4 Ensaio acelerado decrescimento de fungos emboloradores

O ensaio e avaliação do grau de colonização dos fungos emboloradores, de acordo com norma ASTM D3273-12, foi realizado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - IPT, seguindo os seguintes procedimentos: Foram utilizados 6 corpos-de-prova por cada material (Figura 24a e Figura 24b). A norma estabelece uma dimensão de 7,5 x 10 cm, mas foram usados corpos-de-prova com dimensões de 27 x 5 cm, para facilitar a caracterização mecânica após do ensaio de biodeterioração. As espécies de fungos usadas foram *Aspergillus niger* (ATCC 6275), *Aureobasidium pullulans* (ATCC 9348) *e Penicillium citrinum* (ATCC 9849).

Figura 24. a) Câmara climática no ensaio de envelhecimento acelerado. b) Corpos-de-prova BCP e MDP sendo colocados na câmara climática.



Fonte: Própria autoria

2.4 Propriedades Físico-mecânicas

Após os ensaios de envelhecimento acelerado foi realizada a avaliação das propriedades físico-mecânica dos painéis particulados produzidos em laboratório (BCP) e em escala industrial (MDP). As dimensões dos corpos-de-prova foram 270 x 50 mm para determinar as seguintes propriedades: Modulo de Ruptura (MOR), Módulo de elasticidade (MOE) e Inchamento em espessura (IE). Corpos-de-prova com 50 x 50 mm foram utilizados para determinar adesão interna (AI) e densidade aparente (DA). Após os ensaios de envelhecimento os corpos-de-prova foram acondicionados a uma temperatura de (20 °C e 65% de umidade relativa), por uma semana. O equipamento utilizado os ensaios foi a máquina universal de ensaios mecânicos, modelo DL30000, marca EMIC, do Laboratório de Construções e Ambiência, do Departamento de Engenharia de Biossistemas, da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, da Universidade de São Paulo, Campus de Pirassununga, seguindo as recomendações da NBR 14810:2006. Os valores obtidos foram comparados com aqueles estabelecidos nos ensaios pelas normas NBR 14810:2006, NBR 14810:2013, ANSI A208.1 (1999), CS236-66 (1968) e EN 312 (2003), indicados na Tabela 23.

Tabela 23. Requisitos estabelecidos para chapas de partículas.

Normas	Tipo	Espessura da chapa (mm)	MOR (MPa)	MOE (GPa)	AI(MPa)	IE max (%)	DA(Kg/m^3)
14810:2 (2006)		8 a 13	18	NE	0,40	8	551-750
		14 a 20	16	NE	0,35	8	
14810:2 (2:2013)	P2	>6 a 13	11	1,8	0,40	18	
		>13 a 20	11	1,6	0,35	18	
	P3	>6 a 13	15	2,06	0,45	17	
		>13 a 20	14	1,95	0,45	14	
ANSI A208.1 (1999)	M 1	NE	11,0	2,25	0,40	8	640 a 800
	M 2	NE	14,5	2,75	0,45	NE	
	M 3	NE	16,5	1,73	0,55	NE	
CS236-66 (1968)	1	NE	11,2	2,5	0,42	30	600a 800
	2	NE	16,8	2,8	0,49	35	
EN 312 (2003)	P2*	>6 a 13	13	1,8	0,40	NE	
		>13 a 20	13	1,6	0,35	NE	
	P3*	>6 a 13	15	2,05	0,45	14	
		>13 a 20	14	1,95	0,45	14	
	P4*	>6 a 13	16	2,3	0,40	16	
		>13 a 20	15	2,3	0,35	15	
MOR: Módulo de Ruptura ; MOE:Módulo de Elasticidade; AI: Adesão Interna IE: Inchamento em espessura P2: Painéis não estruturais para uso interno em condições secas P3: Painéis não estruturais para condições úmidas. P2*: Painéis para uso inerno em condições secas P3*: Painéis não estruturais para condições úmidas. P4*: Painéis estruturais para uso em condições secas. NE: Não Especificado							

Fonte: Própria autoria

Após os ensaios de envelhecimento acelerado o inchamento em espessura foi medido e comparados com os valores obtidos antes da exposição. Para tanto, calculou-se o inchamento em espessura permanente de acordo com a Eq5. Onde IE_f é o valor final de inchamento em espessura e IE_i e o valor inicial.

$$IE\ permanente: \frac{IE_f - IE_i}{IE_i}\ x\ 100\%$$

Eq. 5

A porcentagem retida de cada propriedade mecânica (AI, MOE, MOR) após o envelhecimento, foi calculado de acordo com a Eq 6. Onde V_f é o valor final da propriedade após cada ensaio acelerado e V_i é o valor inicial da propriedade (DEL MENEZZI, 2008).

$$Retenção\ (\%) = \frac{V_f}{V_i}\ x100\%$$

Eq. 6

2.5 Análises de Cor e Brilho

A cor da superfície dos compósitos, envelhecidos e não envelhecidos, foi avaliada com um espectrofotômetro Minolta CM-2500D (Konika Minolta Sensing Inc., Japão). O sistema CIELAB-1976 é o mais utilizado para a quantificação e medição da cor. Esse sistema é baseado em três elementos a luminosidade ou claridade, a tonalidade ou matiz e saturação ou cromaticidade (CAMARGOS; GONÇALEZ 2001). Esses elementos são obtidos por meio dos parâmetros colorimétricos L*, a*, b*. Onde L* é variação de branco ao cinza (luminosidade), assume valor 0 para o preto absoluto, e 100 para o branco total e as coordenadas cromáticas a* que representa a variação do vermelho ao verde (+a*, -a*) e b* que representa a variação do amarelo ao azul (+b*, -b*).

Para mensurar as alterações na cor dos painéis BCP e MDP, após os tratamentos de envelhecimento acelerado, foi utilizada a metodologia adotada por diversos pesquisadores que trabalharam com madeira (BARRETO; PASTORE, 2009; SILVA et al., 2007; CAMARGOS;GONÇALEZ, 2001), compósitos de madeira e de plástico (BUTYLINA et al., 2012). Foi usada também a Eq. 7 para se determinar a diferença de cor, ΔE .

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \qquad \text{Eq. 7}$$

onde ΔL*, Δa* e Δb* representam as diferenças entre os valores iniciais e finais de L*, a* e b*.

2.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica capaz de produzir imagens de grande magnitude da superfície de uma amostra. Foram retiradas amostras com dimensões de aproximadamente 15 x 15 mm dos corpos-de-prova de ambos compósitos, após os ensaios de envelhecimento acelerado. As imagens de MEV foram obtidas em um microscópio da marca Hitachi e modelo Analytical Table Top Microscope TM3000, do laboratório multiusuários do Departamento de Engenharia de Alimentos, da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP).

2.7 Análise Estatística

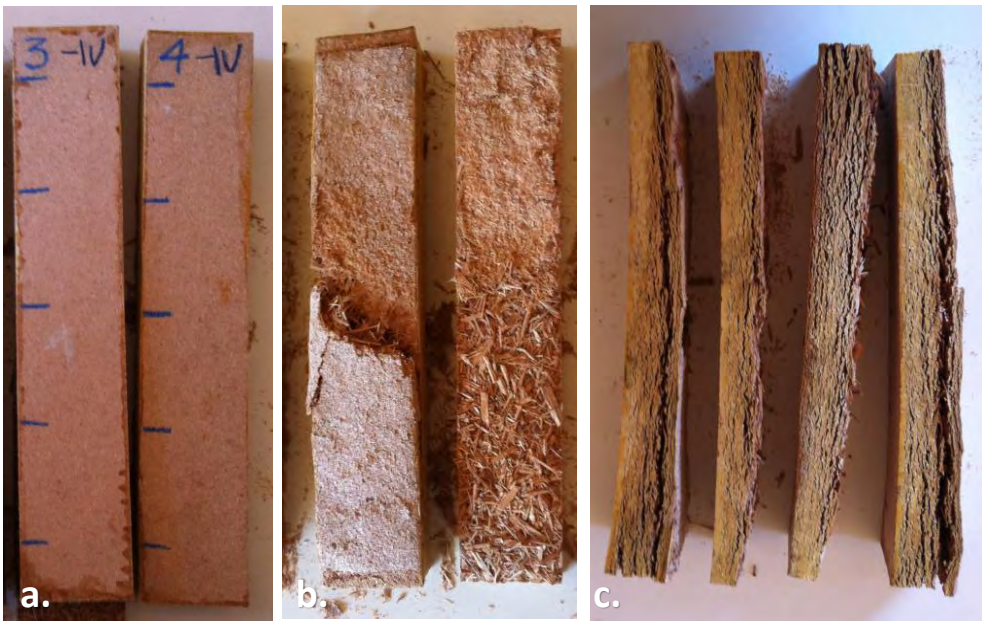
A possível heterogeneidade de variâncias nas diferentes condições de envelhecimento foi testada utilizando os Critérios de Informação de Akaike (AIC) e Bayesiano ou de Schwarz (BIC) utilizando o proc glimmix do SAS$^{(R)}$, em ajustes feitos com duas diferentes estruturas de covariâncias (VC: variance components e VC com group = Tempo) para condição de envelhecimento. Por estes critérios, o melhor modelo é aquele que apresenta o menor AIC (ou menor BIC).

3 Resultados e discussão

3.1 Envelhecimento por intemperismo artificial

Após o ensaio de intemperismo artificial foram observados efeitos significativos das condições de envelhecimento nos corpos-de-prova dos painéis comerciais MDP entre a face não exposta, Figura 25a, e face exposta, Figura 25b, que incluem danos na superfície, perda de partículas de madeira das camadas externas, delaminação nas bordas laterais, Figura 25c, indicando a alta deterioração deste material frente aos fatores de exposição aos que foram submetidos.

Figura 25. Corpos-de-prova MDPSR submetidos ao intemperismo artificial UV600h a) Face não exposta b) Face exposta c) Bordas laterais



Fonte: Própria autoria

Segundo Cristea et al. (2010) neste ensaio de exposição a radiação UV combinada com aspersão de água acelera o processo de erosão dos revestimentos. De acordo com Stark e Matuana (2007), a separação das partículas da madeira da matriz é provavelmente resultado do inchamento e do encolhimento que ocorre após a absorção e dessorção de umidade durante os ciclos de exposição.

No caso dos painéis de MDP multicamada a base de partículas de madeira *Eucaliptus sp*, o processo de erosão foi observado diretamente nas camadas exteriores. Por conta destes defeitos gerados no ensaio de intemperismo artificial não foi possível realizar a caracterização mecânica dos corpos-de-prova de MDP, e os resultados dos ensaios

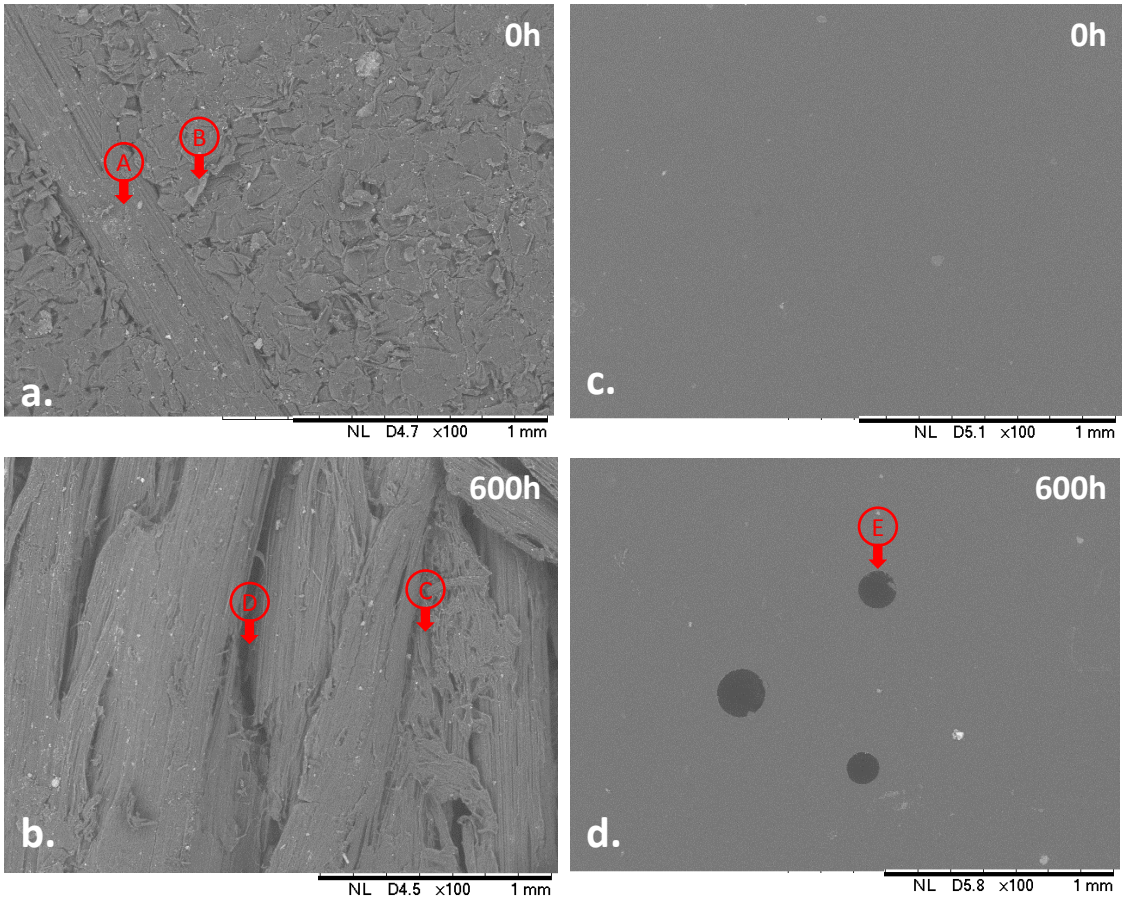
mecânicos apresentados são apenas dos compósitos BCP com e sem revestimento superficial.

Nos materiais sem revestimento pode se observar diferenças macroscópicas entre as condições iniciais e após o intemperismo artificial. A Figura 26a mostra as fibras de bagaço de cana-de-açúcar (Ponto A) e a resina poliuretana de óleo de mamona utilizada como adesivo criando uma ligação entre as partículas e cobrindo grande parte das fibras de bagaço (Ponto B).

Na Figura 26b após 600h de exposição os corpos-de-prova sem revestimento superficial apresentaram um maior dano nas fibras e, consequentemente, promovendo uma uniformidade superficial. No Ponto C também pode se observar a presença de vazios entre fibras devido à perda de resina, indicando uma diminuição de ligação interna (Ponto D).

Observe-se na Figura 26c que para os corpos-de-prova com revestimento BCPCR apresentam uma superfície uniforme. Após 600h foram observados danos superficiais gerados pela à ação da radiação UV, da temperatura e da água sobre a resina poliuretana a base de óleo de mamona. Com isso, surgiram algumas cavidades superficiais indicadas pelo ponto E (Figura 26d).

Figura 26. Imagens de microscopia eletrônica de varredura em painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar. BCPSR com e sem revestimento antes e depois do ensaio por intemperismo artificial UV600h. (a) BCPSR Antes (b) BCPSR Depois. (c) BCPCR Antes e (d) BCPCR Depois. Pontos A (Fibras), Ponto B(Resina poliuretana a base de óleo de mamona), Pontos C e D (Vazios e espações entre fibras e resina) e Ponto E (cavidades).



Fonte: Própria autoria

A Tabela 24 lista os valores iniciais, o erro padrão e as porcentagens de retenção para cada uma das propriedades avaliadas antes e após o ensaio por intemperismo artificial nos corpos-de-prova de BCP, com e sem revestimento.

Densidade Aparente: Os valores de densidade aparente após a exposição ao intemperismo artificial por 600 h, apresentaram efeito significativo da interação entre o tempo de exposição (0 h e 600h) e o revestimento superficial sobre a densidade aparente com p -valor < 0,0225. Na Tabela 24 observa-se, considerando-se a interação tempo de exposição e condição da superfície, que os corpos-de-prova com revestimento superficial não apresentaram diferença na densidade aparente em relação ao tempo de envelhecimento. Todavia, os corpos-de-prova envelhecidos sem revestimento superficial apresentaram uma diminuição no valor desta propriedade e tiveram uma retenção de 85%.

Inchamento em espessura: Os valores de inchamento em espessura, após a exposição ao intemperismo artificial por 600 h, apresentaram diferença estatística entre os corpos-de-prova de BCP, com revestimento e sem revestimento superficial (CR e SR), com p -valor < 0,0001. Encontrou-se que o uso de revestimento superficial nos corpos-de-prova proporciona menor porcentagem de inchamento (9%) em comparação com os materiais não revestidos superficialmente (27%). Este resultado está relacionado com o di-isocianato, um componente da resina de poliuretano a base de óleo de mamona que segundo Nascimento (2003), apresenta uma boa resistência à umidade. Entretanto os materiais sem revestimento após 600h apresentam espaços vazios nos, indicados na Figura 26b, podem ter contribuído para o ingresso de água no interior dos corpos-de-prova provocando um maior inchamento. Os valores de inchamento obtidos para os corpos-de-prova de BCPCR foram inferiores aos valores limites estabelecidos pelas normas 14810:2(2:2013), CS236-66 e EN312 (2003) indicados na Tabela 23.

Tabela 24. Propriedades Físico-mecânicas para corpos-de-prova de painéis de partícula de bagaço de cana-de-açúcar e resina poliuretana de óleo de mamona submetidos ao intemperismo artificial UV600h.

Propriedades	**Revestimento**	**Iniciais (0h) Média**		**UV (600h) Média**		**% Retido**	**CV(%)**
Densidade Aparente (DA) Kg/m³	Sem	849	A,a	724	B,b	85	
	Com	859	A,a	813	A,a	95	6
EP		16,6		16,6			
Inchamento em espessura (%)	Sem	N.A		27	A	N.A	
	Com	N.A		9	B	N.A	11
EP				4,2			
Modulo de ruptura (MPa)	Sem	17,9	A,a	6,1	B,b	34	
	Com	21,7	A,a	14,5	A,b	67	19
EP		1,2		1,2			
Modulo de elasticidade (GPa)	Sem	2,1	A,a	0,28	B,b	19	
	Com	2,1	A,a	1,14	A,b	34	19
EP		0,1		0,1			
Adesão Interna (MPa)	Sem	1,0	A,a	0,4	B,b	38	
	Com	1,0	A,a	0,7	A,b	77	18
EP		0,05		0,05			

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (minúscula) na mesma coluna (linha) não diferem estatisticamente entre si pelo teste F (p valor > 0,05). EP: Erro Padrão CV: Coeficiente de variação. N.A: Não Aplica

Adesão Interna (AI), Módulo de Elasticidade (MOE) e Módulo de Ruptura (MOR): Os valores de AI, MOE e MOR após a exposição ao intemperismo artificial por 600 h, apresentaram interação entre o tempo de exposição (0 h e 600h) e o revestimento nos corpos-de-prova de BCP com revestimento e sem revestimento superficial (CR e SR) com p -valor < 0,0001 para AI; p -valor de 0,042 para MOR e p –valor de 0,0023) para MOE, todos ao nível de significância $\alpha = 0,05$.

Os valores iniciais obtidos para as propriedades mecânicas em ambos os materiais, com e sem revestimento, cumprem com os requisitos estabelecidos pelas normas citadas na Tabela 23. O valor retido de AI para BCPCR foi de 77% e BCPSR foi de 38% para MOE - BCPCR foi de 34% e BCPSR foi de 19% e para MOR- BCPCR foi de 67% e BCPSR foi de 34%. Segundo Andrady et al. (1998) uma grande variedade de polímeros sintéticos e naturais absorvem a radiação ultravioleta originando reações fotolíticas e foto-oxidativas, as quais podem ocasionar nos materiais mudanças na coloração da superfície e perda no desempenho mecânico. Entretanto, os corpos-de-prova com revestimento apresentaram uma porcentagem de retenção superior das propriedades em relação aos corpos sem revestimento.

Peng et al. (2014) analisaram a influência do intemperismo artificial em compósitos fabricados com 60% de polipropileno e reforçados com 40% serragem de madeira, diferentes teores de lignina (0,1; 0,2; 0,30%) e celulose (0,1; 0,2; 0,3; 0,40%), corpos de prova foram expostos a um total de 960 h, considerando o ciclo 6 da norma ASTM G 154-06(8 h UV a 60 °C seguido de 4 h de condensação a 50°C). Os compósitos reforçados com 40% de serragem de madeira apresentaram uma porcentagem de retenção das propriedades mecânicas de 57% para o MOE e 90,9% para o MOR.

Bertolini et al. (2013b) avaliaram painéis homogêneos empregando resíduos de *pinus sp* tratados com conservante CCB (sais de cromo, cobre e boro) e resina poliuretana à base de mamona. Os corpos-de-prova forma submetidos a 1200 h considerando o ciclo 6 da norma ASTM G 154-06 . Os pesquisadores verificaram que os valores das propriedades de MOR e de MOE aumentaram em função do envelhecimento, o que pode ser explicado por uma possível plastificação da resina das amostras em função da temperatura e do tempo de exposição. Entretanto, os pesquisadores indicam que um tempo maior de exposição pode ocasionar uma degradação da resina e, possivelmente, redução nas propriedades.

3.2 Ensaios por envelhecimento acelerado e biodeterioração

A continuação são apresentados os resultados obtidos após os ensaios acelerados APA D1, UR93, T82, ASTMD3273-12.

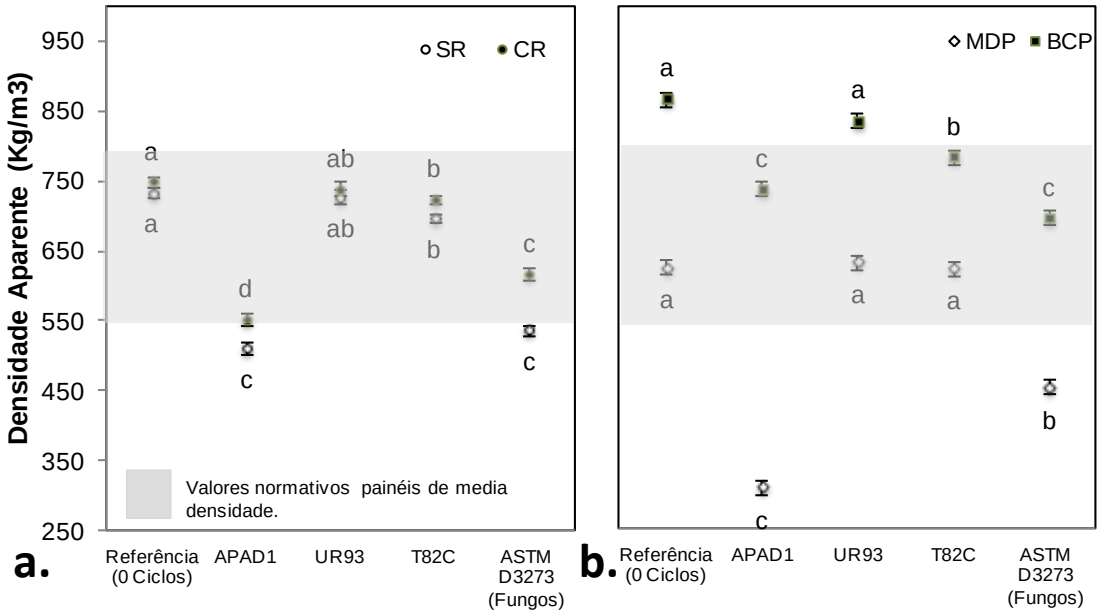
3.2.1 Propriedades físicas

Densidade Aparente: Os valores de densidade aparente após as diferentes condições de envelhecimento acelerado (Referência (sem envelhecimento), APA D1, UR93, T82, ASTMD3273) apresentaram duas interações entre materiais (BCP, MDP) vs. condições de envelhecimento acelerado com p -valor < 0,0001) e entre o revestimento superficial (CR e SR) vs. condições de envelhecimento acelerado com p -valor < 0,0003.

A Figura 27 apresenta os valores médios obtidos para a densidade aparente após o ensaio de envelhecimento acelerado (APA D1) e as duas condições de degradação (UR = 93% e T = 82 °C) e o ensaio de biodeterioração pela norma ASTMD 3273. Os resultados indicam que ambos os materiais (BCP, MDP) com revestimento superficial (CR) conseguem manter a densidade aparente. A densidade aparente para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de envelhecimento acelerado (APA D1) e ASTMD 3273 apresentaram valores inferiores aos estipulados pelas normas para painéis de media densidade. O ensaio acelerado APA D1 se apresenta como o ensaio mais agressivo frente à diminuição do desempenho dos materiais (Figura 27a).

As condições de exposição isoladas de umidade (UR = 93%) e temperatura (T = 82 °C), não apresentaram diferença estatística entre elas. No entanto, com análise levando-se em consideração apenas a condição de temperatura (T = 82°C) apresentou diferença entre os corpos-de-prova sem envelhecimento. Segundo (GUNDUZ ; AYDEMIR; KARAKAS; 2009), as propriedades químicas e físicas da madeira sofrem mudanças permanentes durante o seu aquecimento principalmente em razão da degradação da hemicelulose e, consequentemente, a sua estrutura é alterada. As mudanças continuam à medida que a temperatura é incrementada durante os processos de aquecimento. Como resultado disso, a espessura diminui devido à redução do conteúdo de umidade, assim como a densidade. Araújo (1992) avaliou características de várias composições de resinas poliuretanas a base de óleo de mamona em relação à estabilidade térmica Por meio de uma análise termogravimétrica, constatou-se que a estabilidade térmica desta resina é até 220°C, quando ocorre uma pequena perda de massa.

Figura 27. Médias de densidade aparente. (a) revestimento x condições de envelhecimento acelerado. (b) material x condições de envelhecimento acelerado. Sem revestimento superficial (SR) com revestimento superficial (CR).



Fonte: Própria autoria

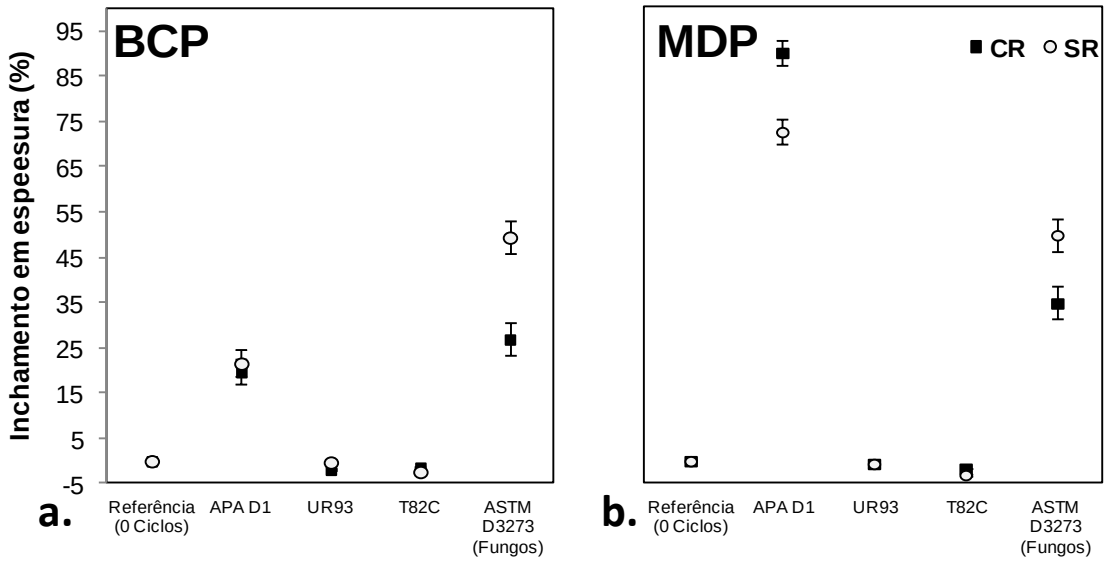
No ensaio de envelhecimento acelerado APA D1, os compósitos convencionais MDP de madeira e resina de ureia-formaldeído apresentaram uma diminuição nos valores de densidade aparente em relação aos corpos-de-prova de BCP. Isso pode ser explicado pelo inchamento em espessura e perda de massa que os compósitos tiveram durante as condições de estresse a que foram submetidos. Pode-se observar que as condições de altas temperaturas de (82°C com a umidade relativa de (66%) no ensaio APA D1, gerou uma diminuição da densidade aparente principalmente para o caso do painel comercial gerada possivelmente pelo aumento da espessura e perda de adesão das partículas de madeira (Figura 27b).

Inchamento em espessura: Os valores de inchamento em espessura após as diferentes condições de envelhecimento acelerado (referência (sem envelhecimento), APA D1, UR93, T82, ASTMD 3273) apresentaram interação tripla entre materiais (BCP, MDP) vs. revestimento superficial (CR e SR) vs. condições de envelhecimento acelerado com p valor 0,0016.

A Figura 28 apresenta os valores de inchamento em espessura em ambos os materiais após as diferentes condições de envelhecimento acelerado. O uso do revestimento superficial nos corpos-de-prova de BCP promoveu diferença estatística em relação aos corpos revestidos para o ensaio de biodeterioração de fungos (ASTMD 3273).

Os corpos-de-prova com revestimento apresentaram menor porcentagem de inchamento. Isto pode ser explicado pela resina poliuretana de óleo de mamona se apresentou como um agente de proteção (Figura 28a). Nas outras condições de envelhecimento pode se observar que os corpos-de-prova sem revestimento superficial conseguiram atingir os mesmos valores de inchamento dos corpos revestidos. Yang et al. (2006) avaliaram painéis particulados comerciais de madeira imersos em agua durante 400 h. Os autores indicaram que o inchamento em espessura e a absorção de água foram influenciados pelo fluxo de água que exerce a água no compósito. De igual forma foi observado que o desempenho mecânico dos compósitos diminuiu com o aumento da carga de enchimento e com o tempo de imersão dos corpos-de-prova. Os painéis comerciais MDP uma vez submetidos ao ensaio APA D1 apresentaram aumento nos valores de inchamento em espessura (Figura 28b).

Figura 28. Inchamento em espessura após ensaios de envelhecimento Acelerado nos materiais (a) BCP e (b) MDP. Sem revestimento superficial (SR) com revestimento superficial (CR).

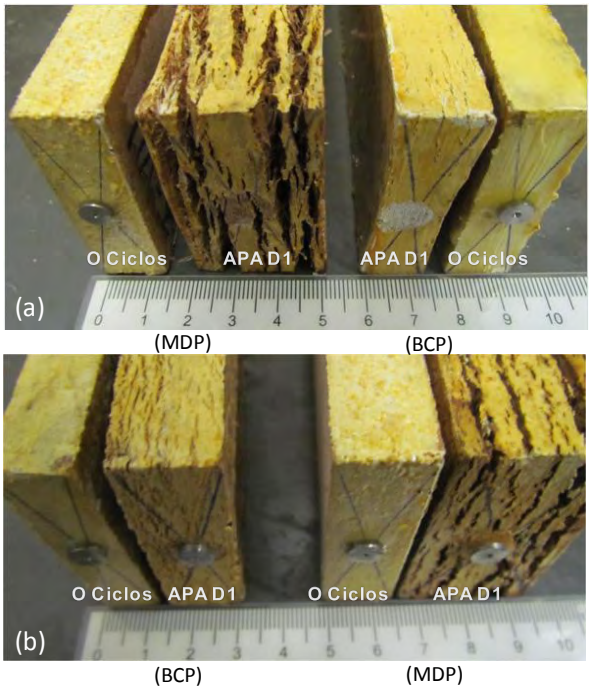


Fonte: Própria autoria

Os efeitos causados pelo ensaio de envelhecimento acelerado APA D1 são apresentados na Figura 29a. A imersão em água causou aumento no inchamento na espessura, ganho de peso e aumento da umidade. A exposição ao ar seco na segunda etapa causou danos nas bordas laterais indicados pela delaminação dos corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova revestidos apresentaram um comportamento singular em relação à falta de aderência entre as camadas externas e internas (Figura 29b). Isto pode ser explicado pela diferença existente entre a granulometria das partículas das camadas, a configuração no processo de prensagem das camadas. Embora, segundo Petrič, et al. (2007), a umidade excessiva possa trazer consequências na estabilidade dimensional do material e no desenvolvimento de tensões entre a interface da madeira e o revestimento superficial

Figura 29. Corpos-de-prova de MDP e BCP. (a) Sem revestimento superficial e (b) Com revestimento superficial. Referência é igual 0 ciclos.



Fonte: Própria autoria

De acordo com Yang et al. (2006) os materiais lignocelulósicos são compostos por materiais poliméricos naturais possuindo muitos grupos -OH, que são capazes de se combinar com as moléculas de água. Quando um compósito contendo material lignocelulósico é utilizado em zonas úmidas, o composto absorve água. Entretanto para ambos os compósitos, MDP e BCP, constituidos por matérias lignocelulósicos e resina (ureia formaldeído e resina poliuretana a base de óleo de mamona, respectivamente) o grau de hidroficilidade se torna um fator muito importante no desempenho do material. Vale ressaltar que estudos de Silva e Lahr (2008) e Bertolini (2011) indicam a alta resistência à absorção de água pela resina poliuretana à base de mamona.

MIYAMOTO et al. (2002) avaliaram diferentes geometrias de partículas e observaram que a expansão linear das chapas a 40°C e 90% de umidade relativa foi afetada pela geometria de partículas, como também, observaram que nas chapas de partículas menores apresentaram uma maior expansão linear. Os pesquisadores indicaram que o inchamento em espessura após 10 ciclos de envelhecimento acelerado VPSD (Vácuo – pressão de 290kPa, imersão, secagem a 60°C) em painéis particulados de madeira aumenta com o aumento do tamanho da partícula.

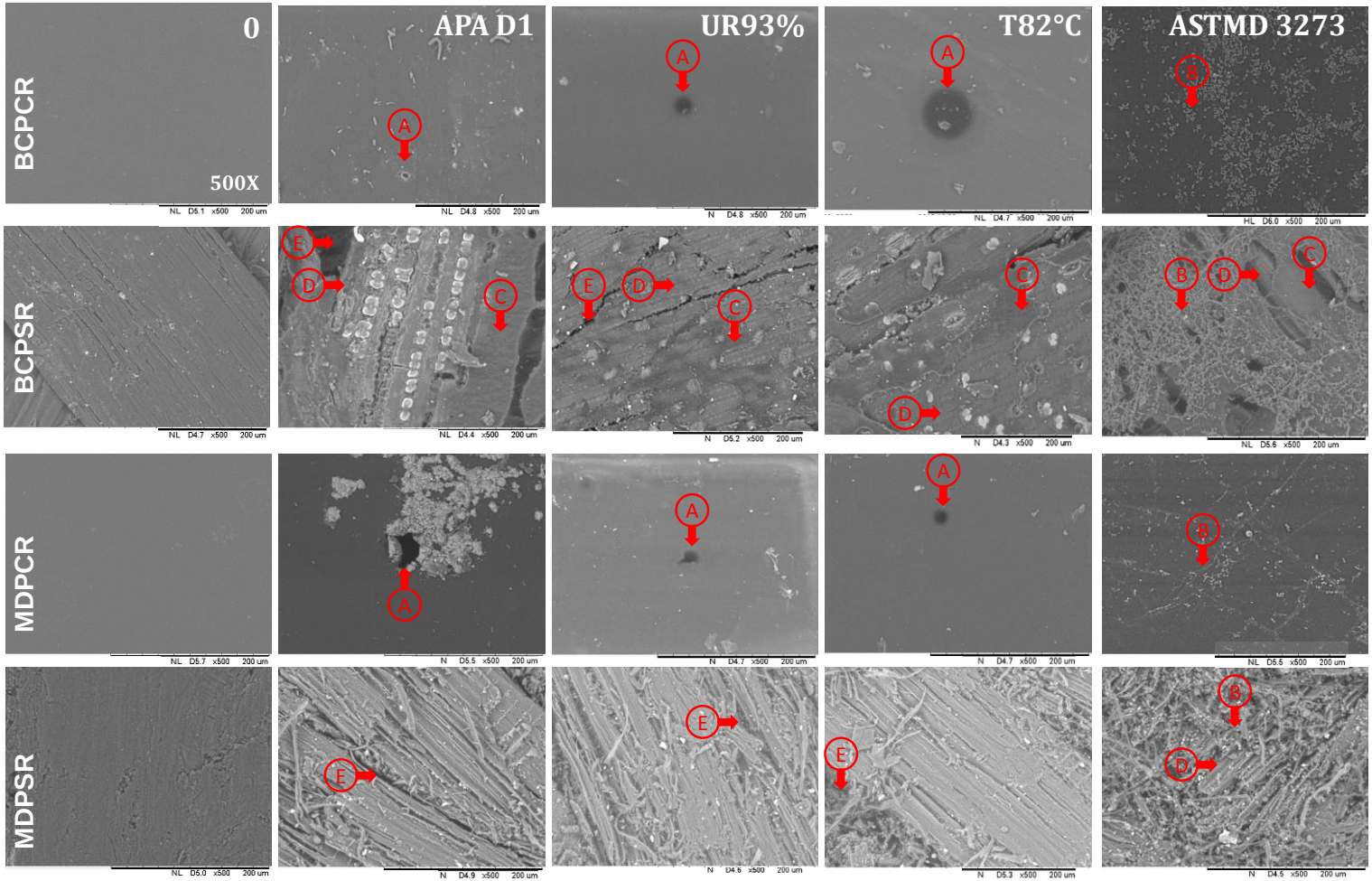
A Figura 30 apresenta micrografias da superfície de ambos os materiais, BCP e MDP, com e sem revestimento superficial (CR e SR), após a exposição nas diferentes

condições de envelhecimento acelerado, agentes de degradação e de biodeterioração por fungos (APA D1, UR93, T82, ASTMD 3273). Observou-se que para os materiais com revestimento sujeitos a exposição de degradação em três condições, conforme a norma APA D1, com UR = 93 e T = 82 °C, os danos superficiais apresentam como cavidades, ilustradas nos pontos A. No ensaio ASTMD 3273-12 o dano foi identificado como a colonização dos fungos emboloradores ilustrados nos pontos B.

Nos materiais sem revestimento pode-se observar diferenças entre os os diferentes ensaios de deterioração tratamentos. Os materiais sem revestimento apresentaram um maior dano superficial. Os pontos C apresentam parte da resina residual após as condições de degradação as quais deixam visíveis as fibras de bagaço de cana-de-açúcar para BCPSR e de madeira MDPSR indicadas pelos pontos D. Após os ensaios de envelhecimento foi identificada uma perda da resina e uniformidade superficial dos corpos-de-prova, desagregação as partículas e presença de vazios e espaços entre as fibras (Pontos E) indicando sua falta de aderência entre elas e a resina o que pode ter influência nas propriedades mecânicas avaliadas neste trabalho.

Mudanças na estabilidade dimensional como consequência da moagem e secagem do material resultam em tensões superficiais causando deformações (DROCHYTKA & PETRÁNEK, 2007) pode se apresentar uma perda de fibras superficiais conduzindo á uma erosão superficial. Isto pode ser observado na Figura 30para os ambos os materiais sem revestimento após o ensaio acelerado APA D1. Os compósitos derivados da madeira são particularmente susceptíveis a mudanças dimensionais causadas pela água (EVANS , 2013).

Figura 30. Imagens de microscopia eletrônica de varredura de superfícies de painéis particulados após ensaios de envelhecimento acelerado.



3.3 Propriedades Mecânicas

Constatou-se efeito significativo da interaçã tripla entre os níveis dos fatores material, revestimento e condições de envelhecimento acelerado) sobre a adesão interna (AI) em ambos os materiais Ou seja, essa resposta (AI) depende da combinação entre esses fatores mencionados acima. Para a propriedade de adesão interna (AI) não foi considerada a condição de envelhecimento acelerado de acordo com a norma ASTMD 3273, porque os fungos na superfície dificultaram a colagem dos dispositivos de tração perpendicular.. Este resultado mostra que as variáveis analisadas não atuam independentemente e que as condições de envelhecimento acelerado a que foram submetidas os materiais influenciaram as propriedades mecânicas.

Entretanto, o MOR e MOE são dependentes dos efeitos combinados entre os fatores: material e condições de envelhecimento acelerado. Adicionalmente, as análises estatísticas indicaram que há uma diferença significativa dos valores de MOR e de MOE entre os corpos-de-prova com e sem revestimento superficial, independentemente do tipo de material e das condições de envelhecimento acelerado. Para as propriedades mecânicas de MOE, MOR foram encontradas interações significativas para as duas fontes de variação: tipo de material (BDP/MDP) vs. condições de envelhecimento acelerado (referência -sem envelhecimento), APA D1, UR93, T82, ASTMD 3273). A Tabela 25 lista os valores antes e após os ensaios de envelhecimento, o erro padrão e as porcentagens de retenção para cada uma das propriedades avaliadas.

Tabela 25. Valores médios e os retidos das propriedades mecânicas para painéis particulados antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado

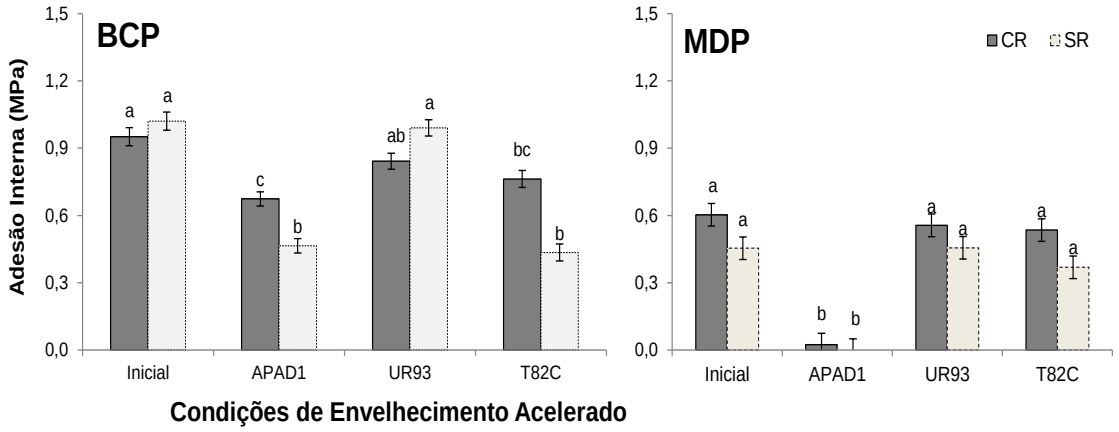
			Referência (0 Ciclos)	**APA D1 (Env Acelerado)**		**UR93**		**T82C**		**ASTM D3273 (Fungos)**	
Propriedade	**Material**	**Revestimento**	MPa	MPa	%Retido	MPa	%Retido	MPa	%Retido	MPa	%Retido
Módulo de ruptura (MOR)	BCP	SR	17,9	15,6	87	16,9	94	19,3	100	4,2	23
	BCP	CR	21,7	19,5	90	22,0	100	21,2	98	7,7	36
	MDP	SR	15,6	0,5	3	15,8	100	16,3	100	1,4	9
	MDP	CR	20,6	0,4	2	18,4	90	19,6	95	3,6	17
Erro Padrão			1,16	0,78		1,45		1,19		0,30	
Módulo de elasticidade (MOE)	BCP	SR	2,1	1,2	59	2,0	95	1,9	92	0,3	15
	BCP	CR	2,1	1,6	73	2,3	100	2,2	100	0,7	31
	MDP	SR	2,5	0,0	2	2,5	100	2,6	101	0,2	8
	MDP	CR	2,7	0,0	1	2,6	97	2,8	103	0,5	18
Erro Padrão			0,10	0,09		0,10		0,09		0,03	
Adesão Interna (AI)	BCP	SR	1,02	0,47	46	0,99	97	0,43	43	ND	
	BCP	CR	0,95	0,67	71	0,84	89	0,76	80		
	MDP	SR	0,45	0,00	0	0,46	100	0,37	81		
	MDP	CR	0,60	0,02	4	0,56	92	0,54	89		
Erro Padrão			0,04	0,032		0,036		0,038			

BCP: Painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona. MDP: Painéis comerciais de média densidade de partículas de madeira e resina de ureia formaldeído; CR: Com revestimento superficial; SR: Sem revestimento Superficial ND: Não determinada

Adesão interna: Os valores iniciais obtidos para adesão interna em ambos os materiais com e sem revestimento cumprem com os requisitos estabelecidos pelas normas citadas na Tabela 23. A porcentagem retida da AI, após o ensaio de envelhecimento APA D1, diminuiu para todos os corpos-de-prova, com e sem revestimento superficial. O valor retido da AI para BCPCR igual a 71% e BCPSR igual a 46%. No entanto, para MDPCR corresponde a 4% e para MDPSR igual a 0%, ou seja, houve perda total. Kojima et al. (2011) realizaram o ensaio de envelhecimento acelerado APA D1 com painéis particulados de madeira com resina à base de fenol-formaldeído (PF) e de isocianato (MDI) e determinaram valores retidos de AI de 27% e acima de 70%, respectivamente.

Observou-se que na condição UR93 o valor retido da AI para BCPCR foi de 89% e BCPSR foi de 97%. No entanto para MDPCR o valor encontrado foi de 92% e para MDPSR foi de 100%, ou seja, não houve perda. O material de referência MDP apresenta, antes do envelhecimento acelerado, um menor valor de AI em relação ao BCP (Figura 31a). O material MDP é constituído de três camadas de partículas com tamanhos diferentes, sendo que a camada interna contém partículas mais grosseiras e as camadas externas são constituídas de partículas mais finas. Desse modo, não há completa aderência entre as partículas nas interfaces das camadas, ou seja, existe uma maior porosidade nas interfaces permitindo a penetração da água (Figura 31b).

Figura 31. Adesão Interna (MPa) após ensaios de envelhecimento Acelerado nos materiais (a) BCP e (b) MDP. CR: Com revestimento. SR: sem revestimento



Fonte: Própria autoria

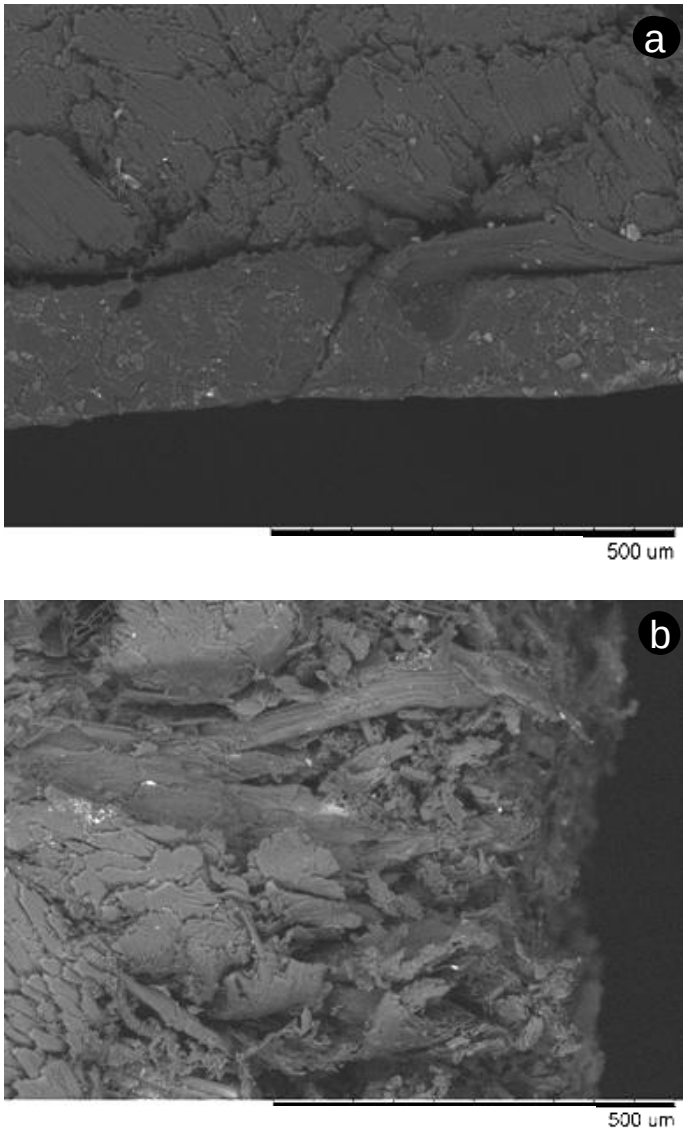
As propriedades mecânicas como a resistência à flexão (MOR) e rigidez (MOE), resistência à tração paralela e perpendicular à superfície (AI) foram afetadas pela geometria e tamanho das partículas que por sua vez também influenciou as propriedades físicas dos painéis, como inchamento em espessura e absorção de umidade, na forma liquida ou de vapor (MIYAMOTO, K.; NAHARA, S.; SUZUKI, S 2002 MALONEY 1993). Miyamoto, K.; Nahara, S.; Suzuki, S. (2002) estudaram painéis de partículas de madeira de 0,40 g/cm^3, 0,60 g/cm^3 e 0,72 g/cm^3 com três

diferentes tamanhos de partículas S (5,8 mm), M (13,3mm) e L (21,4mm). As letras S, M e L significam respectivamente, *small, mean* e *large*. Os pesquisadores indicaram que o inchamento em espessura aumenta com o tamanho e geometria das partículas. Verificaram também que o valor da adesão interna diminuiu com o tamanho das partículas em cada nível de densidade.

O aumento do inchamento na espessura do MDP, como comentado anteriormente, corrobora com aumento da absorção de água e a diminuição da resistência da adesão interna de partículas. Isto pode ser explicado pelo uso da resina à base de ureia-formaldeído (UF) nos painéis comercias MDP, que apresenta baixa resistência à umidade (VALARELLI et al., 2013; IWAKIRI, 2005). A diferença da resina poliuretana à base de óleo de mamona é que esta apresenta, entre outras vantagens ambientais e técnicas, maiores resistências físicas e mecânicas e principalmente resistência à umidade (SILVA et al., 2013). A Figura 32 apresenta os painéis de bagaço de cana-de-açúcar após o ensaio de envelhecimento acelerado APA D1. Na Figura 32a observa-se que os painéis de bagaço de cana com revestimento após o ensaio de envelhecimento acelerado APA D1 apresentaram pouca degradação e pouca perda da adesão interna das partículas. A Figura 32b mostra um incremento nos espaços entre as partículas e, por consequência, a diminuição da ligação interna para os painéis sem revestimento entre elas devido aos agentes de degradação, como a água e a temperatura, aos quais estiveram submetidos os corpos-de-prova.

Os compósitos que apresentaram uma porcentagem de absorção de água e inchamento em espessura menor foram aqueles que foram revestidos. Desse modo, comparando o desempenho mecânico entre os materiais, com relação à resistência da adesão interna, mostra que na etapa de imersão em água a 66 °C por 8 h do envelhecimento acelerado APA D1, o revestimento superficial protegeu parcialmente o material, ou seja, o tipo de resina utilizado na adesão das partículas foi preponderante para garantir a preservação parcial da resistência da adesão interna do material

Figura 32. Imagens obtidas por MEV de painéis de bagaço de cana-de-açúcar (BCP) a) Inicial com revestimento e b) sem revestimento, após ensaios de envelhecimento acelerado APA D1.



Os corpos-de-prova, com e sem revestimento superficial, foram testados nas condições de envelhecimento acelerado com umidade relativa de 93% por 8 h (UR93) e com temperatura de 82°C por 14,5 h (T82). Observou-se que na condição UR93 o valor retido da AI para BCPCR foi de 89% e BCPSR foi de 89%. Todavia, para MDPCR foi de 92% e para MDPSR foi de 100%. Ou seja, a alta umidade relativa por 8 h não foi suficiente para comprometer o desempenho mecânico de ambos os materiais.

Na condição T82 o compósito BCPSR sem revestimento superficial sofreu maior degradação ao se observar a resistência da adesão interna, em relação ao compósito ou ao outro material MDP com proteção. Assim, para o caso dos painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar (BCP) a fonte de variação (temperatura) associada ao uso

do revestimento superficial influencia favoravelmente de forma direta o desempenho mecânico e a durabilidade.

Cardoso et al. (2010) analisaram o comportamento térmico da espuma de poliuretano de mamona e encontraram que a espuma PU (poliuretano) apresentou início de degradação a 170 °C. Entretanto, o material apresentou tempo de vida de aproximadamente de 14 anos se for mantida a temperatura constante de 81 °C. Segundo Vick (1999) a longo prazo, a madeira, adesivos e produtos ligados pode sofrer uma determinada deterioração dependendo dos níveis de temperatura e de umidade, tensão e presença de microrganismos. Alguns adesivos deterioram-se expostos de forma intermitente ou continua as temperaturas superiores a 38° C por longos períodos. No entanto o efeito da temperatura a 82°C por 14,5 h não foi suficiente para comprometer o desempenho mecânico do ambos os materiais estudados.

Módulo de Elasticidade e modulo de ruptura: Os corpos-de-prova de MDP, após o envelhecimento acelerado APA D1, sofreram uma significativa degradação em relação aos de BCP com base no comportamento das propriedades mecânicas: MOR e MOE. Considerando os requisitos citados na Tabela 23, antes da exposição ao envelhecimento pode-se observar que os corpos-de-prova de painéis de bagaço de cana-de-açúcar (BCP) apresentaram valores superiores aos estabelecidos pela norma Brasileira NBR 14810:2 (2013) incluindo para painéis não estruturais para uso em condições secas e úmidas, assim como para a norma ANSI A208.1 (1999). Entretanto, segundo as normas CS236-66 (1968) e EN 312 (2003), os valores não atingiram os valores estabelecidos. Para o caso dos painéis de MDP os resultados mostram o cumprimento dos requisitos estabelecidos pelas normas. Resultados iniciais obtidos para MOR em BCPCR (21,7 ± 1,16 MPa) e MDPCR (20,6 ± 1,16 MPa) são similares aos obtidos por Sekino et al. (2014) em painéis particulados de madeira com resina à base de fenol-formaldeído (PF) de média densidade foi de 20,7 ± 2,4 MPa.

A Figura 33a a Figura 33b mostra a análise das propriedades mecânicas (MOE e MOR) dos materiais (BCP e MDP), independente do revestimento superficial, após os envelhecimentos acelerados. Os painéis submetidos ao ensaio de envelhecimento APA D1 apresentaram uma redução nos valores das propriedades de MOR e MOE. Nota-se que o material MDP submetido ao envelhecimento acelerado APA D1 apresenta o pior desempenho mecânico em relação ao material BCP. O MOE retido após os ensaios de envelhecimento acelerado corpos-de-prova com revestimento superficial apresentaram valores para BCPCR (73%) e BCPSR (59%) para MDPCR (1%) e MDPSR (2%).

Os valores obtidos para BCP encontram-se acima dos obtidos por Kojima et al. (2011), para painéis particulados de madeira com resina à base de fenol-formaldeído (PF) e de isocianato (MDI) e determinaram, respectivamente, valores retidos de MOE acima 55% após 3 e 6 ciclos do mesmo tratamento autores obtiveram porcentagens de retenção de 33% APA D1(3 ciclos) e 18% APA D1(6 ciclos). Assim o revestimento superficial não foi suficiente para exercer uma proteção aos materiais submetidos as

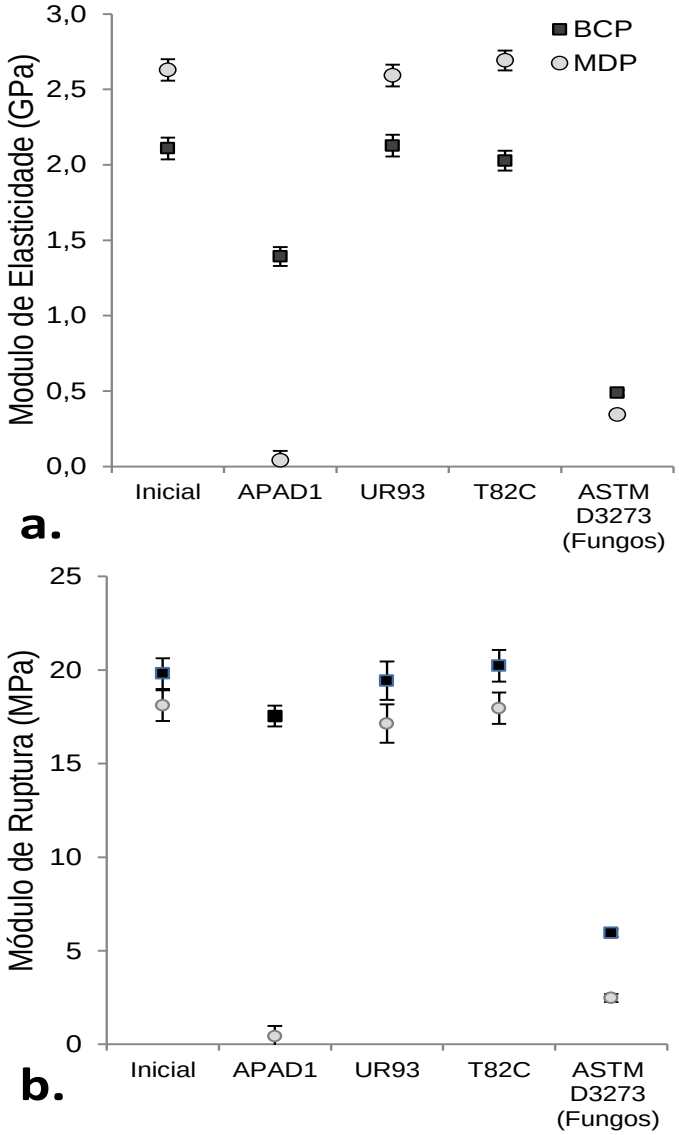
condições de imersão em água. Segundo Zhang et al. (2001) a presença excessiva de umidade é sempre um fator de detrimento das propriedades mecânicas de painéis laminados resultando em delaminação. Isto pode ser observado de forma majoritária nos painéis de MDP que não sendo laminados mas compostos por três camadas apresentaram uma delaminação maior e por conseguinte uma redução no desempenho mecânico.

O MOR retido após os ensaios de envelhecimento acelerado APA D1 de corpos-de-prova com revestimento superficial apresentaram valores para BCPCR (90%) e BCPSR (87%) para MDPCR (3%) e MDPSR (2%). Os valores obtidos encontram-se acima daqueles encontrados por Kojima et al. (2011). Eles realizaram o ensaio de envelhecimento acelerado APA D1 com painéis particulados de madeira com resina à base de fenol-formaldeído (PF) e de isocianato (MDI) e determinaram, respectivamente, valores retidos de MOR acima 70% e 95%. Estes resultados sugerem a capacidade da resina de suportar as condições de envelhecimentos. Entretanto, após 3 e 6 ciclos, seguindo a norma APA D1, os pesquisadores obtiveram porcentagens de retenção em 3 ciclos 55% (PF) e 87%(MDI) e 6 ciclos 28%(PF) e 68%(MDI), respectivamente .

Observou-se que na condição com umidade relativa de 93% por 8 h (UR93) e com temperatura a 82°C por 14,5 h (T82) o valor retido para da MOE foi acima de 90% e 95%, respectivamente, para ambos os materiais, nas duas condições de revestimento. Isto significa que as condições de alta umidade relativa por 8 h e alta temperatura durante 14 h avaliadas separadamente não foram suficientes para comprometer o desempenho mecânico do compósitos e os danos ocasionados são gerados pelos efeitos combinados dos agentes de degradação.

Observa-se um desempenho mecânico significativamente melhor dos materiais com o revestimento superficial realizado com a resina poliuretana a base de óleo de mamona do que aqueles sem revestimento superficial. Isto indica que os diferentes fatores de degradação aos que foram submetidos os materiais, foram reduzidos pelo efeito do revestimento superficial melhorando as propriedades de MOR e MOE.

Figura 33. Propriedades mecânicas após ensaios de envelhecimento Acelerado. Modulo de Elasticidade: (a) Material vs. Ensaios de envelhecimento; Módulo de Ruptura (b) Material vs. Ensaios de envelhecimento CR: com revestimento. SR: sem revestimento.



Fonte: Própria autoria

3.4 Mudanças em cor durante a exposição ao envelhecimento acelerado

O objetivo foi acompanhar os parâmetros colorimétricos dos painéis particulados de bagaço de cana e resina poliuretana a base de óleo de mamona (BCP) e painéis particulados de madeira de media densidade (MDP), submetidos aos ensaios de envelhecimento acelerado.

Os valores de a*b* L*e ΔE* são apresentados na Figura 34 para a variação de cor e ambos os materiais, BCP e MDP, com e sem revestimento superficial, expostos aos ensaios de envelhecimento acelerado. A analise de variância ANOVA apresentou interação entre as fontes de variação (Material vs. Revestimento e Tempo de exposição) a* (p valor < 0,0001) b* (p valor < 0,0001) L* (p valor < 0,0001) e ΔE* (p valor < 0,0001). Um incremento em L significa que a amostra apresenta mais claridade.

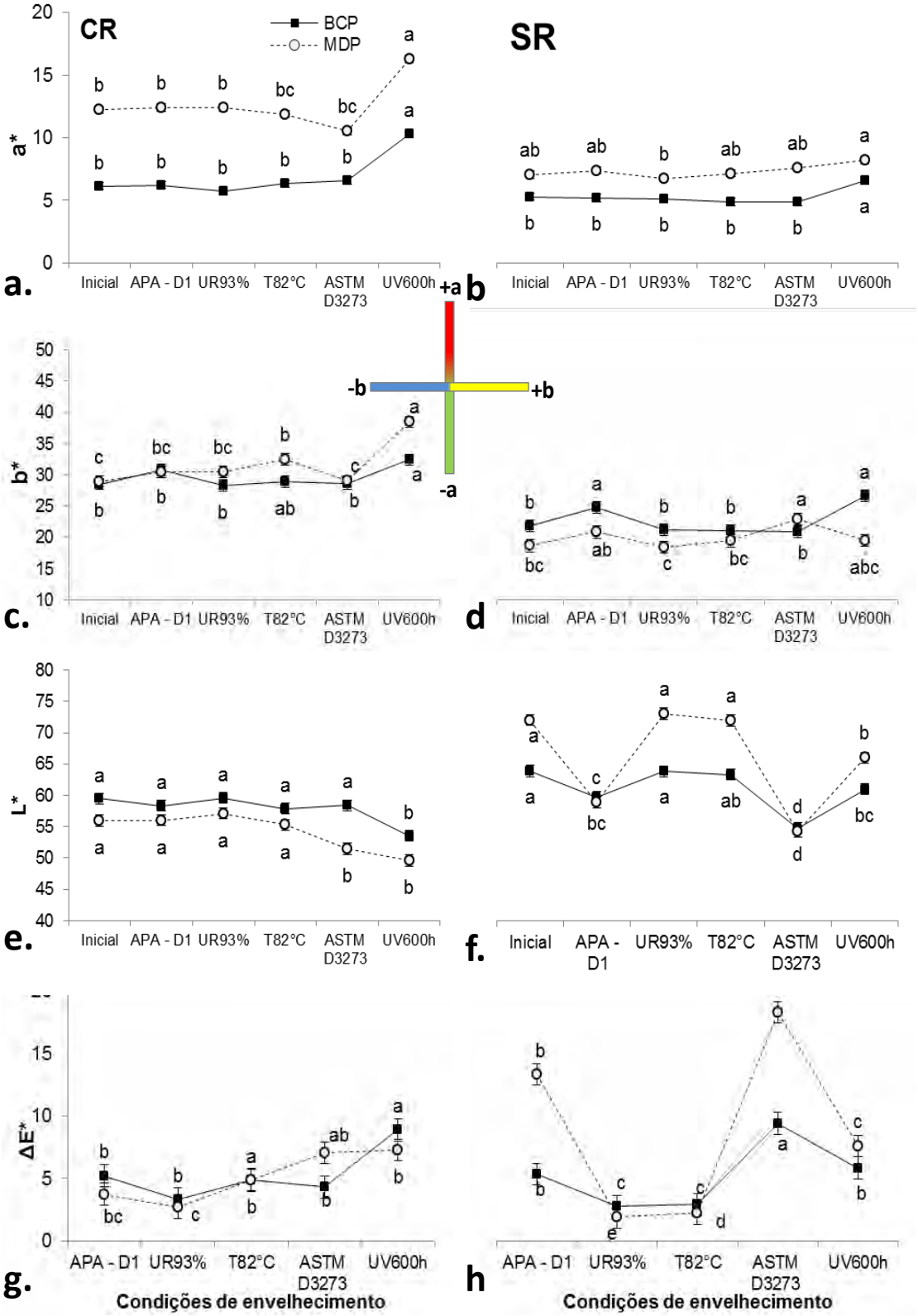
Valores positivos de a* significam cores em direção ao vermelho, valores positivos b* significa cores em direção ao amarelo, como indicado na Figura 34 que mostra um esquema em forma de cruz. Para os materiais em condições iniciais os valores das coordenadas a* e b* foram positivos, o que classifica as amostras no primeiro quadrante de cores no Sistema CIELAB 1976, padrão de comportamento esperado para a coloração de madeiras (CAMARGOS, J. A A; GONÇALEZ J. C. A 2001). Os valores iniciais encontrados para os parâmetros colorimétricos a*, b* e L* para BCPSR foram similares aos encontrados em painéis *binderless* BL180 (5,69) e BL200 (5,3) fabricados com fibras de cânhamo, os valores de ΔE* são incrementados com o tempo de exposição (OKUDA; MASATOSHI, 2008).

Na Figura 34a pode ser observado que após os ensaios de envelhecimento acelerado os corpos-de-prova de ambos os materiais apresentam as maiores diferenças quando expostos a UV600h. A exposição à radiação UV ocasionou mudanças na cor dos corpos-de-prova de compósitos de madeira e bagaço de cana, estas mudanças têm sido observadas por (BUTYLINA et al., 2012) em compósitos de madeira e polipropileno após 300h utilizando uma lâmpada UV-340A.

O ensaio de intemperismo artificial UV600h ocasionou as maiores mudanças nos parâmetros colorimétricos em ambos os materiais. Os corpos-de-prova com revestimento superficial apresentaram tonalidades com tendência ao vermelho como apresenta a Figura 34a e Figura 34b.

Os corpos-de-prova apresentaram uma variação com tendência ao amarelo como apresentado na Figura 34c e Figura 34d. Mitsui e Tsuchikawa (2005), Ruggiero et al. (2005) e George et al. (2005), indicam que sob irradiação a lignina é uma estrutura importante na degradação da madeira gerando radicais fenóxi e os fenóis podem ser oxidados. Os autores indicam que lignina absorve no espectro da luz UV visível e o mecanismo de fotodegradação envolve diferentes caminhos dando formação a radicais. Esses radicais livres reagem com o oxigênio produzindo grupos cromóforos como grupos carbonila e carboxila, que também conduzem a rachaduras e amarelamento. Um dos principais radicais de vida longa é um guaiacol que sofre transformações em estruturas quinoide, cuja origem é da cor amarelo para a madeira.

Figura 34. Parametros colorimétricos das superfícies nos materiais BCP e MDP após exposição ensaios de envelhecimento aceleraado e colonização por fungos emboloradores. (a e b): a* (c e d): b*. (e e f): L* e (g e h): ΔE*.



Fonte: Própria autoria

Corpos-de-prova com e sem revestimento superficial após os ensaios de intemperismo artificial por uv600h, apresentaram cor escura (Figura 34e Figura 34F) a perda da luminosidade pode ser explicada possivelmente pela decomposição da lignina e degradação fotoquímica que ocorre na superfície exposta luz UV (Bertolini et al. 2013). Nos corpos-de-prova sem revestimento superficial os ensaios acelerado com mais teve influência nas mudanças na luminosidade L* foram APA D1, o ensaio de biodeterioração ASTMD 3273 e UV600h. No caso do ensaio APA D1 os fatores combinados de temperatura e moagem influenciaram ambos os materiais de forma igual, no caso ensaio por fungos emboloradores ASTMD 3273 a colonização dos fungos nos materiais ocasionou uma alta variação nas luminosidades e nos valores da mudança total de cor (ΔE) como apresentado na Figura 34h.

Peng, et al. 2014 analisaram a influencia do intemperismo artificial em compósitos constituidos com 60% de polipropileno reforçados com 40% serragem de madeira, expostos a um total de 960h, considerando o ciclo 6 da norma ASTM G 154-06(8h UV a 60C seguido de 4h de condensação a 50°C. Os compósitos após o ensaio de intemperismo com diferentes teores de lignina (0,10,20,30%)e celulose (0,10,20,30,40%), apresentaram descoloração devido a presença da lignina. Os compósitos reforçados com celulose apresentaram melhor estabilidade na cor ΔE (inferior 5 a 480h de exposição).

Os resultados obtidos para a mudança total de cor ΔE nos painéis no presente estudo e apresentam, 7 (BCPCR), 9 (MDPCR), 6 (BCPSR) 8 (MDPSR) são superiores aos encontrados por Butylina et al. (2012) que avaliaram compósitos de polipropileno (30%) e madeira (64%) e minerais (6%) cujo ΔE corresponde a 7,5 em 500h de exposição (Figura 34). Para os corpos com revestimento superficial a luminosidade foi afetada para o BCPCR principalmente no ensaio UV600h e para MDPCR o ensaio de biodeterioração ASTMD 3273 devido a presença de fungos emboloradores e os efeitos das condições ambientais de umidade e temperatura dentro da câmara do ensaio, e para UV600h, Chaochanchaikul et al. (2012) indicam que a combinação da luz ultravioleta e ciclos de moagem podem gerar grandes mudanças e induzir rapidamente à fotoxidação da lignina, hemicelulose e celulose.

Aloui et al. (2006) compararam o desempenho de absorvedores de UV orgânicos e inorgânicos (*Tinuvin 5151–Tinuvin 5151*) usados como revestimento para madeira Abeto (*A. grandis*), Tauari (*Couratari spp.*) e Carvalho Europeo(*Quercus petraea* and *Quercus robur*), expostos 800 h utilizando ciclos de condensação exposição ao 340 nm de UV e água por aspersão. Os pesquisadores encontraram valores superiores a 7,5 no ΔE após 150h para ambos os tipos de revestimentos nas diferentes espécies de madeira. Isto indica o bom desempenho da resina poliuretana de óleo de mamona.

4 Conclusões

- Os resultados encontrados no ensaio ao intemperismo artificial por radiação UV impediram realizar as análises nos compósitos de madeira devido à deterioração apresentada após 600h de exposição. Para o caso dos painéis de BCP os resultados das propriedades físico-mecânicas indicam o revestimento superficial realizado com resina poliuretana de óleo de mamona como um fator importante na retenção das propriedades, assim como sua utilização como adesivo em comparação com a resina à base de formaldeído.

- O método de envelhecimento APA D1 mostrou-se como o ensaio que mais permitiu identificar os mecanismos de deterioração gerados pela temperatura e umidade nos quais foram submetidos os materiais. Os resultados obtidos indicam os painéis de bagaço de cana BCP com melhor desempenho em relação aos painéis comerciais de madeira. Além disso, o revestimento superficial melhorou ainda as propriedades dos painéis. De outro lado o revestimento superficial não se mostrou totalmente efetivo para os painéis MDP de madeira na proteção uma vez que fatores como a água e a umidade penetraram pelas bordas do material o efeito do adesivo a base de ureia formaldeído não conseguiu manter as propriedades físico-mecânicas iniciais.

- Os efeitos da temperatura e a umidade são de grande importância na análise da durabilidade dos materiais. Entretanto, a análise realizada nos compósitos mediante uma exposição separada dos fatores de degradação, de acordo com ensaio de envelhecimento, (UR93) e (T82), não indicou causas explícitas da degradação em curto tempo de exposição. Assim como os resultados encontrados pelos demais ensaios onde os efeitos desses fatores são combinados.

- O ensaio de biodeterioração por fungos emboloradores apresentou uma redução nas propriedades físico mecânicas dos compósitos. Todavia, esta redução não pode ser atribuída especificamente a ação colonizadora dos fungos, sim às condições de alta umidade e temperatura a qual os compósitos estiveram submetidos durante o tempo de exposição.

- O revestimento superficial realizado com a resina poliuretana a base de óleo de mamona manteve resistência mecânica dos materiais especialmente nos corpos-de-prova dos painéis particulados fabricados a partir de bagaço de cana-de-açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona.

- Entre ambos os materiais, o BCP apresentou um melhor rigidez após o tempo de exposição, considerando o valor de MOE. Isto devido principalmente a ação da resina poliuretana a base de óleo de mamona utilizada como adesivo das

partículas. Os materiais com revestimento superficial apresentaram melhor desempenho físico-mecânico.

- Foi identificada uma mudança na cor ΔE* e dos parâmetros colorimétricos a*, b e L* em ambos os materiais, principalmente, naqueles submetidos aos ensaios de envelhecimento acelerado APA D1, UV600h e ASTMD 3273.

5 Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS . ASTM D 1037 - Standard test methods for evaluating properties of wood-based fiber and particle panel materials. Philadelphia, 1996. p. 137-166.

_____. ASTM D 3273-12 - Resistence to growth of mold on the surface of interior coatings in na environmental chamber. Philadelphia, 2012. p. 1-8.

_____. ASTM G154-06 - Standard practice for operating fluorescent light apparatus for UV exposure of nonmetallic materials. Philadelphia, 2006. p. 2168-2178.

_____. ASTM G - 53 Operating Light - andWater-Exposure Apparatus (Fluorescent UV-Condensation Type) for Exposure of NonmetallicMaterials.

_____. NBR 14810–2/2013 - Painéis de partículas de média densidade - parte 2: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. 69 p.

_____.ASTM G154-06 - Standard practice for operating fluorescent light apparatus for UV exposure of nonmetallic materials. Philadelphia, 2006. p. 2168-2178.

ALMEIDA, A. E. F.S; FERREIRA O.P. Poliuretana derivada de óleos vegetais exposta ao intemperismo artificial. Polímeros. 2006; 16(3):252-256

ALOUI, F.et al . Inorganic UV absorbers for the photostabilisation of wood-clearcoating systems: Comparison with organic UV absorbers. Applied Surface Science.v. 253. p. 3737–3745. 2007.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE - ANSI A208.1 (1999). Mat-formed wood particleboard: Specification. National Particleboard Association. Gaithersburg.

ANDRADY A. L. et al . Effects of increased solar ultraviolet radiation on materials. Photochem. Photobiol. B. 46. 1998.

ANÉRIS B. K. et al.Painéis de partícula fabricados com resíduos de podas de árvores urbanas. In: LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. (Orgs.). Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos. São Carlos; EESC/USP, 2013. cap. 10, p. 249-265.

APA – The Engineered Wood Association. PRP -108 – performance standards and policies for structural – use panels. Tacoma, WA: The Association, 72 p. 1999.

ARAÚJO, L. C. R. Caracterização química, térmica e mecânica de poliuretanas elastoméricas baseadas em materiais oleoquímicos. 1992. 105 f. Dissertação

(Mestrado) - Instituto de Química e Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS - ABNT, Rio de Janeiro. NBR 14810 - Chapas de madeira aglomerada - parte 3: Métodos de Ensaio, terminologia. Rio de Janeiro, 32p., 2006

BARRETO, C. C. K.; PASTORE, T. C. M. Resistência ao intemperismo artificial de quatro madeiras tropicais: o efeito dos extrativos. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 19, n. 1, p. 23-30, mar. 2009.

BARROS, FILHO R. M. et al. Hybrid chipboard panels based on sugarcane bagasse, urea formaldehyde and melamine formaldehyde resin. Industrial Crops and Products. V.33.p. 369–373. 2011.

BARROS, S. S. V.; MUNIZ, B. G. I.; MATOS, J. L. M. Caracterização Colorimétrica das Madeiras de Três Espécies Florestais da Amazônia. CERNE | v. 20 n. 3 | p. 337-342 | 2014.

BENINI K. C. C. C; VOORWALD, H.J.C; CIOFFI M.O.H. Mechanical properties of HIPS/sugarcane bagasse fiber composites after accelerated weathering. Procedia Engineering. v 10. P. 3246–3251. 2011.

BERTOLINI MS. Emprego de resíduos de Pinus sp. tratado com preservante CCB na produção de chapas de partículas homogêneas utilizando resina poliuretana à base de mamona. [Dissertação], São Carlos: Universidade de São Paulo; 2011.

BERTOLINI S. M. et al. Emprego de resíduos de Pinus sp tratado com CCB e resina PU de mamona na produção de chapas de partículas. In: LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. (Orgs.). Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos. São Carlos; EESC/USP, 2013a. cap. 10, p. 249-265. a.

BERTOLINI, M. S et al. Accelerated artificial aging of particleboards from residues of CCB treated Pinus sp. and castor oil resin. Materials Research (São Carlos. Impresso), v. 16, p. 293-303, 2013b.

BOK, G. et al. Critical moisture levels and mould resistance of five different wood treatments. In: INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PROTECTION, 44., 2013, Stockholm. Proceedings… Stockholm, 2013. res. IRG/WP 13-30632.

BUTYLINA, S; HYVÄRINEN, M; KÄRK T. Accelerated weathering of wood–polypropylene composites containing minerals. Composites: Part A. v. 43 , p.2087–2094. 2012.

CAMARGOS, J. A A; GONÇALEZ J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. Brasil Florestal, Ano XX, n. 71, p. 30-41, 2001.

CANGEMI, J. M. et al . Biodegradation of Polyurethane Derived From Castor Oil. Polímeros, v. XVIII, p. 201-206, 2008.

CARDOSO, G T; CLARO N, S ; F, O P . Condutividade térmica e análise do comportamento térmico da espuma poliuretana derivada de óleo de mamona para

reação frente ao calor. In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais CBECiMat, 2010, Campos do Jordão-SP. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais CBECiMat, 21 a 25 de novembro de 2010, Campos do Jordão, SP, Brasil, 2010.

CASTRO JR., S. L. et al Particleboards with Agricultural Wastes: Sugar Cane Bagasse and Reforestation Wood. Key Engineering Materials (Online) JCR, v. 600, p. 667-676, 2014.

CHAOCHANCHAIKUL K. et al . Influence of lignin content on photodegradation in wood/HDPE composites under UV weathering, BioResources. v. 7.p 38–55. 2012.

CHIA-WEI CHANG; KUN-TSUNG LU. Natural castor oil based 2-package waterborne polyurethane wood coatings. Progress in Organic Coatings. V. 75.p 435– 443. 2012.

CHRISTOFORO, A. L. et al. Painéis de partículas reforçados por materiais compósitos laminados em fibras de sisal. In: LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. (Orgs.). Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos. São Carlos; EESC/USP, 2013a. cap. 7, p. 165-169.

CLAUSEN, C. A.; WEST, M. Test method for assessing resistance of pine lumber and waferboard to mold. Forest Products Journal, Madison, v. 55, n. 12, p. 164-166, 2005.

COMMERCIAL STANDARD. Mat formed wood particleboard. CS 236-66. 1968.

CONNER AH. Urea-formaldehyde adhesive resins. In: Salamone JC, editor. Polymeric materials encyclopedia. Claypool, Joel, Demby, Andrea, editors. Boca Raton (FL): CRC Press;. p. 8496–501. 1996.

COUTINHO F. M. B.; DELPECH M. C. Poliuretanos como Materiais de Revestimento de Superfície. Polímeros: Ciência e Tecnologia. p 41-48. 1999.

CRAVO, J. C. M. et al . Manufacture of particleboard based on cement bag and castor oil polyurethane resin. Construction & Building Materials, v. 87, p. 8-15, 2015.

CRISTEA, V. M.; RIEDL. B;, BLANCHETA, P. Enhancing the performance of exterior waterborne coatings for wood by inorganic nanosized UV absorbers . Progress in Organic Coatings. V. 69. p. 432–441.2010.

DEL MENEZZI C. H. S. et al. Properties after weathering and decay resistance of a thermally modified wood structural board. International Biodeterioration & Biodegradation. V. 62. p 448–454. 2008.

DONIZETI V.L et al. Painéis de partículas constituídos de Eucalyptus grandis e casca de aveia: produção e avaliação do desempenho físico-mecânico In: LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. (Orgs.). Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos. São Carlos; EESC/USP, 2013a. cap. 11, p. 265-297.

DROCHYTKA, R; PETRÁNEK, V. Enviromental deterioration of materials. Editor. A. Moncmanovà. Chapter 8. Enviromental deterioration of building material. Slovak Technical University , Slovakia. ISSn:1368-1435. p. 312. 2007.

EUROPEAN STANDARD. EN 312: Particleboards – Specifications. British Standard. English version. Brussels; 2003.

EVANS, K .J .; SCHMALZL, A .J .; MICHEL. L. Rapid loss of lignin at wood surfaces during natural weathering. IRG/WP 92-2390. 1992 .

FEIST, W. C.; HON, D. N-S. Chemistry of Weathering and Protection. Chapter 11. THE CHEMISTRY OF SOLID WOOD. American Chemical Society.

FIORELLI J, et al . Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: An eco-efficient product. Industrial Crops and Products (Print),v. 40, p. 69-75, 2012.

FIORELLI, J. et al . Painéis de partículas monocamadas fabricados com resíduo de madeira e fibra do coco verde. Scientia Forestalis (IPEF), v. 43, p. 175-182, 2015.

FIORELLI, J. et al . Particleboards with waste wood from reforestation. Acta Scientiarum. Technology (Online), v. 36, p. 251-256, 2014.

GARAY R.M . Efectos de dos Protectores Superficiales en las Propiedades de Tableros de Madera después de un Año de Exposición a la Intemperie. Información Tecnológica . Vol. 20(4), p.123-130 . 2009.

GARCÍA, M. et al. Wood–plastics composites with better fire retardancy and durability performance. Composites: Part A. v. 40.p. 1772–1776. 2009.

GARZON, N. et al. Durability evaluation of agroindustrial waste based particle boards using accelerated aging cycling tests. Key Engineering Materials JCR, v. 517, p. 628-634, 2012.

GATANI, M. et al. New Process for Peanut Husks Panels: Incorporation of Castor Oil Polyurethane Adhesive and Different Particle Sizes. Key Engineering Materials (Online), v. 600, p. 452-459, 2014.

GATANI, M. et al. New Process for Peanut Husks Panels: Incorporation of Castor Oil Polyurethane Adhesive and Different Particle Sizes. Key Engineering Materials (Online), v. 600, p. 452-459, 2014.

GEORGE, B et al. Photodegradation and photostabilisation of wood – the state of the art. Polym Degrad Stab.V. 88 . p 268–74. 2005.

GUNDUZ, G.; AYDEMIR, D.; KARAKAS, G. The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild Pear (Pyrus elaeagnifolia Pall.) wood and changes in physical properties. Materials & Design. Volume 30, Issue 10, p. 4391–439, 2009.

IWAKIRI, S. et al. Produção de painéis de madeira aglomerada de alta densificação com diferentes tipos de resina. Scientia Florestalis, Piracicaba, v. 68, p. 39-43, 2005a.

JESUS, J. M. H. Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC). 2000. 106 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

JOHANSSON, P; JERMER, J. Mould growth on wood-based materials – a comparative study. Proceedings IRG Annual Meeting, IRG/WP 10-20455, 8 p. 2010.

JOHNSTON J. The physical testing of pressure-sensitive adhesive systems. In: Handbook of adhesive technology. Marcel Dekker Inc.; 2003.

KAJITA H.; MUKUDAI J.; YANO H., Durability evaluation of particle boards by accelerating aging test. Wood science and technology v25:239- 249. 1991.

KAMDEM D. P et al . Properties of wood plastic composites made of recycled HDPE and wood flour from CCA-treated wood removed from service. Composites: Part A. v. 35 .p. 347–355. 2004.

KARLSSON, P.; MCNATT, J. D.; VERRILL, S. P. Vacuum-pressure soak plus ovendry as an accelerated-aging test for wood-based panel products. Forest Prod Journal, v. 46, p. 84–88, 1996.

KARTAL, S. N. et al . Preliminary evaluation of storax and its constituents: Fungal decay, mold and termite resistance.2012.

KOJIMA, Y.; SHIMODA, T.; SUZUKI, S. Evaluation of the weathering intensity of wood-based panels under outdoor exposure. DOI 10.1007/s10086-011-1197-7. J Wood Sci . v.57:p.408–414. 2011.

KOJIMA, Y.; SUZUKI, S. Evaluating the durability of wood-based panels using internal bond strength results from accelerated aging treatments. Faculty of Agriculture, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku, J Wood Sci Volume 57, p 7-13 Japan, 2010.

KORAI H., ADACHI K., SAOTOME H. Deterioration of wood-based boards subjected to outdoorexposure in Tsukuba. DOI 10.1007/s10086-012-1291-5. J Wood Sci. v 59:p 24–34.2013.

LEPAGE ES. Manual de Preservação de Madeiras. Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo; 1986. v. 1

MALONEY, T.M. The family of wood composite materials. Forest Products Journal. v.46, n.2, p. 19-26. 1996.

MCNATT, J. D.; LINK, C. L. Analysis of ASTM D 1037 accelerated-aging test. Forest Products Journal, Peachtree Corners, v. 39, n. 10, p. 51-57, 1989.

MITSUI, K.; TSUCHIKAWA, S. Low atmospheric temperature dependence on photodegradation of wood. J Photochem Photobiol B: Biol;p 81:84–8. 2005.

MIYAMOTO, K.; NAHARA, S.; SUZUKI, S. Effect of particle shape on linear expansion of particleboard. Journal of Wood Science, Berlin, v. 48, n. 3, p. 185-190, 2002.

NADIR AYRILMISN. Effect of fire retardants on internal bond strength and bond durability of structural fiberboard. Building and Environment,v. 42. P.1200–1206.2007.

NASCIMENTO M. F.; LAHR F. A. R.; BERTOLINI M.;SOUZA A. M. Viabilidade do emprego de eucalyptus tratado com cca e ccb na produção de painéis

particulados de alta densidade . in: lahr, f. a. r.; chrISTOFORO, A. L. (Orgs.). Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos. São Carlos; EESC/USP, 2013a. cap. 3, p. 57-91.

NASCIMENTO, M. F. CPH – Chapas de Partículas Homogêneas – Madeiras do Nordeste do Brasil. 2003. ___p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

NIEUWENHUIJZEN E. J et al. Detection of Aureobasidium as the dominant fungus on coated wood Paper prepared for the 44th IRG Annual Meeting Stockholm, Sweden 16-20 June 2013. Doc. No.IRG/WP 13-10796.

OKKONEN, E. A.; RIVER, B. H. Outdoor aging of wood-based panels and correlation with laboratory aging: Part 2. Forest Products Journal, v. 46, p. 68–74, 1996.

OKUDA NOBUHISA; SATO MASATOSHI. Bond durability of kenaf core binderless boards II: outdoor exposure test. J Wood Sci. DOI 10.1007/s10086-007-0908-6. v. 54. p. 36–44..2008.

PENG, Y.; LIU, R.; CAO, J; CHEN Y. Effects of UV weathering on surface properties of polypropylene composites reinforced with wood flour, lignin, and cellulose. Applied Surface Science.v. 317.p. 385–392. 2014.

PETRIČ, M. et al. Natural weathering of coated oil heat treated wood. In: ANNUAL MEETING JACKSON LAKE LODGE, 38., 2007, Wyoming, USA. Proceedings… Wyoming, USA, 2007. res. IRG/WP 07-30440.

JANA R.N.; BHUNIA H.; Accelerated Hygrothermal and UV Aging of Thermoplastic Polyurethanes . DOI: 10.1177/0954008308097460 The online version of this article can be found at: http://hip.sagepub.com/content/22/1/3. p. 1-4. 2008.

RUGGIERO R, et al. Photodegradation of sugar cane bagasse acidolysis lignins. J Photochem Photobiol A: Chem.p 150–173: 2005.

SARTORI, D. et al . Modular panel with wood and particleboards of sugarcane bagasse for cattle handling facilities. Acta Scientiarum. Technology (Impresso), v. 37, p. 3, 2015.

SARTORI, D. L. et al . Painel em Madeira de Reflorestamento e Chapas de Partículas para Instalações Rurais. Floresta e Ambiente, v. 19, p. 171-178, 2012.

SARTÓRIO P. S. F., MARTINES M. E. A., FERRO F., MOURA D. F.Produção de painéis de partículas homogêneas (PPH) utilizando resíduos de espécies de reflorestamento. In: LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. (Orgs.). Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos. São Carlos; EESC/USP, 2013. cap. 1, p. 1-23.

SASSONI, E. et al. Experimental study on the physical–mechanical durability of innovative hemp-based composites for the building industry. Energy and Buildings,v 104p 316–322. 2015.

SEKINO, N.; SATO. H.; KOJI, A. Evaluation of particleboard deterioration under outdoor exposure using several different types of weathering intensity. J Wood Sci v. 60:p. 141–151. 2014.

SILVA, R.V et al. Fracture toughness of natural fibers/castor oil polyurethane composites. Compos Sci Technol v 66. p. 1328–1335. 2006.

SILVA, J. O., PASTORE, T.C.M., PASTORE JR, F. Resistência natural ao intemperismo artificial e proteção de cinco madeiras tropicais. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 17 , n. 1 e 2 , p. 17-23 , 2007.

SILVA, M. S. A.; AZAMBUJA M. A.; SEGANTINI S. A.A.; Avaliação da densidade aparente de chapas de madeira aglomerada confeccionadas com partículas de madeira tropical e poliuretana derivado de óleo de mamona. In: LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. (Orgs.). Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos. São Carlos; EESC/USP, 2013a. cap. 4, p. 91-111.

SILVA, S. A. M.; LAHR, F. A. R. Chapas de partículas confeccionadas com resíduos de madeiras tropicais de baixa densidade. Capítulo 14 do livro: Reciclagem de resíduos para a construção civil. Editora da Universidade FUMEC – FEA. P. 343 – 365. Belo Horizonte – MG. 2008.

STARK, N. M. , MATUANA, L. M. Characterization of weathered woodeplastic composite surfaces using FTIR spectroscopy, contact angle, and XPS. Polymer Degradation and Stability. v. 92 p. 1883 -1890. 2007.

SUN, F. et al. Study on the thickness swelling of mould-resistant chemical treated bamboo strand woven outdoor flooring. In: ANNUAL MEETING OF THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PROTECTION, 41., 2010, Biarritz, France. Proceedings… Biarritz, France, 2010. res. 10-40489.

TOMAK E. D., TOPALOGLU E , AY N, YILDIZ U C. Effect of accelerated aging on some physicaland mechanical properties of bamboo. Wood Sci Technol. Vol. 46 p 905–918. 2012.

VALARELLI I. D., et al. Avaliação do desempenho de painéis de partículas aglomeradas de bambu da espécie Dendrocalamus giganteus. In: LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. (Orgs.). Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos. São Carlos; EESC/USP, 2013a. cap. 8, p. 179-219.

VICK, CHARLES B. Adhesive bonding of wood materials Wood handbook : wood as an engineering material. Madison, WI : USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL ; GTR-113: P 9.1-9.24. 1999.

YANG, D. Q. Control of moisture content in wood materials for mold growth. In: SYMPOSIUM INTERNATIONAL UNION OF FOREST RESEARCH ORGANIZATION, 5., 2007, Taipei, Taiwan. Proceedings… Taipei, Taiwan, 2007. res. IRG/WP07-10630. 2007.

YANG, D. Q.; WANG, X. M.; WAN, H. Biological protection of composite panel from moulds and Decay. In: ANNUAL MEETING OF THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PROTECTION, 38., 2007, Jackson, USA, 2007. Proceedings… Jackson, USA, 2007. res. 07-10612.

YANG, H. S.. Water absorption behavior and mechanical properties of lignocellulosic filler–polyolefin bio-composites. Composite Structures, v. 72, p. 429-437, 2006.

YE, X.P., JULSON, J., KUO, M., WOMAC, A., MYERS, D.,. Properties of medium density fiberboards made from renewable biomass. Bioresource Technol. V. 98, p 1077–1084. 2007.

ZHANG, J.Y et al. Residual properties of reformed bamboo/aluminium laminates after hygrothermal aging. Composites science and technology. v.61, p. 1041-1048. 2001.

Capitulo 5 -Avaliação por envelhecimento natural em painéis particulados de bagaço de cana de açúcar e madeira

1 Introdução

As condições climáticas e as características meteorológicas podem ocasionar processos de deterioração nos materiais. Esses fatores climáticos incluem temperatura, radiação solar, umidade do ar, as diferentes formas de precipitação (chuva, neve etc). O impacto desses fatores varia dependendo das estações e da mesma variabilidade intraestacional ocasionada pela determinação da luz do sol e oscilação diária de temperatura, movimentos do ar,pressão e intensidade da chuva. Assim mesmo as condições meteorológicas afetam os processos de transporte, transformação, dispersão e deposição de emissões de fontes e estas podem induzir dano nos materiais (DROCHYTKA& PETRÁNEK , 2007).

Os tipos básicos de acabamentos utilizados para proteção da madeira quando exposta ao intemperismo: (i) acabamentos constituídos de película para recobrir a superfície: tintas alquilicas, epóxi, vinílicas, acrílicas, celulósicas, poliéster, poliuretano, látex, copolímero-butadieno, verizes e lacas; (ii) acabamentos que penetram na madeira: preservativos, stains, repelentes de água e pigmentos semi-transparentes. Cuja função básica é proteger a madeira da ação dos insetos; degradação, mantendo ou não sua aparência natural; repelir a água; evitando a presencia de fungos manchadores e apodrecedores; e manter a estabilidade dimensional (NASCIMENTO, 2003).

Na indústria de revestimentos, incluindo os adesivos, os poliuretanos têm sido utilizados e têm apresentado excelente desempenho na proteção de uma grande variedade de substratos como aço, concreto, plásticos, metais, papel, couro e madeira (COUTINHO & DELPECH, 1999). O Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros da USP - São Carlos desenvolveu o poliuretano derivado do óleo de mamona (*Ricinus communis*) obtido a partir das sementes da planta "*Ricinus communis*" é um recurso renovável de origem natural, encontrado em áreas tropicais e subtropicais, sendo abundante no Brasil. (CANGEMI, et al 2008). Os maiores produtores mundiais de mamona são a Índia, China e Moçambique. No Brasil tem 90 mil de hectares, de área estimada plantada para a safra 2014/15 e 61,0 mil toneladas de produção (CONAB 2015).

O formaldeído é usado principalmente na produção de resinas que são utilizadas como adesivos e aglutinantes, para produtos de madeira, celulose, papel, lã de vidro e lã de rocha. Também é usado extensivamente na produção de plásticos e revestimentos, em acabamento têxtil e na fabricação de produtos químicos industriais. É usado como um desinfetante e conservante (formalina) (IARC 2004). O grupo de trabalho, concluiu que o formaldeído é cancerígeno para os seres humanos sendo este a causa do câncer

de nasofaríngе em seres humanos. Pelo anterior o desenvolvimento de resinas livres de formaldeido se apresentava como uma alternativa para reduzir a exposição de pessoas.

A resina poliuretana a base de óleo de mamona pode ser misturada e curada à temperatura ambiente, é não agressiva aos seres humanos e ao meio ambiente, e tem boa resistência à radiação ultravioleta e água. Em particular, é compatível com a fibra das plantas devido à reação dos grupos isocianato do poliuretano com os grupos hidroxilo das fibras celulósicas (SILVA et al 2006). É importante salientar, que não produz emissões de formaldeído (WECHSLER, et al, 2013; GATANI, et al, 2014);

Muitos estudos tem sido desenvolvidos utilizando resina poliuretana à base de óleo de mamona na fabricação de painéis particulados: resíduos de espécies de reflorestamento (SARTÓRIO et al., 2013), resíduos de Pinus sp (BERTOLINI et al., 2013), bagaço de cana-de-açúcar (SARTORI et al., 2015), fibra de coco (FIORELLI J et al., 2015), sacas de cimento (CRAVO et al., 2015), casca de amendoim (GATANI et al., 2014). Fiorelli et al. (2014) avaliou painéis de resíduos de madeira *Pinus spp* com densidade de 0,6 e 0,8 g cm-3 produzidos com resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona e resina de ureia-formaldeído. Os resultados indicaram uma diferença significativa entre os painéis estudados onde os painéis produzidos com a resina poliuretana de óleo de mamona apresentaram propriedades superiores.

Como revestimento superficial, o óleo de mamona tem sido estudado a partir do seus epoxidos. Bechi et al. (2013) produziu filmes híbridos a partir de óleo de mamona expoxidado, junto com precursores orgânicos e inorgânicos. Os filmes apresentaram boa adesão à superfície de alumínio e submetidos ao teste de corrosão intensa apresentaram excelente proteção. Chang e Lu (2012) avaliaram um revestimento para madeira a partir de óleo de mamona preparado por transesterificação de glicerol junto com Hexametileno Disocianato (HDI). Os autores encontraram resistência à tração e resistência à água sendo apropriado para revestimentos de madeira.

O intemperismo natural da madeira é um processo complexo que envolve os efeitos de secagem e moagem, exposição à luz, congelamento e descongelamento, e exposição a substâncias químicas. O intemperismo causa primeiramente um efeito na superfície e isto particularmente não afeta as propriedades mecânicas da madeira. Principalmente esta relacionada com a aparência da madeira (DROCHYTKA & PETRÁNEK, 2007). Segundo Camargos & Gonzales (2001) a cor é uma das características mais importantes para a identificação e indicação de usos de espécies de madeira, principalmente quando associada aos aspectos de textura e desenho. Esta pode ser alterada com o teor de umidade, temperatura, degradações provocadas pelo ataque de organismos xilófagos ou, ainda, reações fotoquímicas dos elementos químicos presentes na sua estrutura. Um dos sistemas mais utilizados para a medição de cores é o sistema CIELAB (Comissão Internacional de Iluminantes).

O presente trabalho teve como finalidade estudar os efeitos produzidos pela exposição ao intemperismo natural durante 3, 6 e 12 meses painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar, utilizando resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona (PU-mamona) comparando com painéis comerciais de partículas de madeira com ureia-formaldeído. Avaliou-se também a viabilidade do uso da resina poliuretana de mamona como revestimento superficial. Estudou-se a influência das condições ambientais da umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar e temperatura sobre o desempenho físico e a estabilidade dos painéis produzidos. As mudanças no comportamento mecânico foram igualmente observadas e reportadas.

2 Materiais e Métodos

2.1 Produção dos painéis particulados

Os painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e resina bicomponente à base de mamona foram produzidos seguindo as recomendações estabelecidas por (MALONEY, 1996) e adaptadas por (SARTORI, 2012). O processo iniciou com a coleta do bagaço de cana-de-açúcar em duas usinas da região de Pirassununga -SP. O material foi peneirado em malha de 2 mm para retirar as partículas mais finas. Posteriormente, foi picado em um moinho de facas com peneira de 8 mm e seco em estufa (60 °C) até atingir uma umidade de equilíbrio de 12%. Como aglomerante de partículas de bagaço de cana-de-açúcar foi utilizada resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona, sendo um dos componentes o poliol derivado do óleo vegetal, e o outro o disocianato polifuncional, em uma proporção de 2 partes de catalisador para 1 de poliol, sendo, 15% da massa. A resina e as partículas foram misturadas em um batedor planetário durante 3 minutos. Posteriormente, as partículas foram inseridas em um molde formador de painel (50x50 cm) e inserida em prensa termo-hidráulica a condições de 100°C e 5 MPa de pressão, por 10 minutos. O painel foi esquadrejado retirando as bordas para seu acabamento final, com espessura de 13 mm.

Foi adquirido o painel comercial denominado MDP com as seguintes dimensões 15x1830x2750 mm, confeccionado com partículas de eucalipto e resina uréia-formaldeído, com espessura de 15 mm.

2.2 Tratamentos lateral e superficial dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova de 27x5 cm de BCP e MDP foram submetidos a um selagem das bordas, com objetivo de diminuir a entrada de água por meio dessa superfície, durante os ensaios de envelhecimento natural e controlado (KOJIMA & SUZUKI, 2010) como apresentado na Figura 35 a e Figura 35b. Para o tratamento superficial, metade dos corpos-de-prova extraídos dos painéis comerciais (MDP) e não convencionais (BCP) foram revestidos superficialmente com resina poliuretana à base de óleo de mamona,

que continha 40% pré-poliol (catalisador disocianato polifuncional 1,6-hexametileno disocianato (HDI) e 60% poliol (a base de óleo de mamona) fabricado pela empresa Plural Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda. Este tratamento teve como objetivo avaliar a proteção do material, frente aos agentes (água, umidade e temperatura) e seus mecanismos de degradação durante a avaliação da durabilidade através dos ensaios de envelhecimento. De igual maneira verificar o efeito de proteção da resina de óleo de mamona como revestimento superficial. A resina foi aplicada utilizando uma pistola de ar comprimido. A Figura 35c, indica o procedimento adotado. Foram obtidos 4 grupos de corpos-de-prova BCP com revestimento BCPCR, BCP Sem revestimento BCPSR; MDP com revestimento MDPCR com revestimento e MDP sem revestimento superficial MDPSR, (Figura 35d).

Figura 35. (a) Selagem de bordas com massa acrílica, (b) Aplicação de selante e aplicação de verniz marítimo. Resina poliuretana à base de óleo de mamona: c) Aplicação de resina com pistola de ar comprimido d) Corpos de prova BCP com revestimento.

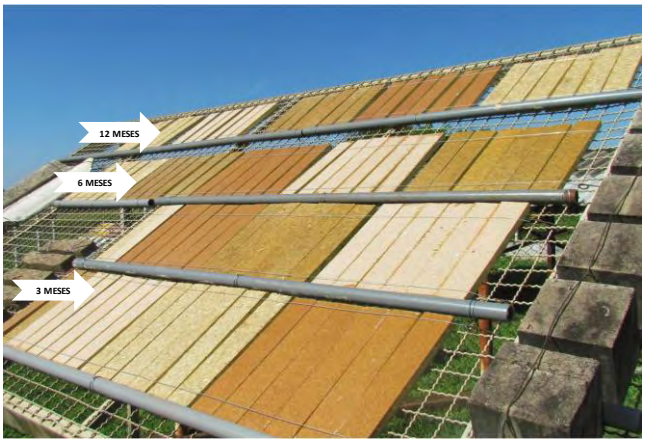
Fonte: Própria Autoria

2.3 Ensaio de envelhecimento Natural

O ensaio de envelhecimento natural foi realizado seguindo os procedimentos do documento normativo ASTM D 1435:1994- Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics, usado principalmente para materiais plásticos. Porém, com algumas modificações, pode ser utilizado para ensaiar outros materiais, como os compósitos particulados (NASCIMENTO, 2003). Este ensaio foi realizado no campus de exposição natural da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/USP, numa bancada metálica inclinada a 31º e voltada para a face norte (latitude 21° 59´S), em Pirassununga, Brasil. Os grupos de corpos-de-prova para o ensaio de envelhecimento foram colocados no dia 25 de junho de 2012 e expostos às intempéries durante 3, 6 e 12 meses. Radiação solar, precipitação total, temperatura e umidade relativa foram analisados para o período de exposição total de acordo com os dados disponibilizados

pela estação meteorológica da Universidade de São Paulo localizada no campo de exposição (Figura 36).

Figura 36. Bancada de exposição para envelhecimento natural



Fonte: Própria autoria

2.4 Propriedades Físico-mecânicas

Após 3, 6 e 12 meses de exposição foi realizada a avaliação das propriedades físico-mecânica dos corpos-de-prova dos painéis particulados BCP e MDP, com o objetivo de identificar as características críticas do desempenho físico-mecânico do material submetido a exposição natural e comparadas com os valores obtidos antes da exposição. As dimensões dos corpos-de-prova para o calculo das propriedades fisco mecânicas avaliadas foram: 270x50 mm para Modulo de Ruptura (MOR), Módulo de elasticidade (MOE) e Inchamento em espessura (IE), 50x50mm para Adesão interna (AI) e densidade aparente (DA).

Após o tempo de exposição os corpos-de-prova foram acondicionados a uma temperatura de 20°C e 65% de umidade relativa por uma semana. O equipamento utilizado para este ensaio foi a Máquina Universal de Ensaios, modelo DL30000, marca EMIC do Laboratório de Construções e Ambiência da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo – FZEA USP Pirassununga, seguindo as recomendações da NBR 14810:2006. Os valores obtidos foram comparados aqueles estabelecidos pelas normas NBR 14810:2006, NBR 14810:2013, ANSI A208.1 (1999), CS236-66 (1968) e EN 312 (2003) apresentados na Tabela 26.

Tabela 26. Requisitos estabelecidos para chapas de partículas de madeira.

Normas	Tipo	Espessura da chapa (mm)	MOR (MPa)	MOE (GPa)	AI(MPa)	IE max (%)	DA(Kg/m³)
14810:2 (2006)		8 a 13	18	NE	0,40	8	551-750
		14 a 20	16	NE	0,35	8	
14810:2 (2:2013)	P2	>6 a 13	11	1,8	0,40	18	
		>13 a 20	11	1,6	0,35	18	
	P3	>6 a 13	15	2,06	0,45	17	
		>13 a 20	14	1,95	0,45	14	
ANSI A208.1 (1999)	M 1	NE	11,0	2,25	0,40	8	640 a 800
	M 2	NE	14,5	2,75	0,45	NE	
	M 3	NE	16,5	1,73	0,55	NE	
CS236-66 (1968)	1	NE	11,2	2,5	0,42	30	600a 800
	2	NE	16,8	2,8	0,49	35	
EN 312 (2003)	P2*	>6 a 13	13	1,8	0,40	NE	
		>13 a 20	13	1,6	0,35	NE	
	P3*	>6 a 13	15	2,05	0,45	14	
		>13 a 20	14	1,95	0,45	14	
	P4*	>6 a 13	16	2,3	0,40	16	
		>13 a 20	15	2,3	0,35	15	

MOR: Módulo de Ruptura ; MOE:Módulo de Elasticidade; AI: Adesão Interna IE: Inchamento em espessura P2: Painéis não estruturais para uso interno em condições secas P3: Painéis não estruturais para condições úmidas. P2*: Painéis para uso inerno em condições secas P3*: Painéis não estruturais para condições úmidas. P4*: Painéis estruturais para uso em condições secas. NE: Não Especificado

Após o tempo de exposição o inchamento em espessura foi medido e comparado com os valores obtidos antes da exposição calculando o inchamento em espessura permanente de acordo com a Eq.8 Onde IE_f é o valor final de inchamento em espessura e IE_i e o valor inicial.

$$IE\ permanente: \frac{IE_f - IE_i}{IE_i}\ x\ 100 \qquad \text{Eq. 8}$$

De igual maneira foram calculados os percentuais retidos de cada propriedade mecânica AI, MOE, MOR após o envelhecimento, de acordo com a Eq 9. Onde V_f é o valor final da propriedade após cada tempo de exposição 3,6 e 12 meses e V_i é o valor inicial da propriedade (DEL MENEZZIet al.,2008).

$$Retenção\ (\%) = \frac{V_f}{V_i}\ x100 \qquad \text{Eq. 9}$$

2.5 Análise de Cor e Brilho

Neste estudo, os efeitos do desgaste exterior sobre as propriedades dos painéis a base de bagaço de cana-de-açúcar e de madeira, com e sem revestimento superficial, foram avaliados através da comparação da cor, conforme o tempo de exposição. A cor da superfície dos compósitos, tratados e não tratados, foi avaliada com um espectrofotômetro Minolta CM-2500D (Konika Minolta Sensing Inc., Japão). Onde o sistema identifica a cor da superfície através dos seguintes parâmetros colorimétricos L*, a*, b*, onde * L é variação do branco ao cinza (luminosidade) e as coordenadas cromáticas onde, a* representa a variação do vermelho ao verde, b* representa a variação do amarelo ao azul.

Para mensurar as alterações na cor nos painéis BCP e MDP, após a aplicação dos tratamentos de envelhecimento natural, para cálculo das diferenças entre as cores das faces dos corpos-de-prova utilizou-se a variação total da cor, metodologia adotada por diversos autores para madeira (BARRETO;PASTORE, 2009; SILVAet al., 2007; PASTORE, 2004) e compósitos de madeira e plástico (BUTYLINA et al., 2012), de acordo com a Eq 10.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Eq. 10

Onde ΔL*, Δa* e Δb* representam a diferença entre os valores iniciais e finais dos L* a* e b*.

Os valores obtidos de cor foram processados no programa Excel para que as variáveis colorimétricas utilizadas pelo sistema CIELAB 1976 pudessem ser avaliadas. Para análise final foram calculados valores médios das leituras feitas para cada parâmetro colorimétrico.

2.5.1 Fotografias digitais, de microscópio óptico e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Fotografias digitais: As mudanças durante a exposição natural nos corpos-de-prova foram registradas com imagens fotográficas dos corpos-de-prova durante o período de exposição natural.

Microscopia eletrônica de varredura (MEV): A Microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica capaz de produzir imagens de grande magnitude da superfície de uma amostra. Foram retiradas amostras com dimensões de aproximadamente 15x15 mm, dos corpos-de-prova de cada um dos períodos de exposição 3, 6 e 12 meses. As imagens foram obtidas em um microscópio da marca Hitachi e modelo Analytical TableTop Microscope TM3000 , do laboratório multiusuários do Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP). As amostras foram fixadas em um stub com fita de carbono dulpa face

condutiva e as micrografias foram obtidas por elétrons retroespalhados (BSE), utilizando-se uma tensão de aceleração de 15kV, amplificação de Mag de x250k, x500k e x1,0k a uma distância de trabalho (WD) de entre 5,0 e 5,7 mm.

2.5.2 Análise Estatística

A possível heterogeneidade de variâncias nos diferentes tempos de envelhecimento foi testada utilizando os Critérios de Informação de Akaike (AIC) e Bayesiano ou de Schwarz (BIC) utilizando o proc glimmix do SAS(R), em ajustes feitos com duas diferentes estruturas de covariâncias (VC: variance components e VC com group = Tempo) para condição dos tempos de envelhecimento (0, 3, 6 e 12 meses). Por estes critérios, o melhor modelo é aquele que apresenta o menor AIC (ou menor BIC).

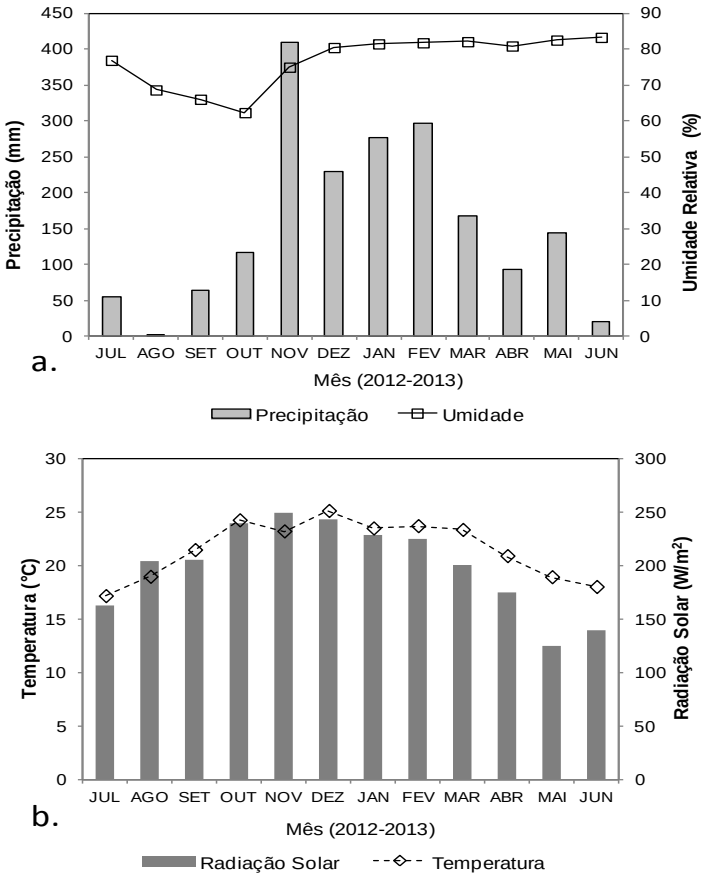
3 Resultados e discussão

3.1 Condições climáticas de exposição dos painéis

As condições climáticas durante o tempo de exposição dos corpos-de-prova são apresentadas na Figura 37a e Figura 37b. Os valores de umidade relativa alcançaram valores mínimos próximos de 60% apresentados no mês de outubro. No entanto os maiores valores de precipitação corresponderam ao mês de novembro >400 mm seguidos dos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro que correspondem ao período de verão e que consequentemente aumentou as porcentagens de umidade (Figura 37a).

De igual forma para os parâmetros meteorológicos de radiação solar e temperatura durante a maior parte do ano são obervados valores altos com exceção da estação de inverno marcada pelos meses de Maio, Junho e Julho onde são apresentados os valores mais baixos de temperatura <19°C. De outubro a Março são apresentados os maiores valores de temperatura acima de 23°C, sendo Dezembro o mês de maior valor de temperatura media apresentada com 25°. Valores de radiação solar acima de 220W/m^2 foram apresentados entre os meses de outubro e Janeiro. O maiores valores de radiação observados foram apresentados no mês de Novembro com 249 W/m^2 (Figura 37b).

Figura 37. Gráficos de parâmetros meteorológicos (c) Radiação solar e temperatura e (d) precipitação e umidade relativa. Estação Campus FZEA/USP.



Fonte: Própria autoria

Segundo Drochytka & Petránek (2007) a umidade e a temperatura afetam os processos biológicos, químicos e mecânicos de deterioração. A formação de uma camada de umidade na superfície do material depende da precipitação e isto pode ser o resultado da absorção da água pela superfície do material. Assim uma superfície com umidade tem melhores possibilidades de aderência de gases solúveis em água.

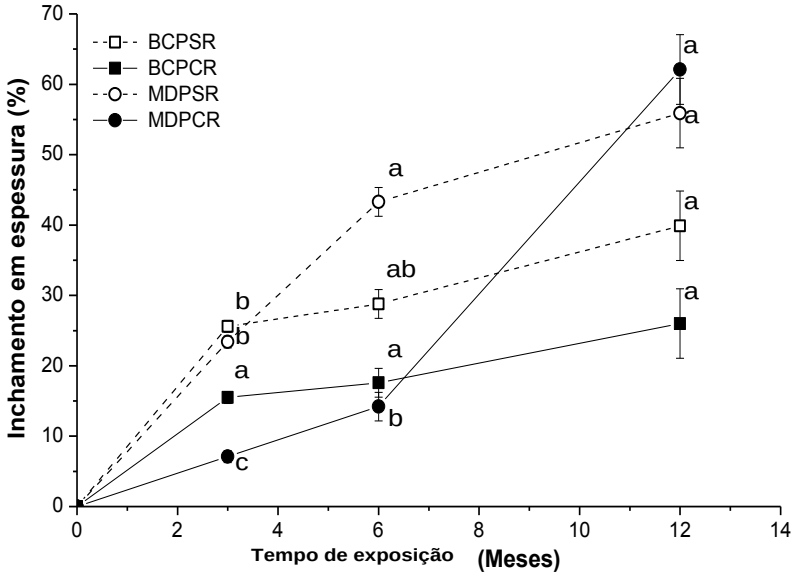
3.2 Inchamento em espessura:

A Figura 38 mostra os resultados de inchamento de espessura residual, após o envelhecimento natural após 3, 6 e 12 meses de exposição ao intemperismo natural, assim como a influência de alguns parâmetros meteorológicos em função do tempo exposição dos corpos-de-prova BCP e MDP, com e sem revestimento superficial. Pode-se observar um aumento de inchamento na espessura em todos os materiais expostos, isto é devido a variação das condições climáticas durante a exposição.

A Figura 38a apresenta a variação do inchamento na espessura dos corpos-de-prova BCP e MDP, com e sem revestimento superficial, no período de exposição ao ar livre. Pode-se observar um aumento de inchamento na espessura em todos os materiais expostos. Durante os três primeiros meses nos corpos-de-prova com revestimento superficial (BCP CR) e (MDP CR) o inchamento na espessura aumentou em até 15% e 7% respectivamente e nos sem revestimento (BCP SR) e (MDP SR), ambos materiais apresentara valores acima de 20%. Esse resultado pode ser atribuído ao período de chuva inicial apresentado durante os três primeiros meses de exposição aumentando a umidade relativa iniciando a degradação dos materiais.

Okuda e Sato (2008) estudaram painéis tipo *binderless* confecionados a 180°C, expostos ao ar livre, em Maio de 2004 em Tokyo, Japão (35° 42′ 59.0″N, 139° 45′ 40.6″E) durante 23 meses e encontraram valores de inchamento na espessura abaixo de 10% durante os três primeiros meses com um índice pluviométrico de 285 mm. No entanto no caso de Pirassununga esse índice foi de 572 mm o que possibilitou o aumento do inchamento nos materiais expostos. No segundo trimestre correspondente entre os meses de Outubro e Dezembro se apresentou um aumento nos parâmetros meteorológicos de precipitação, umidade relativa, temperatura e radiação solar, incrementando da mesma forma o inchamento em espessura em ambos os materiais. O incremento da umidade relativa do ar causa deterioração devido aos tempos prolongados de altas umidades que aumentam a deposição de partículas, poluentes e favorecem a biodeterioração (DROCHYTKA & PETRÁNEK , 2007).

Figura 38. (a) Alteração inchamento na espessura em função do tempo de exposição.



Fonte: Própria autoria Médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma serie não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey (p valor > 0,05)

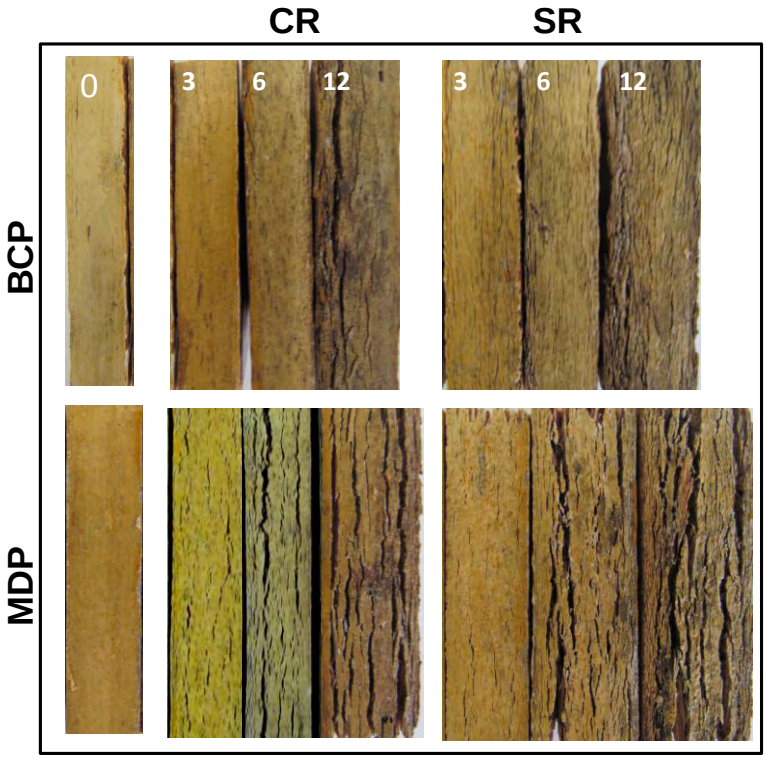
Como esperado o inchamento em espessura variou significativamente em função da precipitação, principalmente dos corpos-de-prova sem revestimento superficial, independentemente do material. Nos corpos-de-prova com revestimento superficial (BCP CR) e (MDP CR) o inchamento na espessura aumentou em até 15% e nos sem revestimento (BCP SR) e (MDP SR) acima de 20%. Esse resultado pode ser atribuído ao período de chuva apresentado durante os três primeiros meses. Segundo Kamal et al. (2007) o inchamento na espessura representa a estabilidade dimensional e microestrutural do compósito particulado (Figura 39).

Observam-se diferenças significativas entre os corpos-de-prova sem revestimento (MDPSR) e (BCPSR), que apresentaram valores de inchamento na espessura de 43% e 29%, respectivamente. A mesma tendência ocorreu para os materiais com revestimento superficial, ou seja, o material MDPCR apresentou maior inchamento na espessura em comparação aos materiais BCPCR.

Os corpos-de-prova BCP apresentaram um melhor desempenho físico em relação ao MDP. Após um ano de exposição ao intemperismo natural os corpos-de-prova correspondentes aos painéis comerciais MDP de partículas de madeira de eucalipto com revestimento (MDPCR) e sem revestimento (MDPSR) apresentaram um comportamento similar mostrando porcentagens acima de 50% de inchamento em espessura. Petric *et al.* (2007) indicam que é a umidade excessiva que pode trazer consequências na estabilidade dimensional do material resultando no desenvolvimento de tensões entre a interface da madeira e o revestimento. Por isso é devido aos agentes de degradação presentes na exposição natural (água em forma de umidade e precipitação, temperatura), foram possivelmente os causadores das tensões entre o revestimento superficial e a interface nas camadas externas dos corpos-de-prova.

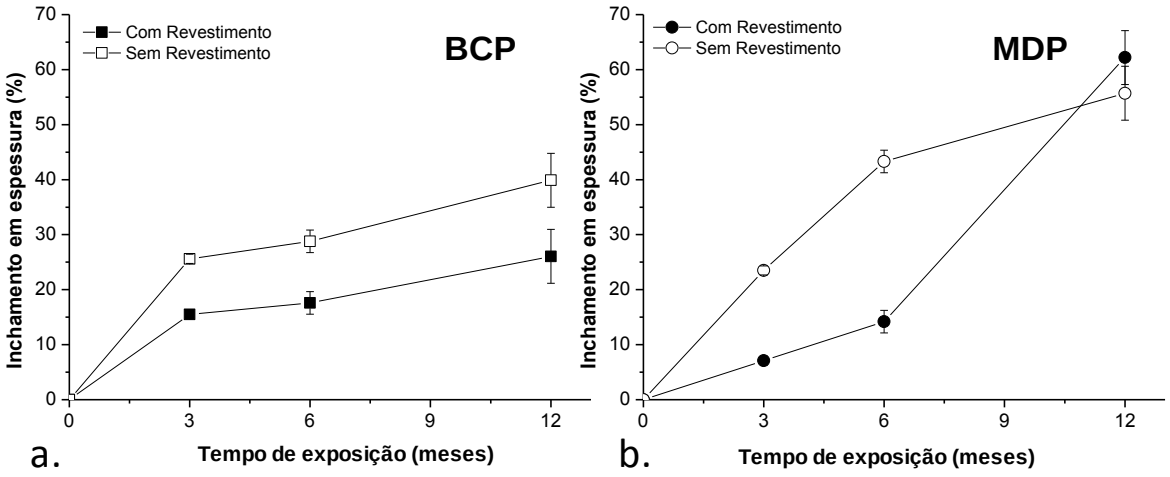
A Figura 39 mostra extremidades dos corpos-de-prova durante o tempo de exposição ao intemperismo natural. Pode-se observar a delaminação na borda dos corpos de prova depois de 3 meses de exposição ao ar livre, numa maior proporção para os sem revestimento superficial. Esta delaminação continuou-se apresentando nos períodos de exposição 6 e 12 meses, diminuindo a adesão das partículas, aumentando o inchamento devido à penetração da água pelas fissuras e vazios. Isto pode se apresentar devido às tensões de inchamento e encolhimento às que foram submetidos os materiais durante as mudanças das condições climáticas (DEL MENEZZI et al, 2008). Os autores estudaram painéis comerciais Oriented strandboard (OSB) durante 8 meses e obtiveram valores próximos de 20% para painéis sem revestimento.

Figura 39. Bordas de corpos de prova de painéis de partículas comerciais MDP e partículas de bagaço de cana de açúcar BCP ao longo do tempo de exposição; Com revestimento superficial (CR) Sem revestimento (SR).



A Figura 40a apresenta os gráficos do desdobramento para os valores obtidos em cada material (BCP e MDP) com e sem revestimento superficial, após o ensaio a intemperismo natural. Pode-se observar que durante o tempo de exposição o inchamento em espessura para BCP com revestimento, apresentou um melhor desempenho com valores inferiores de inchamento em espessura. Isto pode ser explicado pela ação da resina poliuretana de óleo de mamona usada como revestimento superficial. A Figura 40b de igual forma para os corpos-de-prova de MDP, apresenta uma diferencia significativa entre os corpos-de-prova revestidos e não revestidos. No entanto ao final do período de exposição os materiais com e sem revestimento superficial apresentaram um desempenho similar devido à causa das condições meteorológicas apresentadas.

Figura 40. Inchamento na espessura em função do tempo de exposição e revestimento superficial. (a) BCP (b) MDP



Fonte: Própria autoria

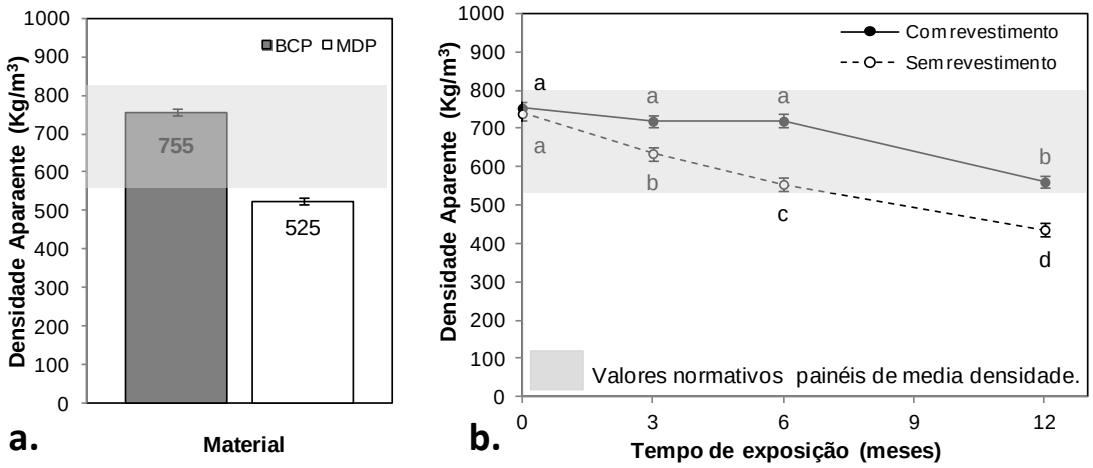
3.3 Densidade Aparente

A análise estatística realizada, indica uma diferença estatística entre ambos os materiais BCP e MDP (p valor <.0001) e uma interação dupla entre (revestimento superficial x tempo de exposição) com um (p valor 0,0004) ao α=0,05. A Figura 41 apresenta os valores obtidos para densidade aparente em ambos os materiais assim como o efeito do revestimento superficial durante o tempo de exposição. Comparando com os valores preconizados citados na Tabela 23, antes da exposição pode observar-se que os corpos-de-prova de ambos os materiais se encontram dentro dos valores estabelecidos pelas normas.

Os resultados indicam que os corpos-de-prova de BCP independentemente do tempo de exposição e do revestimento apresentam valores que se encontram dentro dos estabelecidos pelas normas (Figura 41a). Isto pode ser explicado pela diferença no inchamento em espessura encontrado nos materiais. Na Figura 41b pode se observar o efeito do revestimento superficial durante o tempo de exposição. Os materiais revestidos superficialmente conseguiram manter durante os 6 primeiros meses de exposição, valores dentro das normatividades sem apresentar diferença estatística.

Nos materiais sem revestimento apresentou-se uma diminuição progressiva da densidade desde os primeiros três meses de exposição até alcançar valores inferiores aos estabelecidos pela normatividade. Segundo Del Menezzi et al. (2008) valores altos de inchamento em espessura e redução na densidade podem contribuir substancialmente na redução nas propriedades mecânicas dos painéis e sua resistência.

Figura 41. Densidade aparente (Kg/m³). (a) Efeito do material BCP e MDP e (b) Efeito do revestimento e tempo de exposição.



Fonte: Própria autoria

Os valores para densidade aparente e % retido são apresentados na Tabela 27. Pode-se observar que os painéis sem revestimento superficial foram afetados em maior proporção em relação aos painéis com revestimento superficial. Valores similares de % de retenção de densidade aparente para BCPCR (80%) aos obtidos por Del Menezzi et al. (2008) em painéis tipo OSB após 8 meses de envelhecimento (80,3%).

Tabela 27. Valores médios e % de Retenção para Densidade aparente (Kg/m3) de painéis BCP e MDP submetidos ao intemperismo natural.

Material	Revestimento	0	3Meses		6Meses		12Meses	
		Média	Média	% Retido	Média	% Retido	Média	% Retido
BCP	Sem	849	749	88	704	83	568	67
BCP	Com	859	802	93	831	97	691	80
MDP	Sem	618	544	88	412	67	309	50
MDP	Com	639	636	99	598	94	439	69
Erro Padrão					16,93			

Diferentes mecanismos de deterioração podem ser observados na Figura 42. Nos painéis particulados de bagaço de cana-de-açúcar com revestimento (BCPCR) após os três primeiros meses aparecem cavidades ocasionadas pelo rompimento da resina superficial, isto devido à ação da temperatura e radicação solar na resina, assim mesmo pode ser observado o aparecimento inicial de alguns fungos emboloradores. Segundo Scheffer (1973) dentro das primeiras manifestações visíveis de deterioração por fungos se encontram uma superfície suave, falta de brilho e aparecimento de manchas apresentando uma descoloração irregularmente distribuída.

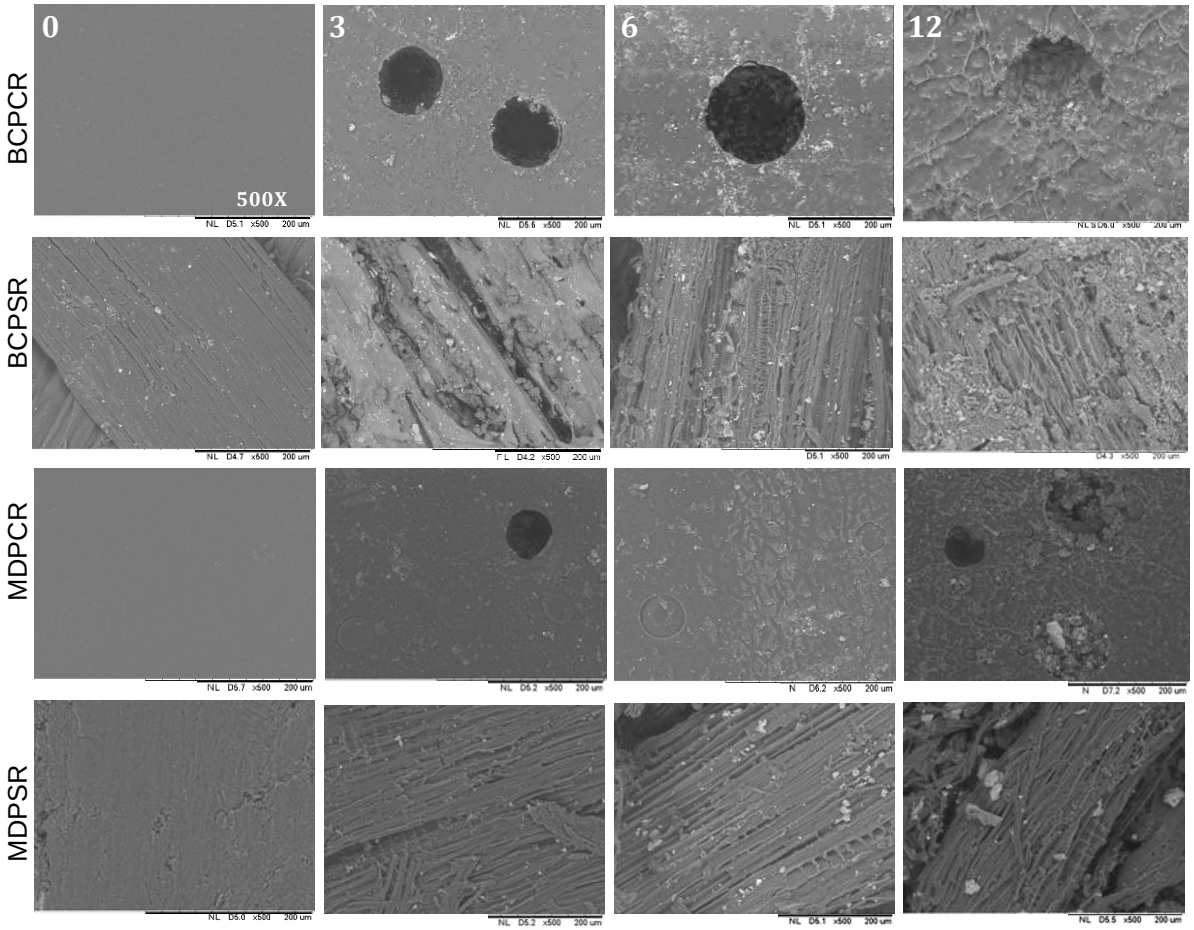
Após 6 meses a colonização dos fungos emboloradores aumenta através das cavidades, a superfície do corpo-de-prova apresenta erosão. Ao final da exposição pode se observar grandes áreas cobertas pelo micélio de fungos emboloradores. Para o caso dos materiais sem revestimento superficial, a degradação apresentada começa a partir dos 3 meses de exposição, pode-se observar a degradação das fibras e o aparecimento da erosão superficial em ambos materiais BCPSR e MDPSR.

Após 6 meses de exposição com o aumento da precipitação, radiação solar e temperatura os corpos-de-prova sem revestimento apresentaram um maior desarranjo entre as fibras, deterioração e exposição de poros e cavidades permitindo a entrada de umidade e água. E finalmente após 12 meses de exposição, os corpos-de-prova de bagaço de cana-de-açúcar com revestimento BCPCR não apresentaram diferença significativa nos valores encontrados ao longo do período de exposição e presencia de algumas cavidades superficiais geradas pela degradação da resina poliuretana à base de óleo de mamona, utilizada como revestimento superficial, pelo que pode se inferir é que existe uma capacidade do material em absorver umidade e manter sua estabilidade dimensional como encontrado por Garay (2009) indicando que a dessorção da água no material acontece de forma mais rápida que a absorção.

De outro lado os corpos-de-prova de MDPCR apresentaram uma deterioração comparado com aqueles sem revestimento. Esse comportamento pode ser explicado segundo Fiorelli et al. (2015) pela expansão da resina poliuretana à base de óleo de mamona, que ocupa os poros entre as partículas, reduzindo a taxa de absorção de água e consequentemente o inchamento em espessura.

Garay, (2009) estudou painéis OSB estruturais durante 12 meses. Mesmo este estudo não utilizando painéis estruturais permite compreender alguns fenômenos associados ao comportamento dos materiais testados frente às mudanças nas condições meteorológicas. A autora indica que o ingresso da água e ação da umidade ao interior do material se transformou num aumento do inchamento em espessura. As tensões geradas dentro de um material aglomerado dependem de fatores como a orientação das partículas, a densidade, o tipo e conteúdo dos adesivos. Além disso essas tensões são incrementadas pelas condições climáticas circundantes.

Figura 42. Imagens de microscopia eletrônica de varredoura em painéis particulados após 12 meses de exposição (a) BCPSR sem revestimento (b) MDPSR com revestimento superficial.



Fonte: Própria autoria

3.4 Propriedades mecânicas

Para as três propriedades mecânicas de MOE, MOR e AI foram encontradas, interações significativas para as três fontes de variação: tipo de material (BDP/MDP), revestimento superficial (Com/Sem) e o tempo de exposição ao ar livre (3,6 e 12 meses) em relação aos corpos–de-prova controle (referência). Módulo de elasticidade (p= 0,0002), Módulo de Ruptura (p <.0001); Adesão interna (p <.0001). Esse resultado mostra que as fontes de variação analisadas não atuam independentemente e que as condições climáticas a que foram submetidas os materiais influenciaram as propriedades mecânicas das amostras de maneiras distintas.

A Tabela 28 lista os valores iniciais, o erro padrão e as porcentagens de retenção para cada uma das propriedades avaliadas. Os resultados obtidos indicam que a longa exposição causou grande redução nos parâmetros de MOR, MOE e AI e um incremento na variabilidade nos dados (KORAI et al. 2013). Mudanças na temperatura conduzem a um gradiente térmico entre a camada superficial e interna dos materiais particularmente em materiais com baixa condutividade térmica o qual resulta numa diminuição das propriedades mecânicas do material e pode conduzir a formação de finas fissuras (DROCHYTKA & PETRÁNEK, 2007) .

Módulo de Elasticidade: Comparando com os requisitos citados na Tabela 23 antes da exposição pode se observar que os corpos-de-prova de painéis de bagaço de cana-de-açúcar (BCP) apresentam valores superiores aos estabelecidos pela NBR 14810:2 (2:2013) incluindo para painéis não estruturais para uso em condições secas e úmidas assim como para a norma ANSI A208.1 (1999) para as normas CS236-66 (1968) e EN 312 (2003) os valores não atingiram aos valores estabelecidos. Para os corpos-de-prova dos painéis de MDP os resultados mostram o cumprimento dos requisitos estabelecidos pelas normas. Com base nas considerações da análise estatística, foi encontrada diferença estatística entre os tipos de materiais e se contém ou não revestimento superficial (p valor 0,0002).

Tabela 28. Valores médios e os retidos das propriedades mecânicas para painéis particulados submetidos ao envelhecimento natural

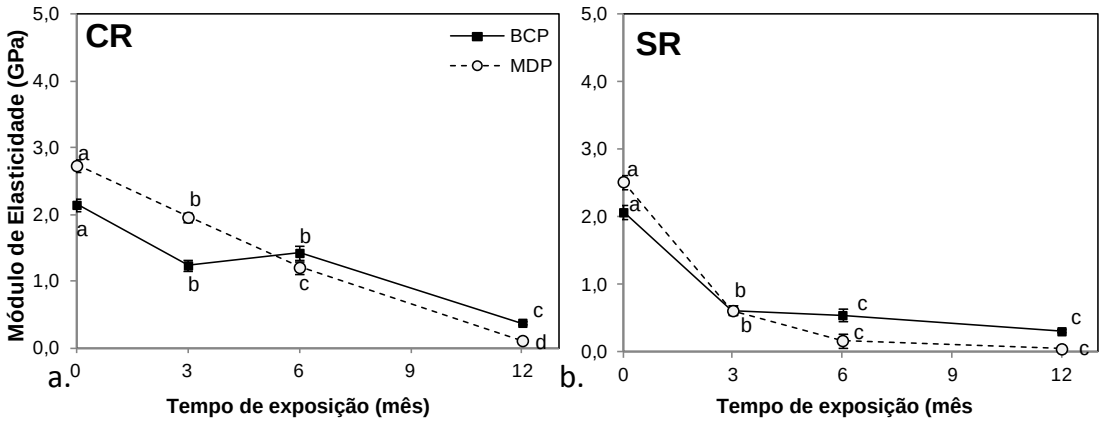
Propriedade	Material	Revestimento Superficial	Iniciais		3Meses			6Meses			12Meses		
			Média		Média		% Retido	Média		% Retido	Média		% Retido
Modulo de ruptura (MOR) MPa	BCP	Sem	17,9	A,b	6,85	B,b	38	7,95	B,b	44	3,53	C,b	20
	BCP	Com	21,7	A,a	14,7	B,a	68	16,5	B,a	76	7,47	C,a	34
	MDP	Sem	15,6	A,b	4,52	B,b	29	1,4	C,b	9	0,52	C,b	3
	MDP	Com	20,7	A,a	14,6	B,a	71	12,4	B,a	60	1,62	C,a	8
Erro Padrão			1,16		0,69			0,79			0,17		
Modulo de elasticidade (MOE) GPa	BCP	Sem	2,07	A,a	0,62	B,b	30	0,55	BC,b	27	0,31	C,a	15
	BCP	Com	2,15	A,a	1,24	B,a	58	1,43	B,a	66	0,38	C,a	18
	MDP	Sem	2,52	A,a	0,62	B,b	24	0,17	C,b	7	0,05	C,a	2
	MDP	Com	2,73	A,a	1,96	B,a	72	1,21	C,a	44	0,11	D,a	4
Erro Padrão			0,10		0,07			0,10			0,02		
Adesão Interna (AI) MPa	BCP	Sem	1,02	A,a	0,37	C,b	36	0,65	B,a	64	0,21	D,b	20
	BCP	Com	0,95	A,a	0,84	A,a	88	0,31	B,b	32	0,32	B,a	34
	MDP	Sem	0,45	A,b	0,08	B,b	19	0,03	B,b	6	0,00	B,a	0
	MDP	Com	0,60	A,a	0,31	B,a	51	0,20	B,a	33	0,01	C,a	1
Erro Padrão			0,04		0,03			0,03259			0,02		

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey (P<0,05). Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste T (P<0,05). Em cada propriedade avaliada.

O MOE retido após os 3 primeiros meses dos corpos-de-prova com revestimento superficial apresentaram valores para BCPCR (60%) e MDPCR (97%) respectivamente. Após 6 meses de exposição os corpos-de-prova de BCPCR não apresentara diferença estatística no desempenho em relação ao tipo de material MDPCR. Finalmente após 12 meses de exposição ambos os materiais apresentaram uma ampla diminuição no MOE e uma porcentagem de retenção de BCPCR (18%) e MDPCR (4%) apresentando diferencia estatística entre eles (Figura 43a). Kojima et al. (2011) assinalam que as propriedades de flexão estão relacionadas com a deterioração da superfície dos painéis, assim uma menor precipitação foi necessária para progredir a deterioração da superfície nos painéis o que contribuiu para a diminuição de suas propriedades.

Ambos os tipos de materiais sem revestimento apresentaram a mesma porcentagem de retenção após 3 meses: BCPSR (30%) e MDPSR (24%). No entanto após 6 meses o comportamento entre os dois materiais mostra uma grande diferença BCPSR (27%) e MDPSR (7%). Ao finalizar o período de exposição os corpos-de-prova de MDPSR só conseguiram reter 2% da propriedade enquanto que BCPSR (15%) como pode ser obrsevado na Figura 43b.

Figura 43. Efeito do revestimento superficial e tempo de exposição ao envelhecimento natural no módulo de elasticidade: (a) Com revestimento superficial -CR (b) Sem revestimento superficial –SR.



Fonte: Própria Autoria

Módulo de Ruptura: Com base nas considerações da análise estatística, foi encontrada diferença significativa entre os tipos de materiais e se contém ou não revestimento superficial (p valor 0,0001). A porcentagem de retenção após os 3 primeiros meses dos corpos-de-prova com revestimento superficial dos materiais foi BCPCR (68%) e MDPCR (71%) apresentando um comportamento similar. Após 6 meses de exposição a porcentagem de retenção para ambos materiais foi BCPCR (76%) e MDPCR (60%) e foi apresentada uma diferença estatística entre ambos os materiais, sendo o BCPCR o

material com melhor desempenho, o qual foi mantido até o final do período de exposição (Figura 44a).

Os valores obtidos para BCPCR cumpriram os valores estabelecidos pelas normas indicadas na Tabela 23. O valor de MOR apresentado para BCPCR após 12 meses foi de 7,47 MPa. Esse valor foi superior ao encontrado por Korai *et a.l* (2013) em painéis comerciais de fibras de média densidade MDF expostos durante 12 meses (5,36 MPa). As porcentagens de retenção após 12 meses para ambos os materiais foram para BCPCR (34%) e MDPCR (8%).

Os materiais sem revestimento superficial BCPSR e MDPSR, atenderam aos valores estabelecidos pelas normas indicadas na Tabela 23. Os valores obtidos para os materiais sem revestimento foram inferiores aos com revestimento. Ambos os materiais apresentaram uma queda abrupta durante os 3 primeiros meses de exposição assim como diferença estatística que foi mantida até o final da exposição. Após os 3 primeiros meses de exposição a porcentagem de retenção nos materiais foi para BCPSR (38%) e MDP SR (29%).

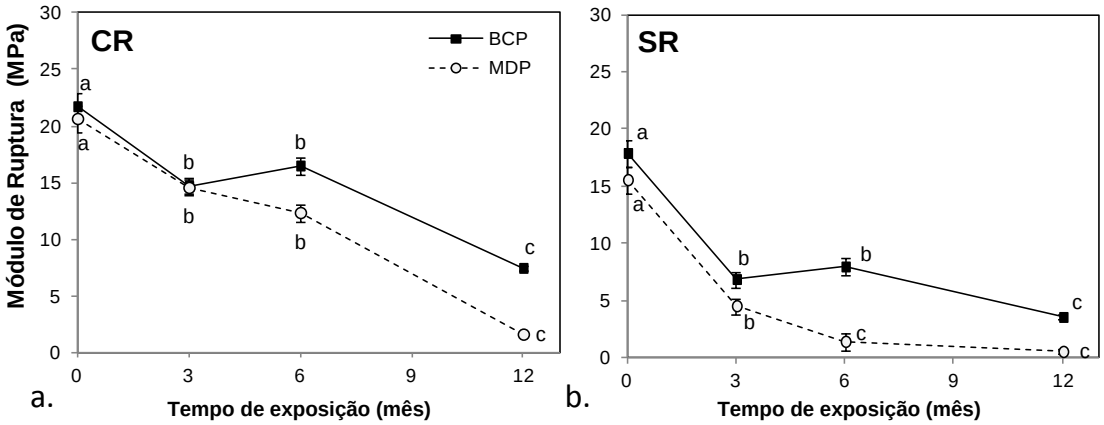
Após os 6 meses de exposição BCPSR não apresentou diferença estatística apresentando 44% de retenção. No entanto o MDPSR apresentou uma queda no valor do MOR com 1,4MPa representando 9%. Ao final do experimento BCPSR e MDPSR apresentaram 20% e 8% de retenção respectivamente. Desta forma a resina poliuretana à base de óleo de mamona utilizada como adesivo das partículas nos painéis de bagaço de cana-de-açúcar apresentou resultados superiores comparados com a resina ureia formaldeído utilizada como adesivo nos painéis de partículas comerciais MDP. (FIORELLI et al., 2012).

.

Segundo Okuda e Sato (2008) que avaliaram painéis tipo *binderless* durante um ano, relatam que as proporções de retenção das propriedades podem diminuir abruptamente numa fase inicial de exposição ao ar livre. Após os 3 primeiros meses de exposição pode se observar uma diminuição ampla principalmente no caso dos materiais sem revestimento superficial (Figura 44b). Os materiais com revestimento apresentaram um desempenho melhor que aqueles não revestidos. Isto pode ser explicado na Figura 42 onde a partir das micrografias iniciais pode se observar uma distribuição heterogênea das fibras envolvidas pela resina poliuretana à base de óleo de mamona.

Após os 3 primeiros meses ambos materiais BCP e MDP sem revestimento superficial apresentaram danificação nas fibras e na parede celular isto segundo reduzindo a propriedade mecânica e em alguns casos aumentando o inchamento em espessura(YE et al., 2007; BARROS FILHO et al., 2011). O aumento no dano das fibras pode ser observado após 6 e 12 meses para ambos os materiais, o que influenciou nos valores obtidos nas propriedades mecânicas.

Figura 44. Efeito do revestimento superficial e tempo de exposição ao envelhecimento natural no módulo de ruptura: (a) Com revestimento superficial -CR (b) Sem revestimento superficial –SR.



Fonte: Própria autoria

Adesão Interna: Os valores iniciais obtidos para adesão interna em ambos os materiais com e sem revestimento cumprem com os requisitos estabelecidos pelas normas citadas na Tabela 23. A porcentagem retida de adesão interna nos corpos-de-prova submetidos à exposição natural diminuiu em função do tempo. Com base nas considerações da análise estatística, foi encontrada diferença estatística entre os tipos de materiais e revestimento superficial (p valor <.0001). Desse modo, após o período de 3 meses de exposição natural, os painéis com revestimento superficial (BCPCR) apresentaram resistência de adesão interna retida acima de 88% em comparação com o dos painéis de partículas de madeira (MDPCR, 61%).

Para painéis de bagaço de cana-de-açúcar sem revestimento superficial (BCPSR), apresentaram AI retida de 36% e os de madeira sem revestimento (MDPSR) apresentaram o valor de 19%. Esta diferença pode ser atribuída ao tipo de resina usada para aglomerar as partículas e/ou fibras.

O efeito do intemperismo através da radiação solar, temperatura, e precipitação, ocasionaram na superfície dos materiais revestidos com a resina poliuretana à base de óleo de mamona cavidades que permitiram o ingresso de água nos materiais diminuindo os valores das propriedades. Okuda e Sato (2008) assinalam que a degradação superficial pode ocorrer principalmente devido aos efeitos combinados da luz ultravioleta e da precipitação e que esta pode ter uma influencia na redução da adesão interna das partículas no material.

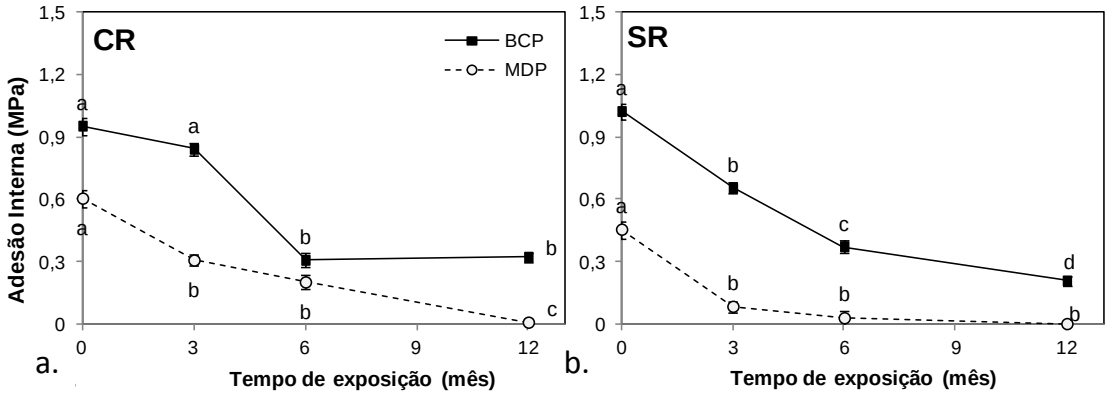
Após 6 meses, os painéis de bagaço de cana-de-açúcar, com e sem revestimento, apresentaram um melhor desempenho com relação à AI retida em comparação ao material MDP. Isto pode ser explicado pela ação de expansão da resina poliuretana de óleo de mamona que como foi dito anteriormente, que ocupa os poros entre as partículas.

Não houve diferença significativa entre os valores encontrados para BCPCR aos 6 meses (0,31MPa) e após 12 meses de exposição ao ar livre (0,32MPa). No entanto os corpos de prova de MDPCR apresentaram valores de 0,2MPa após 6 meses e após 12 meses a ligação interna das partículas foi próxima de zero (Figura 45a). Esse comportamento pode ser explicado pelas características internas de cada material, as partículas de *Eucaliptus sp* , e a resina ureia formaldeído apresentaram uma capacidade menor de resistir as condições meteorológicas apresentadas durante o período de exposição que as partículas de bagaço e a resina poliuretana de óleo de mamona.

Como pode se observar na Figura 45b os corpos-de-prova de BCPSR apresentaram um comportamento superior aos de MDPSR desde o inicio ao intemperismo natural, em ambos os casos é observada uma queda abrupta na adesão interna após os 3 primeiros meses de exposição. A diminuição da adesão interna continua em ambos os materiais. Os corpos-de-prova de BCPSR ao final da exposição conseguiram ter uma porcentagem de retenção de 20%, a diferênça dos MDPSR para os quais a adesão interna foi nula. Os danos apresentados nas fibras dos corpos-de-prova dos painéis sem revestimento, podem ter permitido o ingresso de água ao interior do material.

O comportamento mecânico dos materiais foi similar ao comportamento de outros tipos de materiais particulados. Kojima et al. (2012) estudaram painéis *Particle board (PB), Oriented Strands Board (OSB), PlyWood (PW) e Mendium Density Fiber (MDF)* submetidos a 7 anos de exposição ao ar livre em oito locais do norte e sul do Japão, entre abril de 2004 e março do 2011. Os pesquisadores constataram que a resistência da adesão interna depende do tipo de material, do revestimento superficial e do tempo de exposição ao ar livre.

Figura 45. Efeito do revestimento superficial e tempo de exposição ao envelhecimento natural na adesão interna: (a) Com revestimento superficial -CR (b) Sem revestimento superficial –SR.



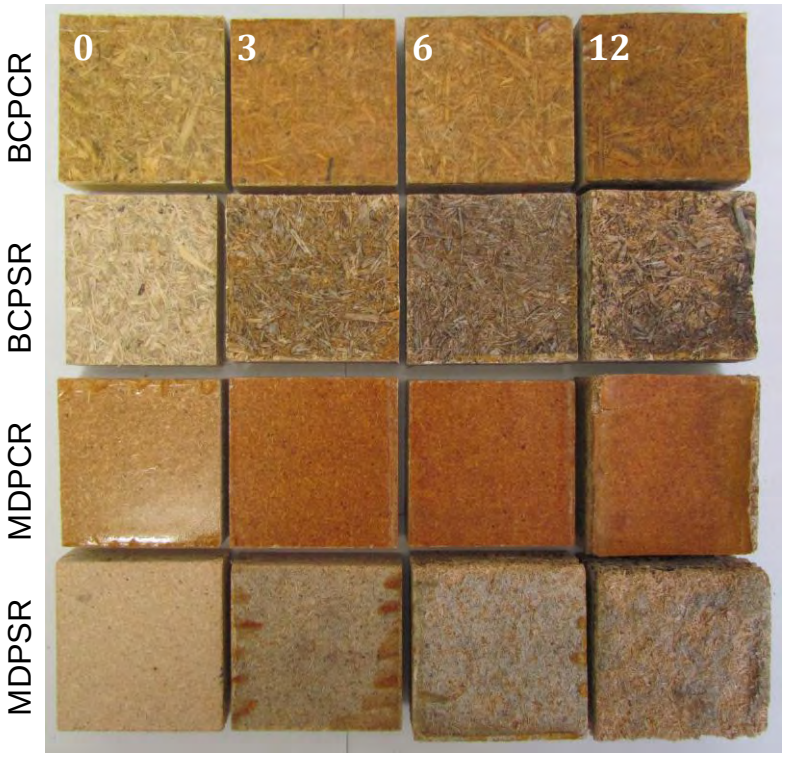
Fonte: Própria autoria

3.5 Mudanças na cor durante a exposição ao intemperismo natural

Os corpos-de-prova com revestimento superficial apresentaram um aspecto físico superior. Segundo Petric *et al* (2007) os produtos de madeira que são expostos ao ar livre são geralmente revestidos com acabamentos superficiais que tem como funções a proteção e a decoração. Essa função de proteção aponta principalmente no sentido dos fatores de degradação abióticos.

A Figura 46 mostra a apariência dos painéis particulados após diferentes períodos de exposição ao intemperismo natural, de forma geral ao final do período de exposição os painési BCPCR com revestimento mostraram uma maior estabilidade dimensional em relação aos MDPCR. No entanto os painéis MDPCR apresentaram perdas de elementos. Okuda e Sato (2008) encontraram perdas de elementos nos corpos-de-prova após os primeiros 3 meses de exposição natural. Para os corpos-de-prova de painéis sem revestimento mudanças significativas foram encontradas a partir dos 3 meses de exposição para ambos materiais.

Figura 46. Aparência dos painéis particulados BCP e MDP após exposição em intemperismo natural.



Fonte: Própria autoria

Os resultados de a*b* L*e ΔE* são apresentados na Figura 47 para a variação de cor em ambos os materiais BCP e MDP com e sem revestimento superficial, expostos ao intemperismo natural por 3, 6 e 12 meses. A análise de variância ANOVA apresentou

interação entre as fontes de variação (Material x Revestimento e Tempo de exposição) a* (p valor <.0001) b* (p valor 0,0184) L* (p valor 0.0024) e ΔE* (p valor <.0001).

Um incremento em L significa que a amostra apresenta mais claridade. Valores positivos de a* significam cores em direção ao vermelho, valores positivos b* indicam cores em direção ao amarelo indicado na Figura 47 no esquema em forma de cruz. Para os materiais em condições iniciais os valores das coordenadas a* e b* foram positivos, o que classifica as amostras no primeiro quadrante de cores no Sistema CIELAB 1976, padrão de comportamento esperado para a coloração de madeiras (CAMARGOS, 1999).

Os valores iniciais encontrados para os parâmetros colorimétricos a*, b*, L* para BCPSR foram similares aos encontrados em painéis *binderless* BL180 (5,69) e BL200 (5,3) fabricados com fibras de cânhamo, os valores de ΔE* são incrementados com o tempo de exposição (OKUDA;SATO, 2008).

Pode ser observado que após os três primeiros meses de exposição, caracterizado pelo inicio de chuvas, o aumento da temperatura e radiação solar nos materiais com revestimento apresentaram uma mudança de cor com tendência ao vermelho Figura 47a, e Figura 47b isto pode ser explicado pela ação da radiação UV exercida na resina poliuretana à base de óleo de mamona. A radiação solar ocasiona mudanças na temperatura nos materiais induzindo mudanças no volume e nos poros do material. Assim mesmo cumpre um papel importante nas reações fotoquímicas de divisão e união das moléculas (DROCHYTKA & PETRÁNEK, 2007).

No entanto esse comportamento para o BCPCR diminui após 6 e 12 meses de exposição. Os corpos-de-prova de MDPCR apresentaram uma mudança de cor homogênea a partir dos 3 meses de exposição até o final do estudo. Embora para BCPCR os valores obtidos para b* não apresentem diferença estatística com os valores (Figura 47e). O parâmetro colorimétrico de b* apresenta para o MDPCR um comportamento homogêneo ao longo do período de exposição. A claridade das amostras determinadas pelo L* mostra que as amostras com o tempo de exposição apresentaram uma tonalidade mais escura em ambos os materiais (Figura 47E). Isto pode ser obervado igualmente na Figura 46.

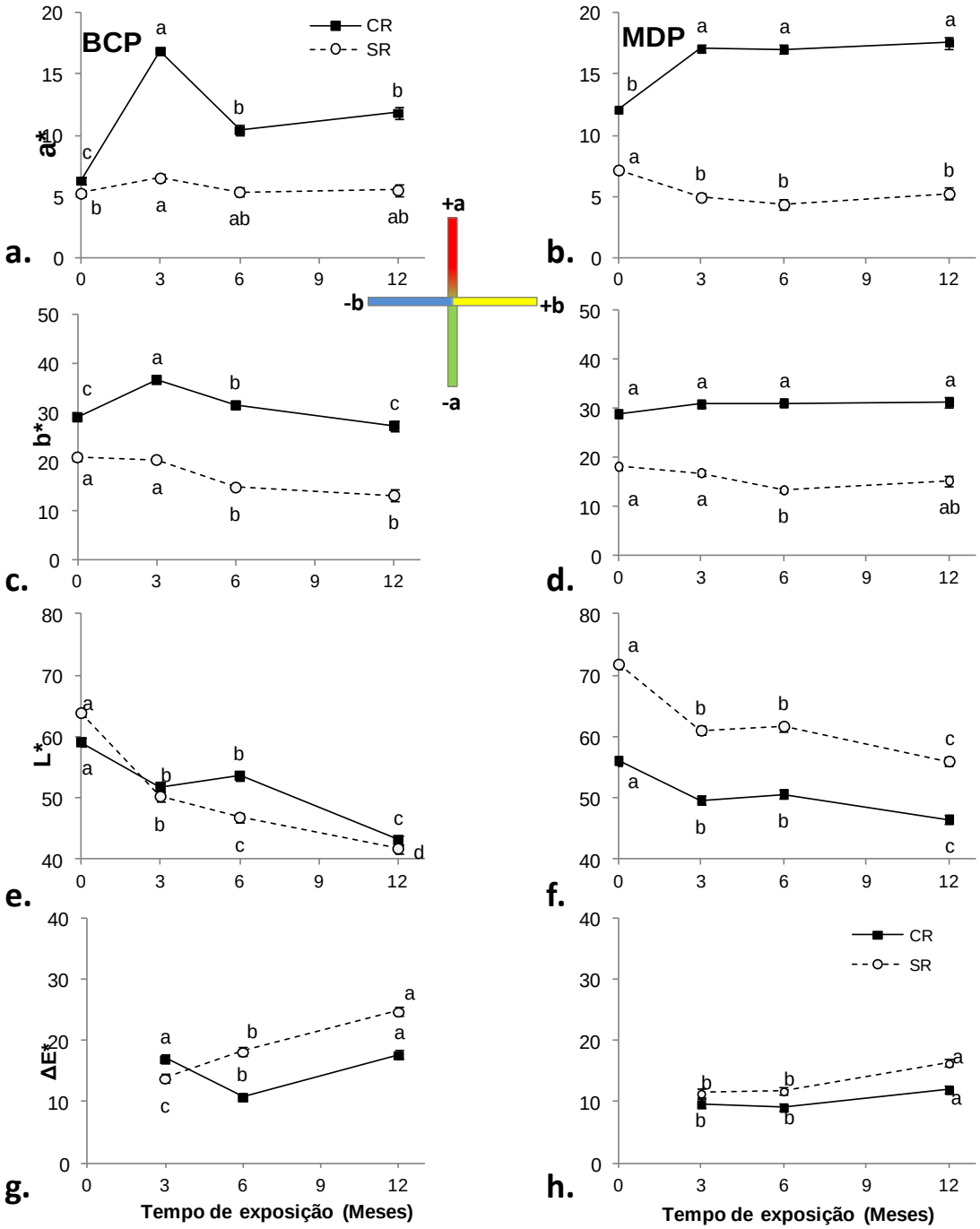
Os materiais não revestidos apresentam uma diminuição nos parâmetros colorimétricos a*e b*com o aumento do tempo de exposição, após os primeiros meses de exposição os corpos-de-prova exposto apresentaram mudança de cor com tendência ao cinza. Esses resultados coincidem com os encontrados por Okuda e Sato (2008) em painéis *binderless* e MDF expostos durante 12 meses. Segundo Drochytka & Petránek (2007) quando a madeira é exposta à atmosfera, o primeiro efeito observado corresponde à mudança na cor, no primeiro lugar de amarelo à marrom e comumente é observado cinza devido à degradação química da celulose.

O parâmetro L* relacionado com a claridade foi o parâmetro que apresentou maior diminuição com o tempo de exposição refletindo na tonalidade escura observada nos corpos-de-prova para ambos os materiais sem revestimento (Figura 47e e Figura 47f). É importante destacar que os corpos-de-prova de BCPCR e BCPSR ao final do tempo de exposição apresentaram o mesmo comportamento, isto é, que independentemente do revestimento o efeito da luz ultravioleta em ambos os materiais foi o mesmo. Os corpos-de-prova de MDPSR apresentaram uma tendência menor na diminuição do parâmetro L* observando tonalidades mais claras durante tudo o período de exposição como pode ser visualizado na Figura 46.

Segundo Evans (2013), a radiação UV, nitrogênio, oxigênio ou ar causam escurecimento na madeira durante as primeiras horas de exposição, assim mesmo temperaturas entre (130-150°C) são consideradas de transição vítrea da lignina na qual pode ocorrer uma degradação estrutural dos componentes químicos que ocorre aos 200°C. A alta temperatura pode acelerar a secagem da superfície da madeira gerando stress que pode causar separação das fibras.

A água representa um papel importante nos efeitos gerados pelo intemperismo na madeira. A água por efeito da lixiviação degrada a lignina e hemicelulose ocasionando uma fotodegradação da superfície da madeira e consequentemente também sob condições ambientais existe uma perda de massa. (EVANS K.J., et al 1993). Essa fotodegradação que ocorre na madeira não é filtrada pela madeira e é transformada em substancias escuras húmicas que influenciam na cor da superfície. Os resultados obtidos para ΔE mostram uma maior diferença de cor para ambos os materiais sem revestimento superficial BCPSR (24,8) e MDPSR (16,4) em comparação com os materiais com revestimento superficial BCPCR (17,7) e MDPCR (12,0) (Figura 47g e Figura 47H). Esses valores foram similares aos encontrados por Chang e Lu (2012) em um revestimento para madeira a partir de óleo de mamona preparado por transesterificação de glicerol junto com Hexametileno Disocianato (HDI) submetido a 100horas de radiação UV obtendo valores de 12,0.

Figura 47. Efeito do revestimento superficial nos materiais BCP e MDP sob a*, b*, L*, ΔE*. Valores após exposição ao intemperismo natural.



Fonte: Própia autoria

4 Conclusões

- O Revestimento superficial com a resina poliuretana à base de óleo de mamona manteve a resistência mecânica dos materiais, especialmente nos corpos-de-prova dos painéis particulados fabricados a partir de bagaço de cana-de-açúcar e resina poliuretana à base de óleo de mamona.

- Os efeitos do intemperismo causados pelos parâmetros meteorológicos como radiação solar, temperatura, precipitação e umidade provocaram diminuição nas propriedades físico-mecânicas de ambos os materiais avaliados BCP e MDP.

- O revestimento superficial com a resina poliuretana à base de óleo de mamona levou a um melhor comportamento nas propriedades mecânicas em ambos os materiais, no entanto, os painéis fabricados com partículas de bagaço de cana-de-açúcar apresentaram um melhor desempenho.

- A propriedade física de inchamento em espessura foi influenciada pelo intemperismo sendo os corpos-de-prova dos painéis de bagaço de cana-de-açúcar com e sem revestimento que obtiveram o melhor desempenho após os 12 meses de exposição. Isto é devido à ação da resina poliuretana de óleo de mamona utilizada como adesivo e revestimento superficial.

- As diferenças no comportamento mecânico para Módulo de elasticidade (MOE) entre os materiais, com e sem revestimento superficial foram observadas especialmente até os 6 meses de exposição. Após 12 meses os dois materiais apresentaram a mesma diminuição.

- Entre ambos os materiais MDP e BCP sem revestimento superficial o BCP apresentou um melhor comportamento mecânico após o tempo de exposição para MOR, MOE e AI. O que pode ser devido à ação da resina poliuretana de óleo de mamona utilizada como adesivo nos painéis de bagaço de cana-de-açúcar em comparação com a resina de ureia formaldeído.

- Foi identificada uma modificação na cor ΔE^* e brilho (L^*) em ambos os materiais principalmente nos sem revestimento. Comparando os dois materiais com revestimento os corpos-de-prova de bagaço de cana-de-açúcar BCPCR apresentaram uma menor estabilidade na cor e brilho que os MDPCR . No entanto os dois materiais após 12 meses apresentaram um comportamento similar em relação à esta tendência .

5 Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 1037** - Standard test methods for evaluating properties of wood-based fiber and particle panel materials. Philadelphia, 1996. p. 137-166.

____. **ASTM D 1435-94** - Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics, Philadelphia, 5 p. 1994.

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE (ANSI). **Particleboard ANSI A208.1-1999**. Gaithersburg: Composite Panel Association, 1999. 7 p. (Table A).

_____. **NBR 14810** - Chapas de madeira aglomerada - parte 3: métodos de ensaio, terminologia. Rio de Janeiro, 2002. 32 p.

_____. **NBR 14810–2/2013 -** Painéis de partículas de média densidade - parte 2: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. 69 p.

_____. **NBR 14810–2/2013 -** Painéis de partículas de média densidade - parte 2: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. 69 p.

BARRETO, C. C. K.; PASTORE, T. C. M. Resistência ao intemperismo artificial de quatro madeiras tropicais: o efeito dos extrativos. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 19, n. 1, p. 23-30, mar. 2009.

BARROS FILHO R. M et al . Hybrid chipboard panels based on sugarcane bagasse, urea formaldehyde and melamine formaldehyde resin. Industrial Crops and Products. V.33.p. 369–373. 2011.

BARROS, S. S. V.; MUNIZ, B. G. I;, MATOS, J. L. M. Caracterização Colorimétrica das Madeiras de Três Espécies Florestais da Amazônia. CERNE | v. 20 n. 3 | p. 337-342 | 2014.

BECHI D. M. et al. Organic–inorganic coatings based on epoxidized castor oil with APTES/TIP and TEOS/TIP. Progress in Organic Coatings. v.76. p. 736– 742. 2013.

BERTOLINI S. M. et al. Emprego de resíduos de Pinus sp tratado com CCB e resina PU de mamona na produção de chapas de partículas. Capitulo 2 de livro. Painéis de Partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos Organizadores: Francisco Antonio Rocco Lahr . André Luís Christoforo . São Carlos; EESC/USP,. ISBN 978-85-8023-019-2. p 23-55. 2013.

BUTYLINA, S; HYVÄRINEN, M; KÄRK, T. Accelerated weathering of wood–polypropylene composites containing minerals. Composites: Part A. v. 43 , p.2087–2094. 2012.

CAMARGOS, ; GONÇALEZ J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. Brasil Florestal, Ano XX, n. 71, p. 30-41, 2001.

CANGEMI, J. M. et al. Biodegradation of Polyurethane Derived From Castor Oil. Polímeros, v. XVIII, p. 201-206, 2008.

CHANG; LU. Natural castor oil based 2-package waterborne polyurethane wood coatings. Progress in Organic Coatings. V. 75.p 435– 443. 2012.

COMMERCIAL STANDARD. Mat formed wood particleboard. CS 236-66. 1968.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v. 1 – Safra 2014/15, n.4 – Quarto Levantamento**, Brasília, p. 1-29, abr. 2015. Disponível em:<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_04_13_08_45_51_boletim_cana_portugues_-_4o_lev_-_14-15.pdf>. Acesso em: 03 set. 2015.

COUTINHO FERNANDA M.B.; DELPECH MARCIA C. Poliuretanos como Materiais de Revestimento de Superfície. Polímeros: Ciência e Tecnologia. p 41-48. 1999.

CRAVO, J. C. M. et al . Manufacture of particleboard based on cement bag and castor oil polyurethane resin. Construction & Building Materials, v. 87, p. 8-15, 2015.

DEL MENEZZI C. H. S et al. Properties after weathering and decay resistance of a thermally modified wood structural board. International Biodeterioration & Biodegradation. V. 62. p 448–454. 2008.

DROCHYTKA R; PETRÁNEK V. Enviromental deterioration of materials. Editor. A. Moncmanovà. Chapter 8. Enviromental deterioration of building material. Slovak Technical University , Slovakia. ISSn:1368-1435. p. 312. 2007.

EVANS, K .J .; SCHMALZL, A .J; MICHEL. L. Rapid loss of lignin at wood surfaces during natural weathering. IRG/WP 92-2390. 1992 .

EVANS, P. D. Weathering of wood and wood composites. Handbook of Wood chemistry and wood composites. Second edition. Edited by Roger M. Rowell. 2013.

EUROPEAN STANDARD. EN 312: Particleboards – Specifications. British Standard. English version. Brussels; 2003.

FIORELLI J et al Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: An eco-efficient product. Industrial Crops and Products (Print),v. 40, p. 69-75, 2012.

FIORELLI, J. et al. Painéis de partículas monocamadas fabricados com resíduo de madeira e fibra do coco verde. Scientia Forestalis (IPEF), v. 43, p. 175-182, 2015.

FIORELLI, J. ; RAMOS, R. D. ; SAYAMA, J. T. ; GARZON, N. ; PALLONE, E. A. . Particleboards with waste wood from reforestation. Acta Scientiarum. Technology (Online), v. 36, p. 251-256, 2014.

GARAY R.M . Efectos de dos Protectores Superficiales en las Propiedades de Tableros de Madera después de un Año de Exposición a la Intemperie. Información Tecnológica . Vol. 20(4), p.123-130 . 2009.

GATANI, M. et al. New Process for Peanut Husks Panels: Incorporation of Castor Oil Polyurethane Adhesive and Different Particle Sizes. Key Engineering Materials (Online), v. 600, p. 452-459, 2014.

GONÇALEZ, J.C.; JANIN, G.; SANTORO, A.C.S.; et al. Colorimetria quantitativa: uma técnica objetiva de determinar a cor da madeira. Brasil Florestal, Brasília, ano 20, v. 72, p. 47-58, 2001.

HOLDSCHIP, R. A influência dos sistemas de gerenciamento de cores em provas digitais. Bauru, 123f. Dissertação (Mestrado em Desenho Industrial) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. IARC Classifies Formaldehyde As Carcinogenic to Humans. Press release No.153. Disponível: http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2004/pr153. html.

KOJIMA, Y.; SUZUKI, S. Evaluating the durability of wood-based panels using internal bond strength results from accelerated aging treatments. Faculty of Agriculture, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku, J Wood Sci Volume 57, p 7-13 Japan, 2010.

KOJIMA Y.;· SHIMODA T.;· SUZUKI S. Evaluation of the weathering intensity of wood-based panels under outdoor exposure. DOI 10.1007/s10086-011-1197-7. J Wood Sci . v.57:p.408–414. 2011.

KORAI H., ADACHI K., SAOTOME H. Deterioration of wood-based boards subjected to outdoorexposure in Tsukuba. DOI 10.1007/s10086-012-1291-5. J Wood Sci. v 59:p 24–34.2013.

MALONEY, T.M. The family of wood composite materials. Forest Products Journal. v.46, n.2, p. 19-26. 1996.

NASCIMENTO, M. F. CPH – Chapas de Partículas Homogêneas – Madeiras do Nordeste do Brasil. 2003. ___p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

NIEUWENHUIJZEN E. J.; SAILER M F , SAMSON R.A., ADAN O.C.G. Detection of Aureobasidium as the dominant fungus on coated wood Paper prepared for the 44th IRG Annual Meeting Stockholm, Sweden 16-20 June 2013. Doc. No.IRG/WP 13-10796.

OKUDA O.; SATO S. Bond durability of kenaf core binderless boards II: outdoor exposure test. J Wood Sci. p 54:36–44. 2008.

PASTORE, T.C.M. Estudos do efeito da radiação ultravioleta em madeiras por espectroscopias Raman (FT-Raman), de refletância difusa no infravermelho (DRIFT) e no visível (CIE-L*a*b*). 2004. 117f. Tese (Doutorado em Química Analítica) – Instituto de Química, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

PETRIČ, M. et al. Natural weathering of coated oil heat treated wood. In: ANNUAL MEETING JACKSON LAKE LODGE, 38., 2007, Wyoming, USA. **Proceedings...** Wyoming, USA, 2007. res. IRG/WP 07-30440.

SARTÓRIO P. S. F.;MARTINES M. E. A.; FERRO F.; MOURA D. F. Produção de painéis de partículas homogêneas (PPH) utilizando resíduos de espécies de reflorestamento. Capitulo 1 de livro. Painéis de Partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos Organizadores: Francisco Antonio Rocco Lahr . André Luís Christoforo . São Carlos; EESC/USP,. ISBN 978-85-8023-019-2. p 1-22. 2013.

SARTORI, D. L et al. Modular panel with wood and particleboards of sugarcane bagasse for cattle handling facilities. Acta Scientiarum. Technology (Impresso), v. 37, p. 3, 2015.

SARTORI, D. L. et al. Painel em Madeira de Reflorestamento e Chapas de Partículas para Instalações Rurais. Floresta e Ambiente, v. 19, p. 171-178, 2012.

SCHEFFER T.C. Microbiological Degradation and the causal organisms. Chapter of book 2. Wood deterioration and its prevention by preservative treatments. V 1. Degradation and protection of wood. Darrel D. Nicholas, Editor. p 31-105. 1973.

SILVA R.V et al, Fracture toughness of natural fibers/castor oil polyurethane composites. Compos Sci Technol v 66. p. 1328–1335. 2007.

SILVA, J. O.; PASTORE, T.C.M.; PASTORE JR, F. Resistência natural ao intemperismo artificial e proteção de cinco madeiras tropicais. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 17 , n. 1 e 2 , p. 17-23 , 2007.

SILVA, R.V. et al,. Fracture toughness of natural fibers/castor oil polyurethane composites. Compos Sci Technol v. 66. p.1328–35. 2006.

STEITZ A., SCHMÖLLER B , PFABIGAN N., BOLLMUS S, GRÜLL G. Early detection of colonisation by blue stain and mould on modified wood using PCR technique. Paper prepared for the 41st Annual Meeting Biarritz, France 9-13 May 2010 Doc. No. IRG/WP 10-10730.

WECHSLER A., et al . Macadamia (Macadamia integrifolia) shell and castor (Rícinos communis) oil based sustainable particleboard: A comparison of its properties with conventional wood based particleboard. Materials and Design .v. 50. p 117–123. 2013.

YANG D-Q. Water Absorption of Various Building Materials and Mold Growth . Paper prepared for the 39thAnnual Meeting Istanbul, Turkey 25 – 29 May 2008. Doc. No. IRG/WP 08-10657.

YE, X.P et al. Properties of medium density fiberboards made from renewable biomass. Bioresource Technol. V. 98, p 1077–1084. 2007.

Capitulo 6 Avaliação do crescimento de fungos emboloradores e o seu efeito no desempenho de painéis particulados de bagaço de cana de açúcar em exposição natural e em ensaio acelerado

Highlights

- O revestimento superficial de resina poliuretana à base de óleo de mamona reduziu o crescimento de bolor.
- Os painéis particulados de bagaço de cana de açúcar com resina superficial apresentaram colonização similar aos painéis comerciais de madeira
- O ensaio acelerado ASTM D3273 12resultou em padrão similar ao ensaio de envelhecimento por 12 meses.
- O desempeho mecânico dos painéis de bagaço de cana de açúcar foi melhor que os painéis s de madeira

Resumo

Este estudo teve por objetivo investigar o efeito da resina poliuretana bicomponente a base de óleo de mamona como revestimento superficial no crescimento de fungos em dois tipos de painéis particulados de densidade média: painéis de partículas de madeira comerciais (Medium Density Particle Board – MDP) e painéis alternativos de bagaço de cana de açúcar (BCP). Os painéis particulados foram avaliados após 12 meses de exposição ao intemperismo natural em Pirassununga (latitude 21° 57' 33S Longitude 47° 27' 7S) e por ensaio acelerado de crescimento de fungos em condições de laboratório. O crescimento dos fungos foi quantificado de acordo com a Norma (ASTM D 3273-12, 2012) e os resultados foram avaliados por análise estatística através do modelo de chances proporcionais (MCP). Para ambos os materiais particulados o revestimento superficial com resina poliuretana bicomponente a base de óleo de mamona apresentou menor probabilidade de colonização que os materiais não revestidos, independente do tipo de material. Estes resultados fornecem subsídios para o potencial uso de resina poliuretana a base de óleo de mamona nestes materiais particulados. Adicionalmente, os painéis particulados de bagaço de cana de açúcar com após 12 meses de exposição apresentaram melhor desempenho mecânico do Modulo de elasticidade (MOE) (345,3 Mpa) em comparação com os painéis de madeira comerciais (82Mpa). Os resultados apresentam suporte para o uso de bagaço de cana de açúcar com resina poliuretana a base de óleo de mamona como revestimento superficial, indicando seu uso na construção civil em ambientes internos.

Palavras–chave: Painéis particulados, exposição natural, resina poliuretana a base de óleo de mamona, fungos emboloradores, bagaço de cana.

1 Introdução

Os fungos emboloradores crescem em ambientes com elevada umidade, sendo encontrados em diferentes materiais de construção (SHIRAKAWA et al., 2002; SHIRAKAWA et al., 2003; NIELSEN et al., 2004; JOHANSSON et al., 2012) diferentes tipos de madeiras (HANADA et al., 2003; THELANDERSSON et al., 2009; GOBAKKEN; WESTIN, 2008; BOK et al., 2013; PERNILLA JOHANSSON; JÖRAN JERMER, 2010; KARTAL et al., 2012; NIEUWENHUIJZEN et al., 2013) e compósitos de madeira (HOSSEINAEI et al., 2012; YANG et al., 2007; NAUMANN; STEPHAN; NOLL, 2012). Quando os fungos crescem nas superfícies de diferentes materiais de construção no interior de edifícios causam comprometimento estético e problemas de saúde, como asma e rinite alérgica (YANG et al., 2007; JAAKKOLA et al., 2013; HERNBERG et al., 2014). Assim sendo, é importante buscar soluções para a redução do crescimento de fungos em diferentes materiais de construção.

Atualmente, a indústria de painéis aglomerados utiliza madeira de reflorestamento, principalmente dos gêneros *Pinus* e *Eucaliptus*. No entanto, devido ao grande crescimento na demanda na construção civil e no setor de móveis aumenta também a demanda por matérias-prima, o que leva à busca por materiais alternativos (MENDES et al., 2012). Nesse contexto, os materiais lignocelulósicos provenientes de resíduos agroindustriais vêm sendo uma alternativa para fabricação de painéis aglomerados.

A cana de açúcar é uma cultura importante para o desenvolvimento econômico do Brasil, uma vez que representa uma fonte de etanol e açúcar, bem como o resíduo de biomassa (bagaço) que é usado para a produção de energia elétrica (HOFSETZ; SILVA, 2012). A safra de cana-de-açúcar no Brasil em 2014/15 foi de aproximadamente 634,8 milhões de toneladas, o que representa para o país geração de cerca de 190 milhões de toneladas de bagaço de cana (SILVA, 2007). No mundo o bagaço de cana- de- açúcar tem sido alvo de numerosas pesquisas como reforço em matrizes poliméricas, compósitos cimenticeos, compósitos reforçados com polpa de bagaço, cinza de bagaço como adição mineral no cimento (FARUK et al., 2012). Isso é atribuído principalmente à abundante disponibilidade a partir das usinas de açúcar e seus baixos custos de pré-tratamento (LOH et al., 2013)).

No Brasil, a suscetibilidade ao ataque de fungos em painéis particulados com o uso do bagaço de cana de açúcar reporta alguns estudos. Teixeira et al., 1997 avaliaram painéis de partículas de bagaço de cana de açúcar fabricados com resina a base de taninos e de resina ureia formaldeído os resultados classificaram aos painéis como moderadamente resistentes a fungos apodrecedores. Belini et al.,2014 avaliaram painéis fabricados de fibras de madeira *Eucalyptus grandis* com porcentuais entre 0 e 25% de bagaço de cana de açúcar com resina a base ureia formaldeído e indicaram que os painéis não são resistentes ao ataque de fungos de podridão branca.

As resinas são utilizadas na fabricação de painéis para aglutinar as partículas de madeira, conferindo-lhe forma, sustentação e resistência (ZENID, 2007). Atualmente 70% de todos os painéis fabricados no mundo levam algum tipo de resina (aglomerante) e, deste total, a grande maioria utiliza resinas sintéticas Fenol-formaldeído (resinas PF), Ureia-formaldeído (UF), Melamina-formaldeído (MF), Di-isocianato de difenilmetano (MDI). Por outro lado, existe uma tendência mundial para o uso de produtos biodegradáveis, não poluentes e originados de insumos renováveis Silva et al. (2015).

A resina poliuretana a base de óleo de mamona é um polímero com características biodegradáveis, mostra grande versatilidade de aplicação em diferentes segmentos industriais (CANGEMI et al., 2010; TIBÉRIO; CLARO; VECCHIA, 2012). Os maiores produtores mundiais de mamona são a Índia, China e Moçambique. No Brasil estima-se uma área de 90 mil de hectares, de área plantada para a safra 2014/15 e 61,0 mil toneladas de produção(CONAB 2015).

Segundo Clausen e West (2005) são necessários estabelecer métodos para avaliar a capacidade de utilizar madeira e materiais compositos em sistemas (framing) para suportar o crescimento de fungos quando são acidentalmente expostos à chuva durante a instalação e manutenção. Para isso ensaios de exposição ao ambiente externo, são utilizados para avaliar a influência das intempéries (HAYASHI; MIYATAKE; HARADA, 2002, PETRIČ, M. et al. 2007, THELANDERSSON, S. et al. 2009) no crescimento de fungos. Os ensaios de longo prazo correspondem aos ensaios de exposição ao ambiente externo na presença de fatores climáticos como:chuva, radiação solar, temperatura, etc.;no entanto, as respostas do envelhecimento natural são lentas.

Assim sendo, estudos em laboratório tem sido conduzidos para avaliação do grau de colonização de fungos emboloradores e manchadores em diferentes tipos de madeira e painéis: Painéis tipo strand de bambu e resina fenólica tratados superficialmente (SUN et al., 2010) Madeira de *Pinus sylvestris* e spruce (*Picea abies*) (BOK, et al., 2013, JOHANSSON; JERMER 2010), painéis multicamada de madeira cedar , tamarack , spruce e aspen (YANG, et al 2007), painéis (OSB) com resina polifenolica, plywood, e painéis (MDF) de media densidade de Fibra (YANG, 2007). Entre tanto estudos tem focado em analisar e conhecer os efeitos das condições de temperatura e umidade assim como as taxas de crescimento as quais os fungos emboloradores crescem num ambiente particular (YANG, 2008) assim como o efeito de revestimentos superficiais (FOJUTOWSKI, A.; KROPACZ, A.; NOSKOWIAK, A. 2009)e tratamentos térmicos (KARTAL, 2007) na proteção contra o crescimento de fungos emboloradoes. No entanto, estudos comparativos de resistência a fungos emboloradores e manchadores entre painéis de bagaço de cana-de-açúcar e e painéis comerciais de madeira são escassos na literatura.

Este estudo objetivou investigar a resistência ao crescimento de fungos emboloradores o desempenho de painéis alternativos de bagaço de cana de açúcar (BCP) utilizando resina poliuretana a base de óleo de mamona como adesivo em comparação com painéis comerciais de madeira de (MDP) sob condióes de exposição natural ensaio acelerado. Adicionalemte avaliar o efeito da resina poliuretana a base de óleo de mamona aplicada como revestimento sob o crescimento de bolor em ambos materiais

2 Materiais e Métodos

2.1 Painéis particulados

Os painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar (BCP) com resina bicomponente a base de mamona foram produzidos em escala de laboratório seguindo as recomendações estabelecidas por Maloney (1996) e adaptado por Sartori et al (2012). O processo iniciou-se com a coleta do bagaço de cana-de-açúcar em duas usinas da região de Pirassununga-SP. O material foi peneirado em malha de 2 mm para retirar as partículas mais finas. Posteriormente, foi picado em um moinho de facas com peneira de 8 mm e seco em estufa (60 °C) até atingir umidade de equilíbrio de 12%. Como aglomerante de partículas do bagaço de cana-de-açúcar foi utilizada resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona, sendo um dos componentes o poliol derivado do óleo vegetal e o outro o isocianato polifuncional (catalisador), em uma proporção de 1 parte de poliol para 2 partes do catalisador , em 15% da massa das partículas. A resina e as partículas foram misturadas em um batedor planetário durante 3 minutos. Posteriormente, foram inseridas em um molde formador de painel (50 x50 cm) e colocadas em prensa termo-hidráulica a condições de 100°C e 5 MPa de pressão, por 10 minutos. O painel foi esquadrejado retirando as bordas para seu acabamento final. Os painéis comerciais denominados MDP (Medium Density Particleboard) foram comprados, sendo confeccionados com partículas de *Eucaliptus* sp, resina ureia-formaldeído e com as seguintes dimensões 15x1830x2750 mm.

2.2 Tratamentos lateral e superficial dos corpos de prova

2.2.1 Tratamento Lateral

Os corpos de prova retangulares de 270x50x 12 mm (altura, largura e espessura) de BCP e 270x50x 15 mm de MDP foram submetidos a uma selagem das bordas na espessura com objetivo de diminuir a entrada de água pelas laterais, durante os ensaios de envelhecimento natural e testes acelerados. Foram utilizadas massa acrílica (marca Suvinil), selante concentrado SM280 (marca Suvinil) e aplicação de verniz marítimo (marca Suvinil) comprados no mercado brasileiro (Figura 48a e Figura 48b).

2.2.2 Tratamento superficial

50% de ambos os tipos de painéis foram revestidos superficialmente com resina poliuretana à base de óleo de mamona. Em uma proporção 40% pré-poliol (catalisador Disociananto polifuncional 1,6-hexametileno disocianato (HDI) e 60% poliol (a base de óleo de mamona) comprada no mercado da empresa (Plural Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda). A resina foi aplicada utilizando uma pistola de ar comprimido (Figura 48c). Finalmente obtiveram-se 4 grupos de corpos de prova BCP e MDP, com revestimento superifial BCPCR e MDPCR e sem revestimento superficial BCPCR e MDPCR (Figura 48d e Figura 48E) 6 corpos de prova de cada grupo foram analisados.

Figura 48. (a) Selagem de bordas com massa acrílica, (b) Aplicação de selante e aplicação de verniz marítimo**.** Resina poliuretana à base de óleo de mamona: (c) Aplicação de resina com pistola de ar comprimido (d) Corpos de prova BCP (e) Corpos de prova MDP.

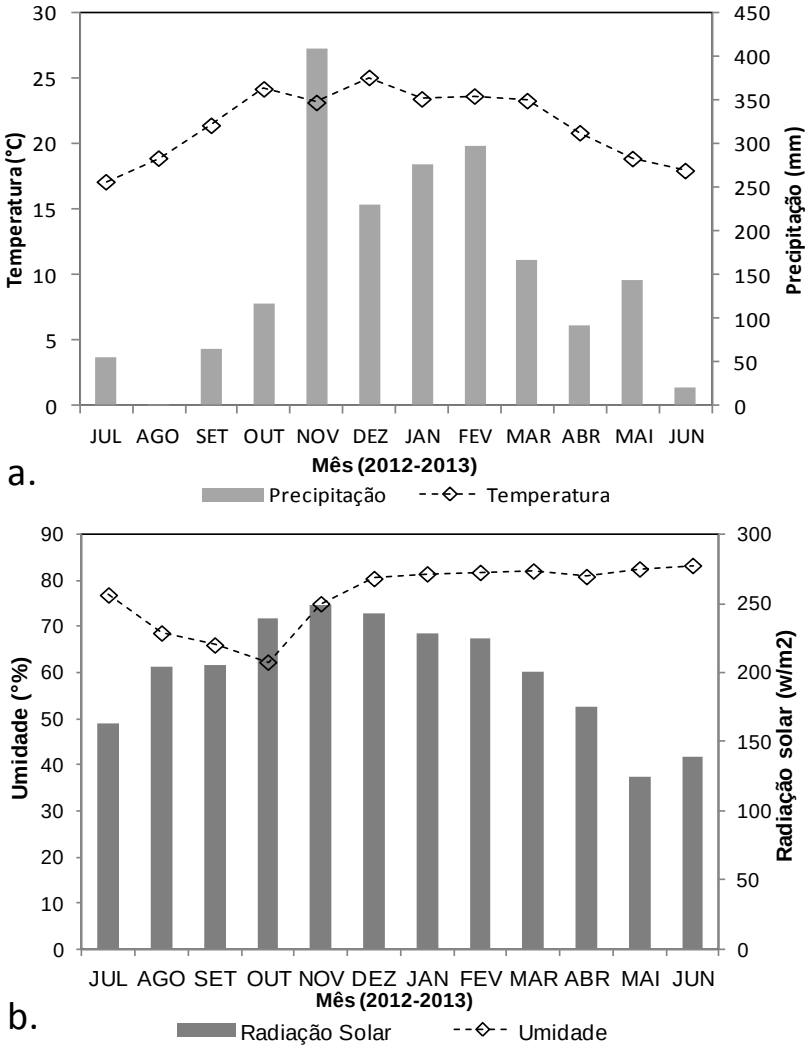
Fonte: Própria autoria.

2.2.3 Crescimento de fungos em intemperismo natural

O ensaio ao intemperismo natural foi realizado seguindo os procedimentos do documento normativo (ASTM D1435, 1994). Este ensaio foi realizado no campus da Universidade de São Paulo (USP) em Pirassununga, SP (latitude: 21° 57’ 33S, longitude: 47° 27’ 7S) com exposição de 6 amostras de cada grupo de corpos de prova em uma bancada metálica inclinada a 31º e voltada para a face norte, durante o período de 25 de junho de 2012 a 25 de Junho 2013. Radiação solar, precipitação total, temperatura e umidade relativa foram analisadas para o período de exposição. O grau de colonização das amostras por fungos foi avaliado pelos mesmos critérios do ensaio acelerado descrito no item 2.2.4. Foram analisadas a faces superiores, expostas a chuva e radiação solar e as faces inferiores sem exposição à radiação solar direta.

A Figura 49 apresenta os parâmetros meteorológicos no período de exposição dos materiais. A precipitação total foi de 1877 mm durante os 12 meses de exposição, a temperatura média mensal variou entre 17 °C e 25°C (Figura 49a). A umidade relativa variou entre 62,3% e 83,3%. A radiação solar variou entre 124 e 249 W/m^2.(Figura 49b) .

Figura 49. Comportamento mensal de parâmetros climáticos no período de exposição a) Temperatura e precipitação b) Umidade relativa do ar e radiação solar



2.2.4 Ensaio acelerado para avaliação da colonização por fungos emboloradores (norma ASTMD 3273-12, 2012)

Esta etapa foi realizada com 6 corpos de prova de acordo com a norma Standard Test Method for Resistance to Growth of Mold on the Surface of Interior Coatings in an Environmental Chamber - Resistência ao crescimento de bolor em superfícies de revestimentos interior (ASTMD 3273-12, 2012) com modificações no tamanho das amostras: Foram usados corpos de prova com dimensões de 270x50x 12 mm (altura, largura e espessura) devido à necessidade de caracterização mecânica (seção 2.2.7) após o ensaio acelerado. Foram utilizados os seguintes inóculos *Aspergillus niger* (ATCC 6275), *Aureobasidium pullulans* (ATCC 9348), *Penicillium citrinum* (ATCC 9849) em uma suspensão contendo $1x10^6$ esporos/ml de cada uma das espécies. Três corpos

de prova de *Pinus* sp. foram utilizados como controle de crescimento positivo do experimento.

Os corpos de prova de cada material foram pendurados dentro da câmara climática acima de 7,5 cm do solo inoculado com os fungos e incubados por 28 dias. Foi realizada avaliação semanal do crescimento superficial dos fungos usando uma escala de estimação baseada em desenhos padronizados na norma (ASTM D 3273-12, 2012) que variam de zero (0) a 10, onde cada nota na escala de avaliação corresponde a uma porcentagem de colonização superficial: 10 (0%); 9(1-10%); 8(11-20%); 7(21-30%); 6 (31-40%); 5(51-60%); 3(61-70%); 2(71-80%);1 (81-90%);0 (91-100%). O grau de colonização foi determinado nas duas faces das amostras denominadas face 1 e face 2.

2.2.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para a análise por *Microscopia eletrônica de varredura (MEV)* foram retiradas amostras com dimensões de 15 x 15 mm x espessura dos corpos de prova. As amostras foram tratadas com glutaraldeido 2,5% e solução tampão cacodilato de sódio 0,2M. Posteriormente a solução fixadora foi retirada e as amostras foram lavadas com solução tampão Fosfato pH 7,2 e submetidas a desidratação por 15 minutos nas concentrações de 70, 80 ,90 ,95 e 100% de alcool etílico. Foi utilizado microscópio Hitachi, modelo Analytical Table Top Microscope TM3000. As amostras foram fixadas em um stub com fita de carbono dulpa face condutiva e as micrografias foram obtidas por elétrons retroespalhados (BSE), utilizando-se uma tensão de aceleração de 15kV, amplificação de Mag de x250k, x500k e x1,0k a uma distância de trabalho (WD) de entre 5,0 e 5,7 mm.

2.2.6 Registro de imagens por scanner digital

Foram realizados registros dos corpos de prova por scanner HP Photosmart plus de ambos os materiais antes do ensaio de crescimento de fungos emboloradores e após os 7, 14, 21 e 28 dias de exposição. Para os corpos de prova após o ensaio de envelhecimento natural foram adquiridas imagens por, scanner digital após 12 meses de exposição.

2.2.7 Análise estatística da colonização por fungos

A análise estatística foi realizada para dois cenários. Inicialmente foi efetuada uma analise comparativa da colonização por fungos emboloradores em exposição natural e em ensaio acelerado usando um modelo de regressão para dados discretos. Posteriormente foi realizada uma análise longitudinal da colonização por fungos em diferentes períodos no ensaio acelerado.

2.2.7.1 Modelo de regressão para dados discretos para a análise comparativa da colonização por fungos emboloradores em exposição natural e acelerada

A variável resposta analisada neste experimento (grau de colonização) é uma variável politômica, multicategórica e ordinal isto é, pode assumir valores no conjunto {0, 1, 2, ... , 8, 9, 10} e que está influenciada por: a) tipo de material (BCP e MDP), b) o revestimento superficial de resina poliuretana com óleo de mamona (com e sem), c) face do corpo de prova (superior e inferior para a exposição natural ; 1 e 2 para a exposição acelerada) e d) o tipo de exposição (ambiente natural ou acelerado) em categorias mutuamente exclusivas. Dados desta natureza são chamados de discretos e não podem ser tratados na análise como variáveis contínuas por isso a análise apropriada é por meio de um modelo de regressão para dados discretos (AGRESTI, 2002).

Para tal propósito foi utilizado o Modelo de Chances Proporcionais (MCP), que é uma extensão multivariada dos Modelos Lineares Generalizados (McCULLAGH, 1980), e permite estimar as probabilidades associadas a cada uma das categorias de resposta, as quais indicam o grau de colonização dos fungos emboloradores nos materiais do estudo.

2.2.7.2 Analise longitudinal da colonização por fungos emboloradores em ensaio acelerado.

No ensaio acelerado (ASTMD 3273-12, 2012) há uma avaliação longitudinal do crescimento de fungos emboloradores nos corpos de prova, que é realizada após 7, 14, 21 e 28 dias em cada uma das suas faces 1 e 2. Para estas situações há de se considerar, ainda, uma possível dependência entre as observações (pois se trata de observações feitas no mesmo corpo de prova ao longo do tempo). Ignorar essa correlação, quando na verdade ela existe, pode acarretar em distorções nos erros-padrão dos coeficientes do modelo, que também são indicadores da precisão da análise. Assim, uma alternativa para considerar essa dependência é incorporar ao modelo um efeito aleatório, ou seja adotar a metodologia dos modelos mistos, que inclui na sua estrutura outro termo aleatório, além dos erros. Nesse sentido, a correlação entre as observações é resultante dessa variável aleatória sendo sua inclusão, necessária, sobretudo em estudos longitudinais. Dessa forma, as probabilidades marginais são determinadas não somente pelos efeitos fixos das covariáveis, mas também por um componente aleatório.

A técnica de ajuste empregada foi da máxima verossimilhança via quadratura gaussiana (MOLENBERG AND VERBEKE, 2005). Foi avaliada também a pertinência do efeito aleatório, ou seja, faz-se um teste para verificar sua significância estatística; caso ele não seja significativo, adota-se o modelo de efeitos fixos. Nesse trabalho, a análise dos dados bem como o ajuste dos modelos foram efetuados com auxílio do pacote

ordinal (CHRISTENSEN, 2011) disponível no software R, versão 2:14. (R CORE TEAM, 2015) nível de significância dos testes adotados foi 0,05.

2.2.8 Avaliação das propriedades mecânicas

Após 12 meses de exposição foi realizada a avaliação das propriedades mecânicas para Modulo de Ruptura (MOR) e Módulo de elasticidade (MOE) dos painéis particulados (BCP)e (MDP), com o objetivo de identificar as características críticas do desempenho físico-mecânico do material submetido a exposição natural. Após o tempo de exposição os corpos de prova foram acondicionados à temperatura de 20°C em ambiente com 65% de umidade relativa por uma semana. O equipamento utilizado para este ensaio foi a máquina universal de ensaios mecânicos EMIC, modelo DL30000, seguindo as recomendações da norma NBR 14810:2006 (vão livre 220mm e velocidade de ensaio 7mm/min).

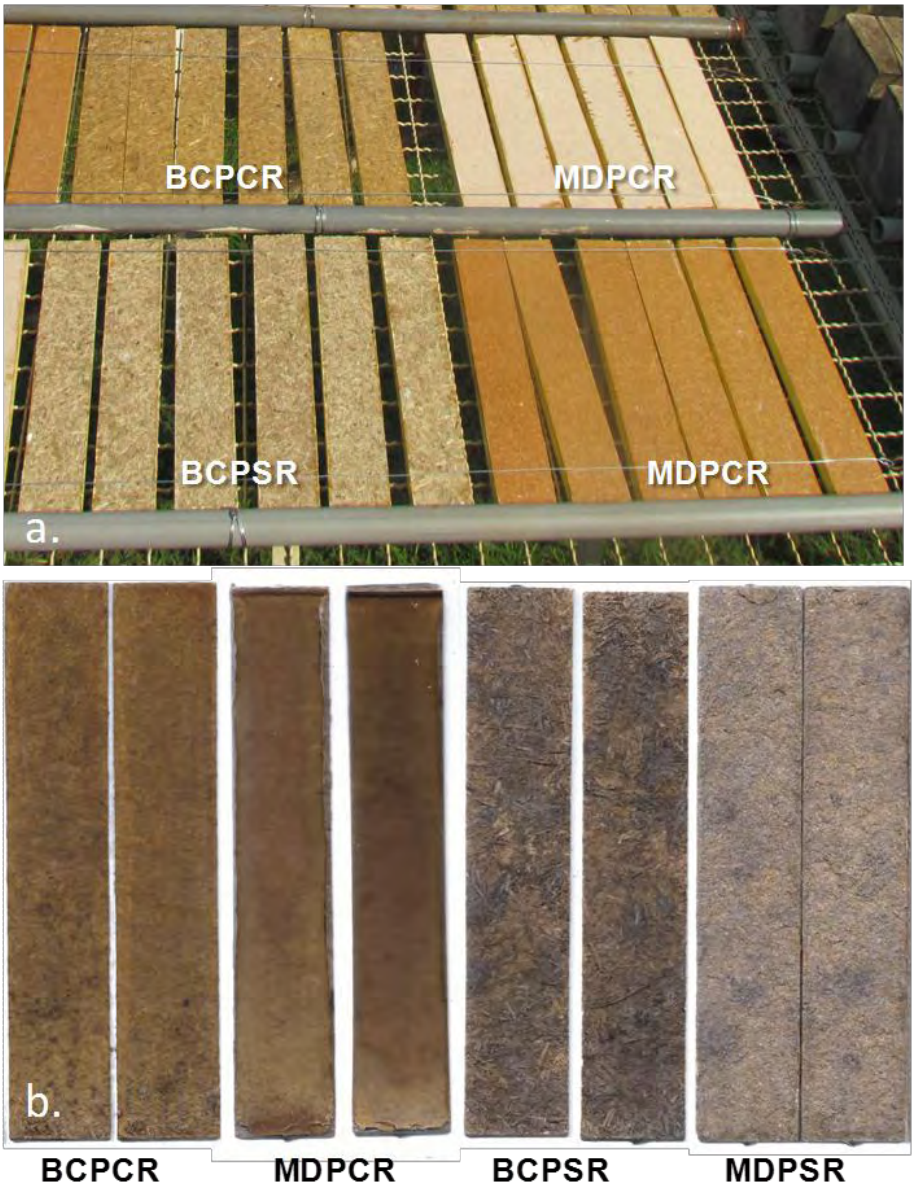
Foram analisadas 6 réplicas para cada material analisado A seguir foram realizadas análises estatísticas por meio do programa S.A.S, versão 9.3 por análise de variância (ANOVA fatorial) para as seguintes fontes de variação: material (BCP e MDP), revestimento (CR e SR), ensaio de crescimento de fungos (Acelerado e Natural). Para avaliar os efeitos das médias foi adotado o teste de F com nível de significância de 0,05.

3 Resultados e discussão

3.1 Crescimento de fungos em intemperismo natural

A Figura 50a apresenta corpos de prova no inicio da exposição ao intemperismo natural. Após 12 meses de exposição observe-se algumas mudanças superficiais em relação a aparência tais como, perda de brilho, escurecimento, perda de uniformidade na cor e crescimento de fungos emboloradores, sendo que a identificação das espécies não foi objetivo do presente estudo.(Figura 50 b).

Figura 50. Presença de fungos em corpos de prova BCP e MDP com e sem revestimento superficial (a) antes e (b) 12 meses após exposição ao intemperismo natural.



Fonte: Própria autoria.

A Tabela 29 apresenta os resultados obtidos de acordo as notas estabelecidas para o grau de colonização visualizado em cada um dos corpos de prova, para os materiais BCP e MDP após 12 meses de exposição ao intemperismo natural. Observe-se que as notas obtidas após 12 meses nos materiais são inferiores nas faces superiores em relação as faces inferiores indicando um maior grau de colonização nas faces superiores de ambos materiais.

Tabela 29. Resultados obtidos para a avaliação do crescimento de fungos emboloradores em painéis BCP e MDP. após 12 meses por tipo de material, revestimento e face.. com base nas notas de avaliação da norma ASTM D3273-12, no intemperismo natural (12 meses) Brasil Pirassununga-SP.

Material	Revestimento Superficial	Escala de colonização				
		Superior	Inferior		Superior	Inferior
BCP	Sem	1	0	MDP	0	4
		1	3		0	4
		0	3		0	2
		0	4		0	4
		0	3		0	2
		0	3		0	3
	Com	1	8		4	4
		1	8		2	4
		1	9		4	5
		1	8		3	7
		1	8		2	5
		1	8		4	7

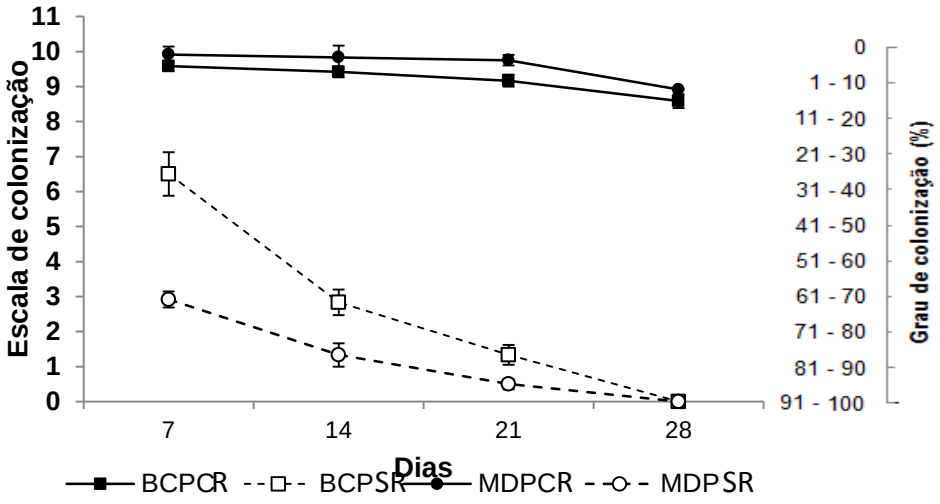
Nota (grau de colonização) ASTMD 3273-12: 10 (0%); 9(1-10%); 8(11-20%); 7(21-30%);

Fonte: Própria autoria.

3.2 Crescimento de fungos em ensaio acelerado (ASTM D3273-12, 2012)

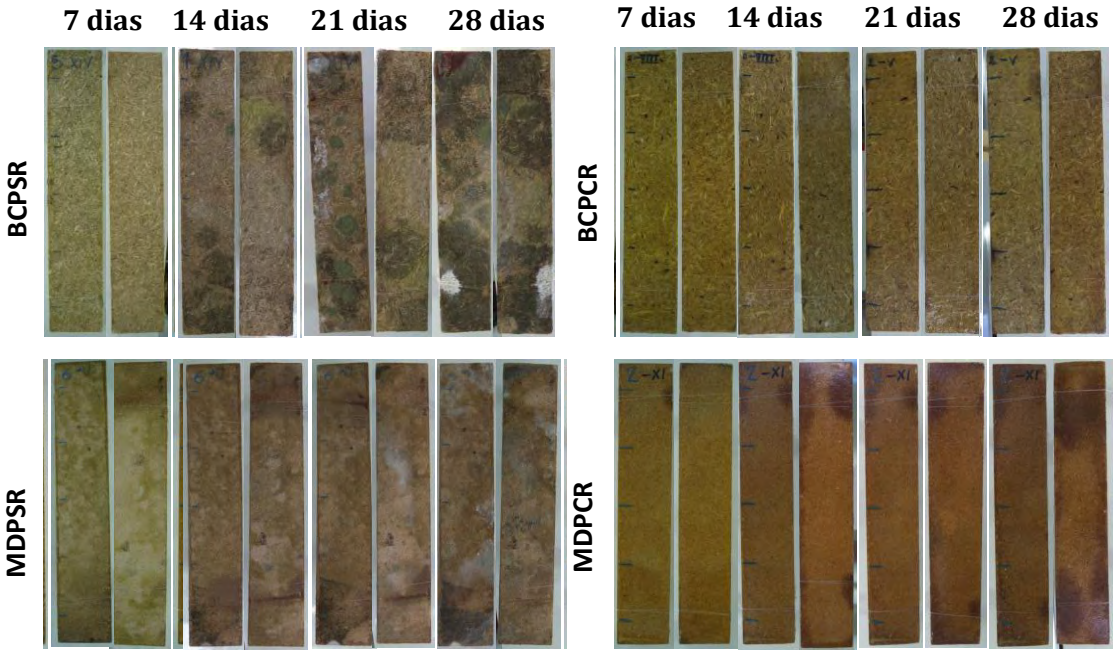
A Figura 51 apresenta o efeito do tempo de exposição nos materiais BCP e MDP submetidos ao ensaio acelerado (ASTM D 3273-12, 2012). Pode se observar que os corpos de prova com revestimento superficial com resina poliuretana a base de óleo de mamona apresentaram menor grau de colonização em relação aos corpos de prova sem revestimento superficial para os dois materiais analisados. É claramente observado o aumento na colonização dos fungos em relação ao tempo de incubação do ensaio para os corpos de prova de ambos os materiais sem revestimento superficial.

Figura 51. Efeito do tempo no grau de colonização em materiais BCP e MDP com e sem revestimento superficial no ensaio acelerado (ASTMD 3273-12, 2012).



A Figura 52 apresenta fotografias de dois corpos de prova de cada um dos materiais analisados com e sem revestimento superficial durante as 4 semanas de exposição aos fungos emboloradores. Observe-se o crescimento gradativo do bolor em ambos os materiais BCP e MDP não revestidos corroborando o comportamento similar nos dois materiais.

Figura 52. Imagens digitais dos corpos de prova durante o ensaio acelerado para avaliação do desenvolvimento de fungos emboloradores (ASTMD 3273-12).



Fonte: Própria autoria

3.3 Análise estatística do crescimento de fungos

3.3.1 Comparação do crescimento por fungos emboloradores em exposição natural e ensaio acelerado (ASTMD 3273-12, 2012)

A Tabela 30 mostra as estimativas dos parâmetros, os erros padrões e o nível descritivo (valor p) para os parâmetros do modelo de chances proporcionais na avaliação da colonização por fungos emboloradores no ensaio acelerado. As estimativas dos parâmetros referem-se a um dos níveis de cada uma das covariáveis, uma vez que no processo de estimação uma das categorias é tomada como referência (categoria de base). Os valores dos níveis descritivos (p-valor) mostram que o efeito de material MDP não difere do material à base de bagaço de cana, no entanto, o efeito de revestimento é significativo, ou seja, “sem” e “com” diferem entre si; assim como o efeito de face (Inferior e superior ou 1 e 2) ambiente (natural e controlado) também apresentam diferenças ao nível de significância de 5%.

Tabela 30. Estimativas para os parâmetros do modelo de chances proporcionais na avaliação da colonização por fungos emboloradores no ensaio acelerado ASTM D3273-12 (2012) e exposição natural.

Parâmetro Covariáveis	Parâmetro	Erro-padrão	Valor z	Nível descritivo (p valor)
Material (MDP)	0,1196	0,4238	0,282	0,7778
Revestimento (Sem)	-4,5618	0,5982	-7,626	<0,001
Face (Inferior)	1,6782	0,452	3,713	<0,001
Ambiente (Natural)	-0,9301	0,4574	-2,033	0,042

Fonte: Própria autoria

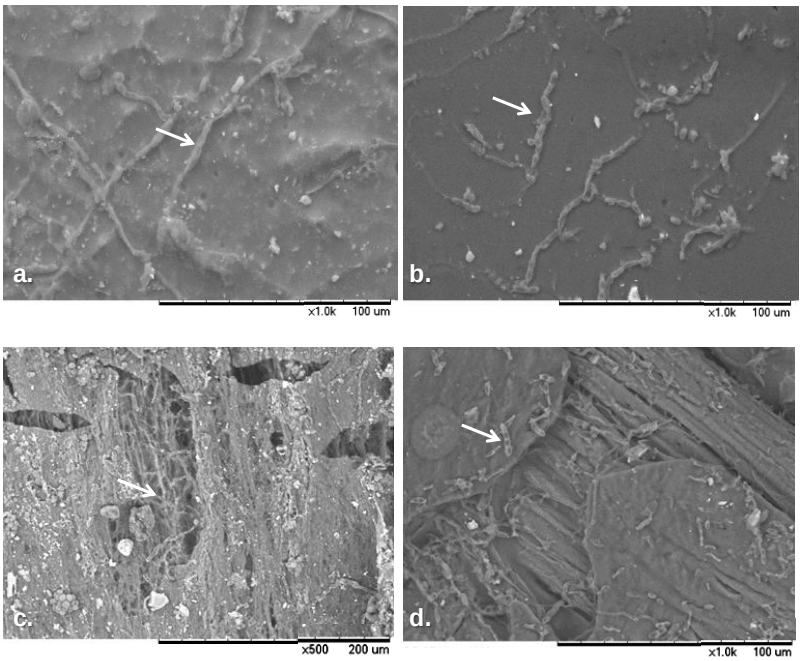
Os resultados mostraram que houve um efeito da face neste caso para o ensaio em exposição natural as faces superiores apresentaram maior colonização, fenômeno explicado devido ao efeito "weathering" ou intemperismo gerado pelas condições ambientais mais severas as quais foram expostas em relação às faces inferiores.

De acordo com Wypych (2013), parâmetros meteorológicos como a radiação UV, temperatura, umidade, precipitação e umidade condensada, partículas e gases contaminantes podem orquestrar uma gama extremamente ampla de condições sob as quais um material pode manter o desempenho e as condições especificas de um local ditam o tipo de degradação que pode ocorrer no material. Williams (2005) indica a radiação UV como o principal fator de degradação no intemperismo natural.

Os resultados da inspeção visual foram confirmados por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Figura 53a e Figura 53b apresentam a colonização por fungos na superfície de painéis de bagaço de cana de açúcar com revestimento superficial (BCPCR).

Observe-se que além da presença de fungos é identificada uma variação visual da resina, pode-se obsevar um efeito de perda da uniformidade superficial possivelmente ocasionada pelos fatores ambientais antes já mencionados. A Figura 53c mostra alta de terioração das fibras do bagaço para a face superior dos painéis BCP não revestidos. A Figura 53d permite observar a disposição das fibras do bagaço e resina de oleo de mamona envolvendo grande parte das fibras. A diferença nos resultados observados para cada uma das faces no ensaio de envelhecimento natural foi marcada pela posição dos corpos de prova onde as faces superiores tiveram uma maior influencia das condições meteorológicas em comparação as faces inferiores.

Figura 53. Micrografias de painéis particulados colonizados por fungos emboloradores por exposição natural - 12 meses. BCPCR (a) Face Superior (b) Face Inferior; BCPSR (c) Face superior (d) Face inferior.



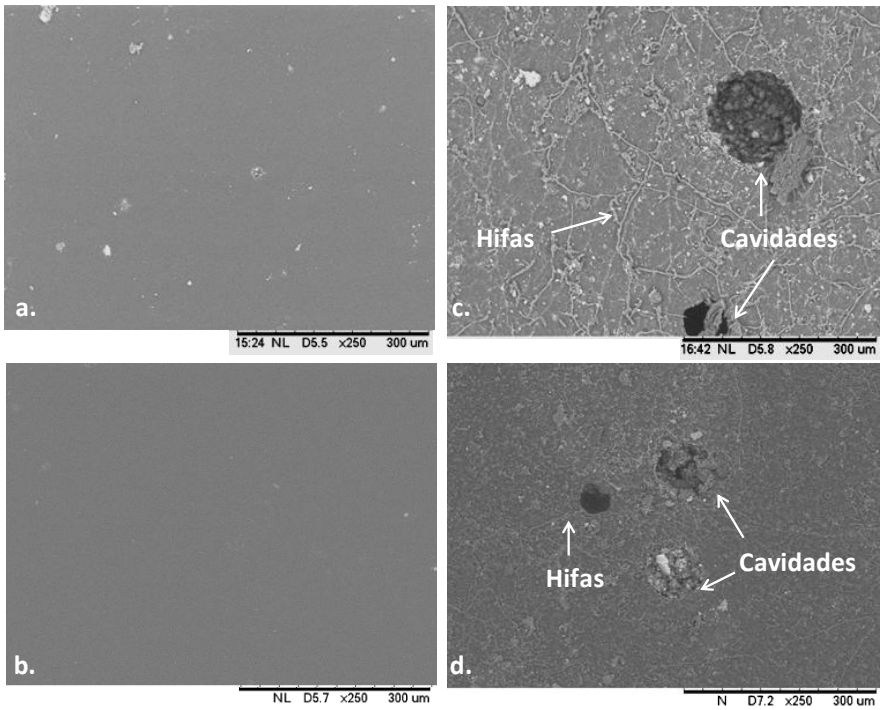
Fonte: Própria autoria

A análise realizada através das imagens de microscopia eletrônica de varredura mostra que a superficie nos materiais revestidos sem envelhecimento é uniforme e contínua Figura 54a (BCPCR) e Figura 54b (MDPCR). Após 12 meses de exposição, foram identificados danos na superfície da resina poliuretana, tendo desenvolvido uma estrutura porosa, com o aparecimento de cavidades geradas pelos efeitos da radiação solar UV e temperatura, que indicam o processo erosão na superficie. Várias análises foram realizadas após 3, 6 e 12 meses confirmando este processo (dados não mostrados no presente artigo). Avaliações por microscopia realizadas após 3 e 6 meses de exposição indicaram o aparecimento gradativo destas cavidades na superfície de ambos os materiais. Para o caso dos painéis de BCPSR é observada elevada colonização das fibras do bagaço nas faces superiores.

A Figura 54c e a Figura 54d mostram a colonização de fungos emboloradores na superfície dos corpos de prova de painéis particulados de bagaço de cana de açúcar com revestimento (BCPCR) e para os corpos de prova dos painéis comerciais de madeira (MDPCR), respectivamente. Também é possível observar a deterioração da resina marcada pela presença de cavidades ocasionadas por efeito das condições ambientais que agiram sobre a resina poliuretana de óleo de mamona. As três condições de crescimento fungico, e que segundo Sedlbauer (2001) devem existir simultaneamente ao longo de um certo tempo, são a temperatura, a umidade e o substrato, o mesmo autor indica esses fatores junto com a duração as condições

climáticas, como princípios gerais para determinar um área de risco para a deterioração de um material.

Figura 54. Imagens de microscopia eletrônica de varredura em painéis particulados Painel antes da exposição (a) BCPCR. (b) MDPCR ; Após exposição natural -12 meses (c) BCPCR. (d) MDPCR .



Fonte: Própria autoria

A Tabela 31 apresenta as probabilidades estimadas pelo modelo de chances proporcionais para o grau de colonização de fungos emboloradores nos painéis de bagaço de cana de açúcar (BCP) e de MDP nas duas condições avaliadas: intemperismo natural e ensaio acelerado ASTMD3273-12 (2012). Ao final das 4 semanas de exposição os corpos de prova sem revestimento superficial (BCPSR e MDPSR) submetidos ao ensaio acelerado apresentaram entre 60% e 80% de probabilidade de obter uma nota na escala de avaliação de 0 e 1, ou seja entre (81- 100%) de colonização por fungos emboloradores. Este resultado é similar para ambas as condições de exposição, excetuando-se que para o a exposição natural é observado o efeito do intemperismo da face superior, onde a probabilidade de colonização é aumentada em relação a face inferior. Ambos os materiais com revestimento superficial (BCPCR e MDPCR) apresentaram 82,6 % de probabilidade de obter uma nota de 8 e 9, o que corresponde a menos de <20% de colonização de fungos emboloradores na superfície no ensaio acelerado. Contudo pode-se observar que a variação nas probabilidades é maior no ensaio ao intemperismo natural.

Tabela 31. Probabilidades determinadas para a colonização por fungos emboloradores nas interações entre revestimento, face e tipo de exposição.

Escala de avaliação			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
			Grau de colonização (%)										
Revestimento	Face	Tipo Exposição	91 a 100	81 a 90	71 a 80	61 a 70	51 a 60	41 a 50	31 a 40	21 a 30	11 a 20	1 a 10	0
			Probabilidades										
Com	1	ASTMD3273-12	0,04	0,04	0,03	0,07	0,21	0,06	0,00	0,09	0,20	0,27	0,00
Com	2	ASTMD3273-12	0,01	0,01	0,01	0,02	0,07	0,03	0,00	0,04	0,16	0,66	0,00
Sem	1	ASTMD3273-12	0,81	0,09	0,03	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Sem	2	ASTMD3273-12	0,44	0,17	0,07	0,11	0,13	0,02	0,00	0,02	0,03	0,02	0,00
Com	Superior	Natural	0,10	0,08	0,05	0,11	0,27	0,06	0,00	0,07	0,13	0,13	0,00
Com	Inferior	Natural	0,02	0,02	0,01	0,04	0,14	0,05	0,00	0,07	0,21	0,44	0,00
Sem	Superior	Natural	0,91	0,04	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sem	Inferior	Natural	0,67	0,14	0,05	0,06	0,06	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00

% probabilidade		**(0 ,20) %**		**(21, 40) %**		**(41, 60)%**		**(61, 80)%**		**(81, 100)%**

Fonte: Própria autoria

3.3.2 Analise longitudinal do crescimento de fungos emboloradores - em ensaio acelerado (ASTM D 3273-12, 2012)

Na Tabela 32 são apresentados os resultados das probabilidades estimadas para o crescimento e colonização de fungos emboloradores. Pode-se observar que os corpos de prova dos painéis de bagaço de cana de açúcar (BCP) e de madeira (MDP) apresentaram grau de colonização similar e a colonização foi reduzida pela presença do revestimento superficial nos corpos de prova.

Para os corpos de prova revestidos foram estimadas probabilidades de 9% para (BCPCR) e 10% (MDPCR) de apresentar uma nota 9 na escala de avaliação de crescimento superficial nos primeiros 7 dias de avaliação. Nos corpos de provas com revestimento superficial MDPCR e BCPCR o baixo grau de colonização por bolor foi mantido durante os primeiros 21 dias de exposição. Após 28 dias os corpos de prova de MDPCR e BCPCR apresentaram probabilidade de 70% e 73% para nota 9, respectivamente. Isto é atribuído ao efeito protetor da resina poliuretana a base de óleo de mamona que dificultou o ataque dos fungos emboloradores nos materiais.

Durante os primeiros 7 dias de exposição, iniciou-se o processo de colonização dos fungos emboloradores nos corpos de prova sem revestimento superficial dos dois materiais (MDPSR e BCPSR). Os painéis de bagaço de cana de açúcar (BCPSR) e de madeira (MDPSR), apresentaram 70% de probabilidade das amostras apresentem notas na escala ordinal de avaliação inferior a 4. As probabilidades estimadas de colonização total (nota 0) por fungos emboloradores ao final dos 28 dias de exposição foram MDPSR (95%) e BCPSR (94%).

Tabela 32. Probabilidades determinadas para painéis de bagaço de cana de açúcar e madeira (MDP) nas interações entre material, revestimento e tempo de incubação para o ensaio de colonização por fungos emboloradores (ASTM D3273-12, 2012).

Escala de avaliação			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
			Grau de colonização (%)										
Material	Revestimento	Dia	91 a 100	81 a 90	71 a 80	61 a 70	51 a 60	41 a 50	31 a 40	21 a 30	11 a 20	1 a 10	0
			Probabilidades										
BCP	Com	7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,91
MDP	Com	7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,90
BCP	Sem	7	0,03	0,06	0,16	0,25	0,18	0,03	0,06	0,08	0,11	0,04	0,00
MDP	Sem	7	0,04	0,07	0,18	0,26	0,18	0,03	0,06	0,07	0,10	0,03	0,00
BCP	Com	14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,66
MDP	Com	14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	0,62
BCP	Sem	14	0,14	0,19	0,30	0,20	0,08	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00
MDP	Sem	14	0,17	0,21	0,30	0,19	0,07	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00
BCP	Com	21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,60	0,39
MDP	Com	21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,63	0,35
BCP	Sem	21	0,33	0,27	0,24	0,10	0,03	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
MDP	Sem	21	0,37	0,27	0,22	0,09	0,03	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
BCP	Com	28	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,03	0,18	0,73	0,02
MDP	Com	28	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,03	0,21	0,70	0,02
BCP	Sem	28	0,94	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MDP	Sem	28	0,95	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

% probabilidade		(0 , 20)%		(21, 40)%		(41, 60)%		(61 , 80)%		(81, 100)%

Fonte: Própria autoria.

A Tabela 33 apresenta as estimativas de probabilidades obtidas para o crescimento de bolor, analisando o efeito do revestimento superficial e tempo de incubação. Observa-se logo nos primeiros 7 dias de exposição uma influência importante na presença do revestimento com a resina poliuretana a base de óleo de mamona.

O grau de colonização entre o começo da incubação e o final do experimento foi baixo para os corpos de prova revestidos com a resina poliuretana a base de óleo de mamona com 90% de probabilidade de obter nota 10 durante os primeiros 7 dias de exposição, e 9% apresentaram nota 9. Ainda, na primeira semana, os materiais não revestidos, apresentaram probabilidade de 25% de apresentar nota 3 para a colonização que continuou em progresso até atingir nota 0 ao final dos 28 dias de incubação.

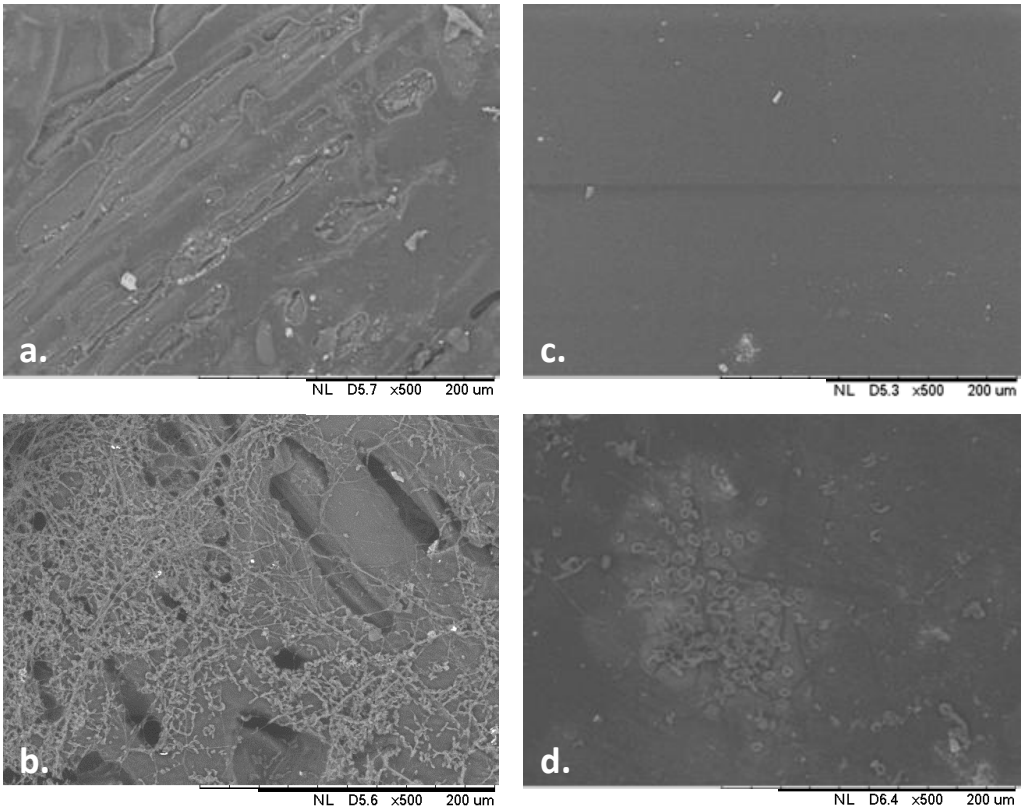
Tabela 33. Probabilidades do grau de colonização de fungos emboloradores para avaliação do revestimento e tempo de incubação no ensaio acelerado (ASTM D3273-12, 2012).

Escala de avaliação		**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
		Grau de colonização (%)										
Revestimento	**Dia**	**91 a 100**	**81 a 90**	**71 a 80**	**61 a 70**	**51 a 60**	**41 a 50**	**31 a 40**	**21 a 30**	**11 a 20**	**1 a 10**	**0**
		Probabilidades										
Com	7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,90
Sem	7	0,04	0,06	0,17	0,25	0,18	0,03	0,06	0,08	0,10	0,03	0,00
Com	14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	0,64
Sem	14	0,16	0,20	0,30	0.194	0,07	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00
Com	21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,61	0,38
Sem	21	0,36	0,27	0,23	0,09	0,03	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Com	28	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,03	0,20	0,72	0,02
Sem	28	0,95	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% probabilidade			(0 , 20)%		(21 ,40)%		(41, 60)%		(61, 80)%		(81, 100)%	

Fonte: Própria autoria

As imagens de microscopia eletrônica de varredura mostram diferenças entre os materiais revestidos e não revestidos superficialmente. Os corpos de prova de BCPSR sem revestimento apresentam superficie com fibras expostas, cobertas em algumas áreas pela resina poliuretana a base de óleo de mamona usada como adesivo no processo de prensagem dos painéis (Figura 55a). Após a incubação de 28 dias com fungos emboloradores observou-se a intensa colonização superficial com presença de hifas agrupadas (Figura 55b) Nos corposde prova de BCPCR revestidos (Figura 55c) é observada uma superficie lisa e homogênea antes no teste. A Figura 55d corresponde a corpos de prova de BCPCR, após 28 dias de incubação com pouca colonização por fungos.

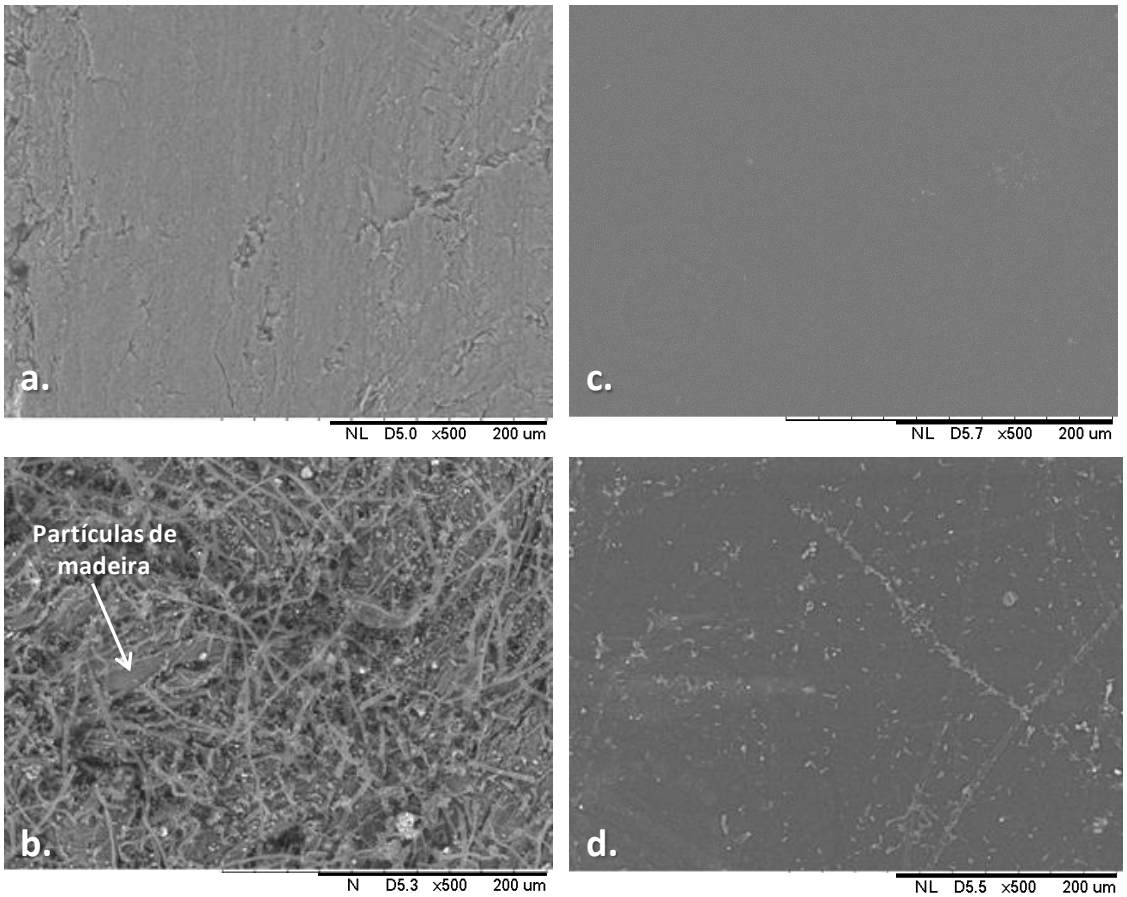
Figura 55. Imagens de microscopia eletrônica de varredura de painéis de bagaço de cana de açúcar em teste acelerado. BCPSR em a) inicial, em b) após 28 dias de incubação , BCPCR em c) inicial, em d)após 28 dias de incubação.



Fonte: Própria autoria

A Figura 56a apresenta imagens de MDP sem revestimento antes do teste acelerado. Na Figura 56b após incubação de 28 dias observa-se a colonização superficial com elevada presença de hifas agrupadas em grandes micelios que indicam a susceptibilidade deste material à colonização pelos fungos emboloradores. Para o MDP revestido a Figura 56c mostra a superficie da amostra com revestimento com superficie lisa e homogênea antes do teste acelerado. A Figura 56d que apresenta o MDPCR após a incubação por 28 dias com fungos emboloradores apenas com areas pequenas de colonização

Figura 56. Imagens de microscopia eletrônica de varredura de painéis comerciais de madeira MDP submetidos ao ensaio acelerado (ASTM D3273-12, 2012). Sem revestimento superficial (MDPSR) (a) inicial, em (b) após 28 dias de incubação. Com revestimento superficial (MDPCR) em (c) inicial, em e (d) após 28 dias de incubação.

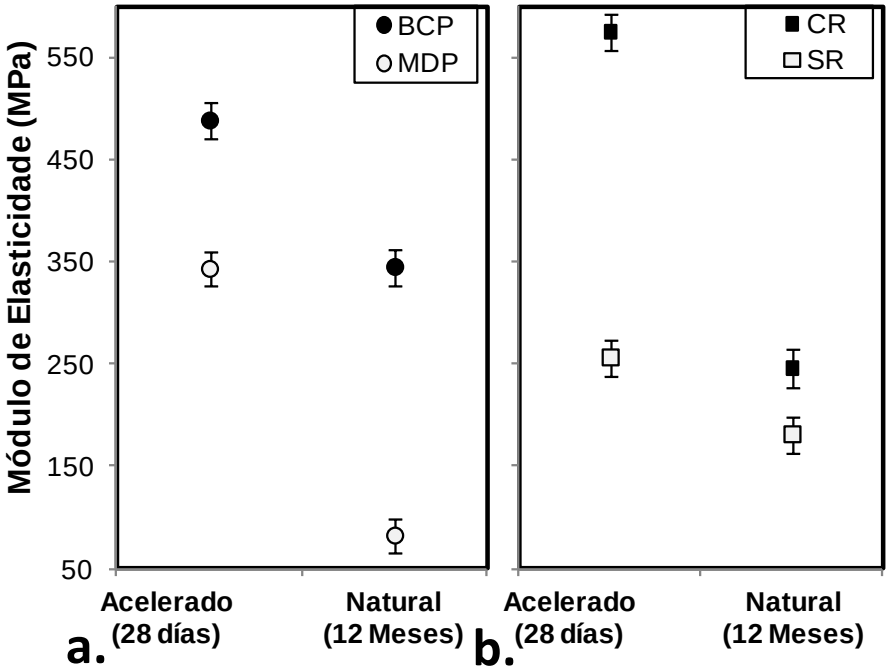


Fonte: Própria autoria

3.4 Propriedades mecânicas

Para o módulo de elasticidade (MOE) a ANOVA indicou interação entre os materiais (BCP e MDP) com p valor de 0,0036, mostrando que os painéis de Bagaço de cana de açúcar apresentaram maior resistência (Figura 57a). Também foi encontrada interação entre Revestimento (com e sem) e ensaio para avaliação do crescimento de fungos com p valor de 0,0001, (Figura 57b). O revestimento superficial em ambos os materiais conferiu maior módulo de elasticidade e a exposição ao intemperismo natural reduziu esta propriedade em relação ao ensaio acelerado de crescimento de fungos.

Figura 57. Modulo de elasticidade após ensaios de crescimento de fungos emboloradores natural (12 meses) acelerado (28 dias). (a) BCP e MDP (b) Com e Sem revestimento superficial

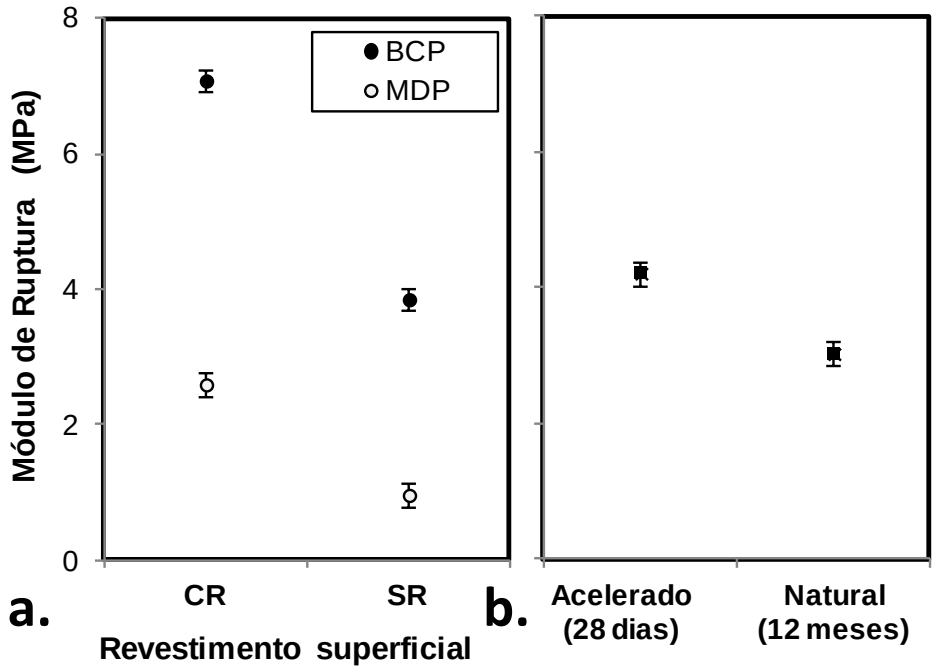


Fonte: Própria autoria

Para o módulo de ruptura (MOR) a ANOVA indicou interação entre revestimento (com e sem) e material (BCP e MDP) com p-valor = 0,0045, sendo que os valores obtidos indicam um desempenho mecânico superior para os painéis revestidos superficialmente (Figura 58a). Foi encontrada diferença estatística significativa entre a exposição natural por 12 meses e o ensaio acelerado ASTM D3273-12 (2012) com p valor <.0001 evidenciando que a exposição natural apresentou menor módulo de ruptura sem discrimação em ambos os materiais (Figura 58b) indicando maior agressividade. Isso pode ser explicado a partir dos efeitos exercidos pelos fatores meteorológicos (precipitação, radiação solar, temperature e umidade relativa) apresentados na exposição natural, que influenciaram na deterioção das fibras de bagaço de cana de acúcar e particulas de madeira, como foi mostrado atraves das imagens de microscopia analisadas. Não foram encontrados estudos na literatura relacionados com desempenho mecânico após ensaios acelerados por crescimento de fungos emboloradores.

Neste estudo o resultado do Módulo de Ruptura para os painéis de bagaço de cana de açúcar sem revestimento superficial após 12 meses foi de 4 MPa sendo similares ao encontrado por Korai et a.l (2013) em painéis comerciais de fibras de média densidade MDF expostos durante 12 meses no Japão (5,36 MPa). Entre tanto no presente estudo os painés comerciais de madeira MDP obtiveram valores de 1 MPa sendo inferiores aos indicados pelo autor anteriormente referenciado.

Figura 58. Modulo de ruptura após ensaios de crescimento de fungos emboloradores natural (12 meses) e acelerado (28 dias). (a) BCP e MDP com e sem revestimento superficial; em b) no ensaio acelerado ou em exposição natural.



Fonte: Própria autoria

4 Conclusões

- Ambos os materiais analisados, painéis de bagaço de cana de açúcar (BCP) e painéis comerciais de madeira (MDP) sem tratamento superficial, apresentaram elevado grau de colonização por fungos emboloradores tanto no intemperismo natural por 12 meses quanto no teste acelerado indicando que o método acelerado conseguiu reproduzir os efeitos apresentados em campo.
- A exposição natural mostrou que os fungos emboloradores foram predominantes em ambos os materiais avaliados, não havendo diferença significativa no grau de colonização entre painéis particulados de bagaço de cana de açúcar (BCP) e painéis comerciais de madeira (MDP).

- Inquestionalvelmente o revestimento superficial de resina poliuretana à base de óleo de mamona aplicado em ambos os materiais diminuiu o percentual da área colonizada por fungos emboloradores após 12 meses de exposição natural e também no teste acelerado conforme mostrado pelo modelo estatístico de chances proporcionais

- Na exposição natural por 12 meses os corpos de prova com o revestimento superficial de resina poliuretana à base de óleo de mamona apresentaram entre 1-20% da área colonizada por fungos emboloradores com 65% de probabilidade. Por outro lado, sem o respectivo revestimento superficial a área colonizada foi de 91-100% com 91% de probabilidade.

- No final do teste acelerado a área colonizada pelos fungos para os painéis com revestimento foi de 1-10% com 73% de probabilidade para o bagaço de cana de açúcar e 70% de probabilidade para os painéis comerciais de madeira. Sendo que os mesmos materiais sem revestimento superficial apresentaram entre 91-100% de área colonizada com 94% e 95% de probabilidade, respectivamente.

- O tratamento com revestimento superficial de resina poliuretana a base de óleo de mamona além de diminuir a colonização por fungos em ambos os materiais também protegeu para evitar a perda no desempenho mecânico em relação aos respectivos materiais não revestidos, após ensaio natural e acelerado para colonização por fungos emboloradores. Assim sendo, os painéis de bagaço de cana de açúcar com revestimento superficial de resina poliuretana a base de óleo de mamona possuem potencial para ser usados como material de construção civil em ambientes internos que não sejam expostos a umidade elevada.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FAPESP (projeto temático, processo 2012/51467-3) e do CNPq e da CAPES pela bolsa de estudos oferecida à primeira autora. Adicionalmente os autores agradecem também ao Departamento de árvores, Madeiras e Móveis do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), ao Laboratório multiusuários do Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP), ao Laboratório da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo – FZEA USP e ao Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

6 Referências

ASTM D 1435 - Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics, Philadelphia, 1994. 5 p.

_____. ASTM D 3273-12 - Resistance to growth of mold on the surface of interior coatings in na environmental chamber. Pennsylvania, 2012. p. 1-8.

AGRESTI, A. Categorical data analysis. 3nd ed. New York: Wiley, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). ASTM D 4445-91- Standard test method for fungicides for controlling sapstain and mold on unseasoned lumber (Laboratory Method). West Conshohocken, PA, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14810-2- Painéis de Partículas de média densidade. Requisitos e métodos de ensaio. 2013.

BELINI, U. L et al . Bioensaios em painéis confeccionados com eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.38, n.2, p.361-368, 2014.

BOK, G. et al. Critical moisture levels and mould resistance of five different wood treatments. In: INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PROTECTION, 44., 2013, Stockholm. Proceedings… Stockholm, 2013. res. IRG/WP 13-30632.

CANGEMI, J. M.; SANTOS, A. M.; CLARO NETO, S. A revolução verde da mamona. Química Nova na Escola, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 3-8, Fev. 2010.

CHRISTENSEN, R. H. Analysis of ordinal data with cumulative link models estimation with the R-package ordinal. 2011. Disponível em: <http://www.R-project.org>. Acesso em: 22 dez. 2011.

CLAUSEN, C. A.; WEST, M. Test method for assessing resistance of pine lumber and waferboard to mold. Forest Products Journal, Peachtree Corners, v. 55, n. 12, p. 164-166, 2005.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da Safra Brasileira Cana-de-Açúcar, v. 1 – Safra 2014/15, n. 4 – Quarto Levantamento, Brasília, p. 1-29, abr. 2015. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_04_13_08_45_51_boletim_cana_portugues_-_4o_lev_-_14-15.pdf>. Acesso em: 03 set. 2015.

EUROPEAN STANDARDS (EN). EN 13986:2004. Wood-based panels for use in construction: characteristics, evaluation of conformity and marking. French, 2004.

FARUK, O. et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. Progress in Polymer Science, London, v. 37, n. 11, p. 1552-1596, 2012.

FIORELLI, J. et al. Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: an eco-efficient product. Industrial Crops and Products, Amsterdam, v. 40, p. 69-75, 2012.

GOBAKKEN L. R.; WESTIN M. Surface mould growth on five modified wood substrates coated with threedifferent coating systems when exposed outdoor. nternational Biodeterioration & Biodegradation.v.62, p. 397–402. 2008.

HANADA, E. R. et al. Fungos emboloradores e manchadores demadeira em toras estocadas em indústrias madeireiras no município de Manaus, Amazonas, Brasil. Acta Amazonica, Manaus, v. 33, n. 3, p. 483-488. 2003.

HAYASHI, T.; MIYATAKE, A.; HARADA, M. Outdoor exposure tests of structural laminated veneer lumber. Journal of Wood Science, Tokyo, v. 48, p. 69-74, 2002.

HERNBERG, S. et al. Indoor molds and lung function in healthy adults. Respiratory Medicine, London, v. 108, n. 5, p. 677-684, 2014.

HOFSETZ, K.; SILVA, M. A. Brazilian sugarcane bagasse: energy and non-energy consumption. Biomass And Bioenergy, Kidlington, v. 46, p. 564-573, 2012.

HOSSEINAEI, O. et al. Effect of hemicellulose extraction on water absorption and mold susceptibility of woodeplastic composites. International Biodeterioration & Biodegradation, London, v. 71. p. 29 -35, 2012.

JAAKKOLA, M. S. et al. Association of indoor dampness and molds with rhinitis risk: A systematic review and meta-analysis. The Journal of Allergy and Clinical Immunology, St Louis, v. 132, n. 5, p. 1099-1110, 2013.

JOHANSSON, P. et al . Laboratory study to determine the critical moisture level for mould growth on building materials. International Biodeterioration & Biodegradation. V73, P.23–32 . 2012.

KARTAL, S. N. et al. Preliminary evaluation of storax and its constituents: fungal decay, mold and termite resistance. International Biodeterioration & Biodegradation, London, v. 70, p. 47-54, 2012.

LOH, Y. R. et al. Sugarcane bagasse: the future composite material: a literature review. Resources, Conservation and Recycling, Amsterdam, v. 75, p. 14-22, June. 2013.

MALONEY, T. M. The family of wood composite materials. Forest Products Journal, Peachtree Corners, v. 46, n. 2, p. 19-26. 1996.

McCULLAGH, P. Regression methods for ordinal data. Journal of the Royal Statistical Society, Series B, London, v. 42, p. 109-142, 1980.

MENDES, R. F. et al. Efeito da associação de bagaço de cana, do tipo e do teor de adesivo na produção de painéis aglomerados. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 161-170, 2012.

NAUMANN, A; STEPHAN, I.; NOLL, M. Material resistance of weathered woodeplastic composites against fungal decay. Int. Biodeterior. Biodegr. V.75. p 28 -32. 2012.

NIELSEN K.F et al. Mould growth on building materials under low water activities. Influence of humidity and temperature on fungal growth and secondary metabolism. International Biodeterioration & Biodegradation. V.54, Issue 4, p. 325–336.2004.

NIEUWENHUIJZEN, E. J. et al. Detection of Aureobasidium as the dominant fungus on coated wood. In: INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PROTECTION, 44., 2013, Stockholm. Proceedings… Stockholm, 2013. res. IRG/WP 13-10796.

PETRIČ, M. et al. Natural weathering of coated oil heat treated wood. In: ANNUAL MEETING JACKSON LAKE LODGE, 38., 2007, Wyoming, USA. Proceedings… Wyoming, USA, 2007. res. IRG/WP 07-30440.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing 2.14. Vienna, Austria, 2011. Disponível em:<http://www.R-project.org>. Acesso em: 22 dez. 2011.

SARTORI, D. et al. Painel em madeira de reflorestamento e chapas de partículas para instalações rurais. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 19, p. 171-178, 2012.

SEDLBAUER, K. Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components. 2001. 247 f. Ph D Thesis - Frauenhofer Institute for Building Physics, Stuttgart, 2001.

SHIRAKAWA, et al. Susceptibility of phosphogypsym to fungal growth and the effect of various biocides. International Biodeterioration and Biodegradation, v.49, n. 4, p. 293-298, 2002.

SHIRAKAWA, M. A et al. The development of a method to evaluate bioreceptivity of indoor mortar plastering to fungal growth. International Biodeterioration and Biodegradation, v.51, p. 83 - 92, 2003.

SILVA, A. J. P.; FRANÇA SANTOS, W. L.; ROCCO LAHR, F. A. Partículas longas e orientadas de bagaço de cana-de-açúcar na produção de painel similar ao OSB. In: XI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 11., 2008, Londrina. Anais... Londrina, 2008. 10 p.

SILVA, D. A. L. et al. Life cycle assessment of wood- based composites: state-of-the-art and opportunities for reducing environmental impacts. In: LAHR, F. A. R.; SAVASTANO JUNIOR, H.; FIORELLI, J. (Orgs.). Non-conventional building materials based on agro-industrial wastes. Bauru, SP: Tiliform, 2015. p. 143-178.

SILVA, V. L. M. M; GOMES, W. C. O.; ALSINA, L. S. Utilização do bagaço de cana de açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Campina Grande, v. 2, p. 27-32, 2007.

SUN, F. et al. Study on the thickness swelling of mould-resistant chemical treated bamboo strand woven outdoor flooring. In: ANNUAL MEETING BIARRITZ, 41., 2010, France. Proceedings… France, 2010. res.IRG/WP10-40489.

TEIXEIRA, D. E.; SANTANA, M. A. E.; COSTA, A. F. Aglomerados de bagaço de cana-de-açúcar: resistência natural ao ataque de fungos apodrecedores. Scientia Forestalis, Piracicaba, n. 52, p. 29-34, 1997.

TEIXEIRA, D. E.; SANTANA, M. A. E.; COSTA, A. F. Aglomerados de bagaço de cana-de-açúcar: resistência natural ao ataque de fungos apodrecedores. Scientia Forestalis, Piracicaba, n. 52, p. 29-34, 1997.

THELANDERSSON, S. et al. Modelling of onset of mould growth for wood exposed to varying climate conditions. In: INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PROTECTION, 40., 2009, Beijing. Proceedings… Beijing, 2009. res. IRG/WP 09-20414.

WYPYCH, G. Handbook of material weathering. 5th ed. Toronto: ChemTec Publishing, 2013.

YANG, D. Q Water absorption of various building materials and mold growth. In: Annual Meeting, 39., 2008., Istanbul. Proceedings… Istanbul, 2008. res.IRG/WP08-10657.

YANG, D. Q. Control of moisture content in wood materials for mold growth. In: INTERNATIONAL UNION OF FOREST RESEARCH ORGANIZATIONS, 2007, Taiwan. Proceedings… Taiwan, 2007. res. 10630.

YANG, D. Q. Drying rates and mold growth on various building materials under different environmental conditions. In: Annual Meeting Biarritz, France, 41., France, 2010. Proceedings… France, 2010. res.IRG/WP10-20454.

YANG, D. Q.; WANG, X. M.; WAN, H. Biological protection of composite panel from moulds and decay. In: Annual Meeting Jackson Lake Lodge, Wyoming, USA, 38., Jackson, 2007. Proceedings… Jackson, 2007.

ZENID, G. J. Madeiras e suas características. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Eds.). Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro. Jerônimo Monteiro: Suprema Gráfica e Editora, 2007. p. 125-158.

Capítulo 7. Perfil de densidade por raios X e espectroscopia por infravermelho próximo NIR (*near infrared spectroscopy*) aplicada na análise de durabilidade em painéis alternativos particulados de bagaço de cana-de-açúcar BCP e comerciais de madeira MDP.

Resumo

O presente capítulo apresenta a aplicação das técnicas de densitometría de raios x, e espectroscopia por infravermelho na obtenção do perfil de densidade ao longo da espessura dos painéis alternativos fabricados com partículas de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona e painéis comerciais de madeira MDP. As técnicas foram aplicadas após ensaios de durabilidade por intemperismo natural, envelhecimento acelerado, intemperismo artificial e crescimento de fungo emboloradores. Foi avaliado o efeito do revestimento superficial com resina a base de óleo de mamona em ambos os materiais. Os resultados dos perfis de indicam uma redução gradativa para ambos materiais devido aos fatores de degradação presentes em cada tipo de ensaios. No entanto a adição de revestimento de superfície permitiu aos materiais apresentar melhor desempenho na propriedade após os ensaios de envelhecimento. Os painéis de BCP apresentaram uma redução menor na densidade em relação aos painéis comerciais. A técnica de espectroscopia permitiu classificar grupos de materiais após diferentes condições de envelhecimento, por tanto se apresenta como uma técnica não destrutiva na avaliação de materiais.

1 Introdução

No Brasil, a produção de painéis de madeira aglomerada teve inicio em 1966 (MENDES; ALBUQUERQUE; IWAKIRI, 2003). Segundo a (ABIPA, 2013), a valorização dos painéis particulados nos últimos anos aumentou o crescimento das florestas plantadas no país, disponibilizando este material para múltiplos usos, onde a indústria moveleira é a grande consumidora de painéis de madeira industrializados.

Os ensaios não destrutivos apresentam como principais vantagens a rapidez na coleta de dados, o baixo custo e a possibilidade de avaliação de grande número de amostras, Por tanto as técnicas não destrutivas têm sido cada vez mais utilizadas por vários setores florestais e industriais (GOMES et al., 2011). Segundo Schwanninger, Rodrigues e Fackler (2011) o NIR consiste em uma técnica de análise não destrutiva que mede a intensidade de absorção da luz infravermelha próxima e da vibração das ligações moleculares em cada comprimento de onda entre 800nm e 2500 nm (12500 cm-1 e 4000 cm-1). Tem como fundamento que as ligações covalentes das substâncias orgânicas absorvem a energia das vibrações, usando essa absorção para avaliação do tipo e número de ligações moleculares nas amostras de estudo (BARBOSA, 2007). Assim como cada amostra contem composições químicas características e comprimento de onda específico, cada material apresenta diferente

absorção de luz, que é obtida ela diferença entre a quantidade de luz emitida pelo NIR e a quantidade de luz refletida pela amostra (PASQUINI, 2003).

O uso da espectroscopia NIR oferece uma combinação de velocidade, simplicidade na preparação das amostras, fácil utilização, é uma técnica não destrutiva. Alem disso permite a analise de um grande numero de amostras em pouco tempo (PASQUINI 2003; SCHWANNINGER; RODRIGUES; FACKLER, 2011). Segundo Franco (2014), o emprego do NIR no Brasil é recente , e avanços no uso da técnica se fazem necessários para que as vantagens da avaliação possa se consolidar no Brasil, alem da possibilidade de poder suprir a demanda para novo métodos de avaliação de madeiras.

Pesquisas desenvolvidas tem utilizado NIR na avaliação de diferentes características nas madeiras como densidade (FRANCO 2014; GOUVÊA et al., 2011) propriedades químicas da madeira (HEIN; LIMA; CHAIX, 2009) alterações devido a degradação química e biológica (HOFFMEYER; PEDERSER, 1995) , propriedades mecânicas (RIALS; KELLEY; SO, 2002) e avaliação de degradação em madeira laminada colada (GASPAR et al., 2009). Em painéis particulados alguns estudos tem se focado na análise de teores e conteúdo de resíduos lignocelulósicos incorporados em painéis MDF (BELINI et al., 2011) identificação porcentual da resina em painéis Oriented Strand Board (VIA 2013; TAYLOR; VIA, 2009) propriedades físico mecânicas de painéis particulados a base de madeira e resíduos agroindustriais (HEIN et al., 2011).

A análise dos perfis de densidade (gradiente de densidade), por densitometría de raios x, é considerada como uma das principais técnicas não destrutivas de análises da qualidade dos painéis (GRECON, 2012) e se constitui um importante parâmetro de avaliação definir o tipo de aplicação (BELINI, 2012), permitindo também inferências quanto às suas propriedades mecânicas e calibração dos ciclos de prensagem.

De igual forma permite conhecer o efeito das variáveis da fase de prensagem dos colchões de fibras para calibração dos ciclos de prensagem aplicados em linha de produção, assim como determinar (i) Densidades máximas nas faces superior e inferior também denominada como “pico de densidade” e relacionada com as propriedades físico-mecânicas e de aplicabilidade. Os maiores valores de densidade nas faces superior e inferior dos painéis indicam maior compactação da massa de fibras nesta região. (ii) Densidade mínima: densidade observada na região interna do painel e relacionada com o seu desempenho (adesão interna resistência à tração perpendicular e arrancamento de parafuso topo). (iii) Densidade média: densidade do painel determinada através da média dos valores observados no decorrer da na espessura do painel (SARTORI, 2015).

O objetivo principal deste estudo foi caracterizar os dois tipos de painéis particulados de densidade média: painéis alternativos de bagaço de cana- de -açúcar usando como adesivo a resina poliuretana a base de óleo de mamona painéis de partículas de madeira comerciais (Medium Density Particleboard – MDP) antes e após os ensaios de durabilidade. Foram utilizadas duas técnicas de análise não destrutivas (perfil de densitometria por raios x e

espectroscopia por infravermelho próximo NIR) na análise e classificação dos efeitos de deterioração produzidos por ensaios de envelhecimento acelerado e natural.

2 Materiais e Métodos

2.1 Composição química

A composição química do bagaço de cana-de-açúcar e do painel MDP foi realizado para identificar as frações de matéria seca (MS), Celulose, Hemicelulose e Lignina existentes no bagaço de cana-de-açúcar utilizado na fabricação dos painéis e na composição do painel comercial de madeira de *Eucalytus sp* . A análise bromatológica pelo método de Weende será realizada no Laboratório de Nutrição da FZEA/USP, que permite a identificação de grupos de compostos químicos (LANA, 2005).

2.2 Fabricação de painéis de partículas de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona

Os painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar (BCP) com resina bicomponente a base de mamona foram produzidos em escala de laboratório seguindo as recomendações estabelecidas por Maloney (1996) e adaptadas por Sartori et al. (2012). O processo iniciou com a coleta do bagaço de cana-de-açúcar em duas usinas da região de Pirassununga-SP. O material foi peneirado em malha de 2 mm para retirar as partículas mais finas. Posteriormente, foi picado em um moinho de facas com peneira de 8 mm e seco em estufa (60 °C) até atingir umidade de equilíbrio de 12%. Como aglomerante de partículas do bagaço de cana-de-açúcar foi utilizada resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona, sendo um dos componentes o poliol derivado do óleo vegetal e o outro o isocianato polifuncional (catalisador), em uma proporção de 1 parte de poliol para 2 partes do catalisador , em 15% da massa das partículas.

A resina e as partículas foram misturadas em um batedor planetário durante 3 minutos. Posteriormente, as partículas foram inseridas em um molde formador de painel (50 x50 cm) e inserida em prensa termo-hidráulica a condições de 100°C e 5 MPa de pressão, por 10 minutos. O painel foi esquadrejado retirando as bordas para seu acabamento final. As características do painel e do processo de fabricação foram: Dimensões: 0,40 x 0,40 m, Espessura: 12 mm, Densidade: 800 kg/m^3 Tipo de painel: Aglomerado convencional, Distribuição de partículas no painel: Homogênea e Método de prensagem: Convencional.

2.3 Painel de madeira comercial (MDP)

Os painéis comerciais denominados MDP (Medium Density Particleboard) foram comprados com as seguintes dimensões 15x1830x2750 mm, sendo confeccionados com partículas de *Eucaliptus* sp) e resina uréia-formaldeído.

2.4 Tratamentos para as áreas superficial e lateral dos Corpos de Prova

Tratamento superficial: A metade dos corpos de prova de ambos os materiais foi tratado superficialmente com resina poliuretana à base de óleo de mamona, como revestimento externo, com o objetivo de ser avaliada como proteção superficial do material, notadamente contra agentes de degradação (água e umidade) presentes no ensaio dos ensaios de propriedades físicas.

Tratamento Lateral: Foi realizada uma selagem das bordas para assegurar a entrada de água através da superfície em cada um dos grupos de material MDP e BCP. As bordas dos corpos de prova foram revestidas com três diferentes componentes: (a) Resina a base de acrílico (massa para madeira); (b) seladora concentrada SM280 suvinil e (c) verniz com duplo filtro solar marca suvinil, para garantir que a entrada da água ocorra pelas superfícies.

2.5 Ensaios de durabilidade

Seis (6) corpos de prova de cada grupo de materiais com (270x50x12mm) para BCP e (270x50x15mm) para MDP foram expostos aos diferentes ensaios de durabilidade explicados resumidamente a seguir:

2.5.1 Envelhecimento acelerado

a) APA D1: Os corpos de prova foram submetidos a um 1 ciclo de envelhecimento acelerado, tendo como variáveis a umidade relativa e a temperatura nas etapas: (1) Imersão água a 66°C por 8h (2) Ar quente e seco 82°C por 14,5h (3) Acondicionamento à temperatura de 20 ± 5˚C e umidade relativa de 65 ± 2% por 1,5 h.
b) T82°C: Os corpos de prova foram submetidos a uma temperatura de 82°C por 14,5h.
c) UR93%: Os corpos de prova foram submetidos a uma temperatura de 82°C por 8h.

2.5.2 Deterioração por fungos emboloradores

d) ASTMD 3273-12 (2012): Corpos de prova de cada material foram pendurados dentro da câmara climática acima de 7,5 com do solo inoculado com os fungos e incubados por 28 dias. A avaliação do crescimento superficial de bolor semanal usando uma escala de estimação baseada em desenhos padronizados que variam de zero (0) à 10, onde 10 corresponde à ausência de crescimento e (0) com o total crescimento.

2.5.3 Intemperismo natural

e) ASTM D 1435-94 (1994): Os grupos de corpos de prova para o ensaio de envelhecimento foram expostos em Pirassununga, SP (latitude 21° 57' 33S Longitude 47° 27' 7S) com exposição de em uma bancada metálica inclinada a 31º e voltada para a face norte, avaliados durante 3, 6 e 12 meses no período de 25 de junho de 2012 a 25 de Junho 2013.

2.5.4 Intemperismo artificial por UV

f) ASTM G 154-06: Os corpos de prova foram submetidos a 600 horas de exposição correspondente a 50 ciclos de acordo com o ciclo 7 utilizado para ocasionar choque térmico e erosão em revestimentos de madeira nas etapas: (1) UVA-340 a 60°C ±3 por 8 h , (2) Aspersão de água por 0,25h (3) Condensação a 50°C ±3 por 3,75h.

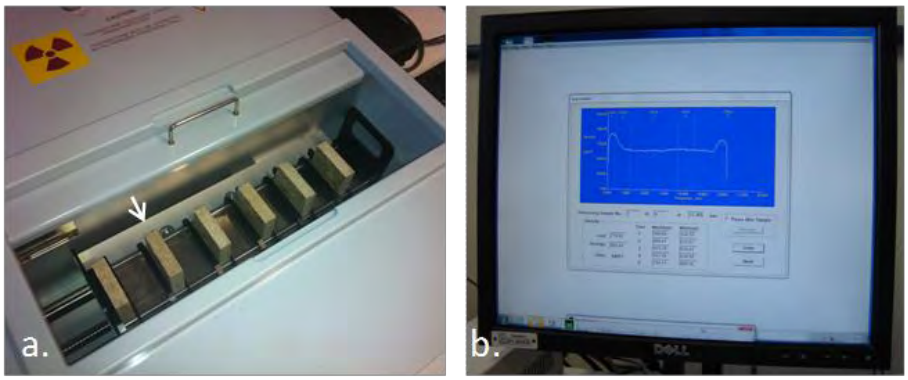
2.6 Confecção e acondicionamento dos corpos de prova

Os dois tipos de chapas, tantas as confeccionadas no laboratório a partir de bagaço de cana-de-açúcar assim como o comercial MPD, serão caracterizadas em suas propriedades físicas e mecânicas. Os corpos de prova serão extraídos dos painéis de acordo com as dimensões estabelecidas para cada uma das propriedades avaliadas na Norma ABNT NBR 14810:2006.

2.7 Perfil de densidade

As análises de perfil de densidade foram realizadas em corpos de prova de 50 x 50 mm, extraídos dos corpos de prova expostos aos diferentes ensaios de durabilidade, foram mantidos em câmara de climatização (T20°C) e (UR60%) em equipamento Quintek QDP (Figura 59) instalado no Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP). Esta análise foi realizada a fim de conhecer o perfil da densidade ao longo da espessura, e para avaliar a mudança da mesma durante os períodos de ensaios de deterioração, fornecendo informações relevantes quanto à dinâmica de alterações, o que remete à aplicabilidade final dos painéis, seguindo as recomendações estabelecidas por Belini et al. (2012). Essa análise proporcionou a obtenção de 4 parâmetros de densidade (i) densidade média, (ii) densidade máxima da face superior, (iii) densidade máxima da face inferior e (iv) densidade mínima, ao longo da sua espessura.

Figura 59. Analise de perfil de densidade. (a) Densitômetro Quintek QDP. zeta indica o ponto de leitura do equipamento em cada corpo de prova. (b) Leitura de perfil de densidade.



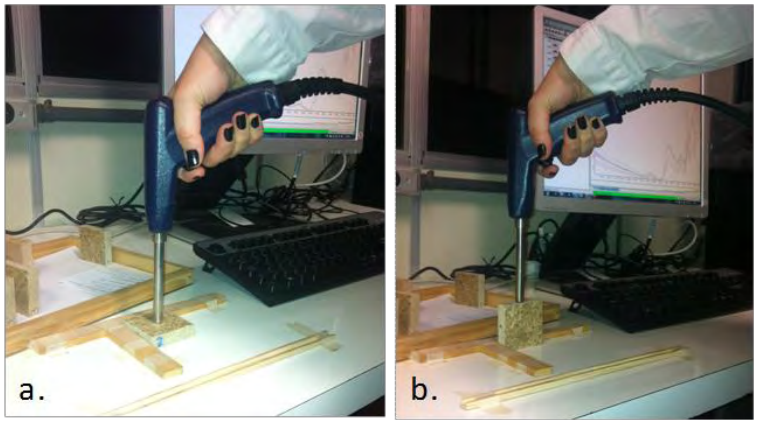
Fonte: Própria autoria

2.8 Espectroscopia no Infravermelho próximo (NIR)

A espectroscopia NIR (*near infrared spectroscopy*) é uma técnica inovadora de análise e apresenta inúmeras aplicações em painéis, como (i) identificação do porcentual de resina (TAYLOR, 2009) (ii) no controle do processo de fabricação (HORWATH et al., 2005) e na identificação de percentuais de resíduos agrícolas incorporados (BELINI et al., 2011).

No presente trabalho, amostras dos painéis "in natura" e moídas tiveram obtenção espectral com a esfera de integração e fibras ópticas no modo de reflexão difusa do NIR na região de 800-2500 nm com uma resolução de 8 cm^{-1}, em equipamento modelo MPA, Brucker, agregado ao programa OPUS versão 7, do Laboratório de Ciências Florestais da ESALQ/USP, para determinação dos componentes químicos elementares, e da disponibilidade dos mesmos durante os tratamentos e exposição à processos de degradação. Foram realizadas 3 medições na superfície de cada corpo de prova (Figura 60a) e na sua lateral (Figura 60b).

Figura 60. Analise de espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) a)Medição na superfície b) Medição lateral



Fonte: Própria autoria

2.9 Analise estatística

Para os valores experimentais dos perfis de densidade (Densidade máxima, média e mínima) foram realizadas análises estatísticas por meio do programa S.A.S, versão 9.3. Foi realizada a analise de variância, ANOVA fatorial para as fontes de variação (Material (BCP e MDP) x Revestimento (CR e SR) x Ensaios de durabilidade) e para avaliar os efeitos das médias foi adotado o teste Tukey com nível de significância de 5%.

Os dados espectrais para análise no NIRS foram tratados por análise multivariada (Análise de componentes Principais), a qual torna possível a análise simultânea de medidas múltiplas para cada indivíduo, objeto o fenômeno observado ou seja utilizam simultaneamente todas as variáveis na interpretação teórica do conjunto de dados obtidos (RODRIGUES A; PAULO. E., 2014).

Desse modo e dentro das técnicas de análise multivariada foi utilizada a análise discriminante (ACP: Análise em Componentes Principais, PLS-DA: Partial Least Square Regresion – Discrimante Analysis) que tem por objetivo (i) Determinar se existem diferenças significativas entre as características de cada grupo (ii) Identificar as características que melhor diferenciam os grupos de observações (iii) Descrever uma ou mais funções discriminantes que melhor classifique os indivíduos nos diferentes grupos e (iv) Classificar novos indivíduos nos grupos com base nas funções discriminantes estimadas (RODRIGUES; PAULO, 2014).

A análise ACP tem como objetivo principal a obtenção de combinações interpretativas, a construção de gráficos bidimensionais que resume as informações espectrais que permitem identificar grupos de amostras de acordo com suas semelhanças (SCHWANNINGER; RODRIGUES; FACKLER, 2011). Os resultados dos espectros NIR foram explorados de (1100 a 2500 nm ou de 9000 a 4000 cm^{-1}) pela análise de componentes principais, aplicando como pre-tratamento dos espectros, a primeira derivada. Foi utilizado o Software Unscrambler 9.7 (Camo, AS, Norway).

3 Resultados e discussão

3.1 Composição química

Na Tabela 34 são apresentados os valores, em porcentagem na matéria seca (MS), dos constituintes lignina , celulose e hemicelulose das partículas de bagaço de cana-de-açúcar utilizado na fabricação dos painéis particulados com resina a base de óleo de mamona e os painéis comercias de madeira de *Eucalytus sp* fabricados com resina a base de ureia formaldeído obtidos no presente estudo assim como valores encontrados na literatura. Com relação ao teor de lignina, hemicelulose e celulose os valores experimentais são semelhantes aos encontrados por (CARVALHO et al., 2006; SARTORI, 2015; BONILLA, 2015). Os resultados de celulose também são similares aos obtidos por (FARUK et al., 2012; FIORELLI et al., 2014).

Observe-se que o bagaço de cana de açúcar e do painel de madeira de *Eucalyptus sp* comercial MDP apresentam uma composição química similar. Segundo Rowell, Han e Rowell (2000) isto possibilita o uso de resíduos agroindustriais, que conferem alta resistência mecânica, já que a composição química destes materiais é semelhante à da madeira, mais precisamente com a das madeiras duras que contêm menor teor de lignina e maior teor de hemiceluloses do tipo pentosanas. Da mesma forma estrutura (SANTANA; TEIXEIRA, 1993) indicam que a estrutura lignocelulósica do bagaço é semelhante à da madeira.

Tabela 34. Porcentagem média dos constituintes do bagaço de cana de açúcar e painel comercial MDP em sua composição química valores experimentais e da literatura.

		Massa Seca (%)	Lignina (%)	Celulose (%)	Hemicelulose (%)
	Painel MDP Eucalyptus sp. (experimento)	91,7	12,5	56,2	20,1
Bagaço de cana de açúcar	Valor experimental	95,2	10,6	51,7	29,0
	Carvalho et al. 2006	NC	7,34	30,3	20,68
	Rezende et al 2011	NC	22,2	35,2	24,5
	Faruk O et al 2012	NC	25,3	55,2	16,8
	Bonilla 2015	NC	13,32	52,24	26,92
	Fiorelli et al 2014	NC	27,29	50,47	15,1
	Sartori 2015	NC	10,74	50,4	30,56

Fonte: Própria autoria

3.2 Perfil de densidade

De acordo com os resultados obtidos dos perfis densidade ao longo da espessura dos painéis de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana, após os diferentes ensaios de durabilidade apresentaram para os painéis sem envelhecimento, perfis de densidade (indicados pela curva preta) típicos de painéis homogêneos , caracterizados por não ter variações ao longo da espessura isto para os corpos de prova com revestimento e sem revestimento Figura 61a e Figura 61c. Isto indica que as condições de prensagem foram adequadas para o processo neste tipo de painéis.

Os resultados obtidos são similares aos encontrados em painéis fabricados com resina a base de óleo de mamona em painéis homogêneos de fibra de coco (BONILLA, 2015) e bagaço de cana-de-açúcar (SARTORI, 2015) nas mesmas condições de prensagem e temperatura do presente estudo (Figura 62). Fatores como aquecimento ou pressão desigual nas superfícies da chapa, baixas pressões durante prensagem e/ou baixa umidade do colchão de partículas, baixa ou alta velocidade de prensagem podem ocasionar deformações nos perfis de densidade (SICOPLAN, 1996).

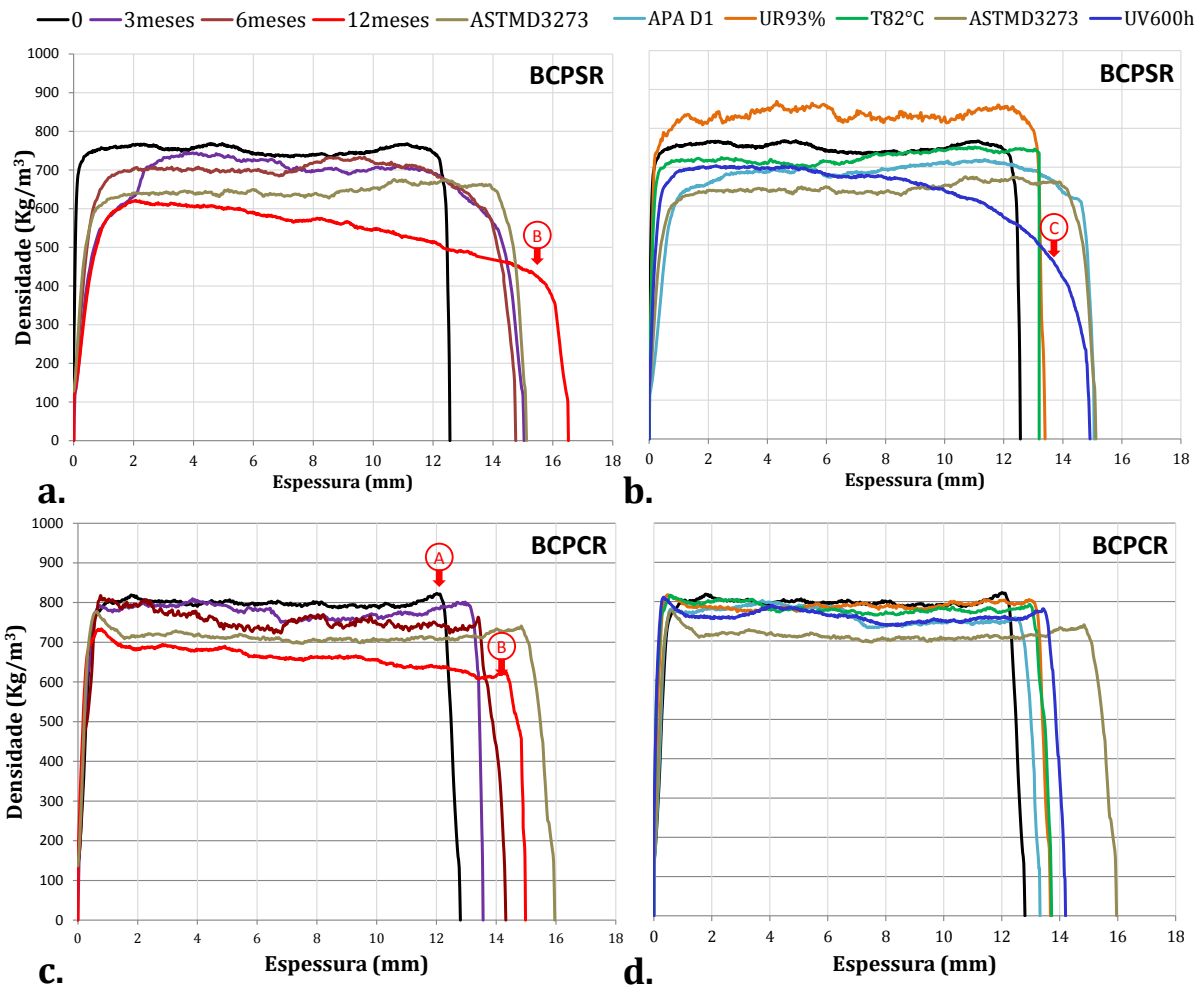
A Figura 61a e Figura 61c apresentam os perfis de densidade após o ensaio ao intemperismo natural (3, 6, 12 meses e crescimento de fungos pela norma ASTMD3273, 2012) observe-se a redução gradativa da densidade para todos os perfis e uma inclinação na parte direita que corresponde a face exposta ao intemperismo como indica o ponto B. Para o período de 3 e 6 meses foi observada uma redução na densidade e 12 meses (linha vermelha) se apresenta como o tempo de exposição que gerou maior diminuição na densidade e aumento no inchamento em espessura do material como explicado no capitulo 5.

Nos painéis BCPCR pode-se observar uma elevação no perfil indicado pelo ponto A na Figura 61c devido à camada de revestimento superficial no material, a redução na densidade se apresenta numa menor proporção para os diferentes tempos de exposição e o ensaio ao crescimento de fungos emboloradores incrementou o inchamento na espessura por acima dos outros tratamentos. Isso pode ser explicado em parte pelo papel que desempenham os componentes químicos de cada material e o efeito esponja causado por capilaridade e absorção de água ao interior dos poros no painel (HEIN et al., 2011).

A Figura 61b apresenta os perfis para os ensaios de durabilidade acelerados. O ensaio por intemperismo artificial UV600h (linha azul marino) mostra um comportamento no na zona media do painel próximo do perfil do ensaio acelerado APAD1(Linha azul claro), pode-se observar uma inclinação na parte direita correspondente à face exposta do material aos fatores de luz ultravioleta, aspersão de água e condensação no ensaio.

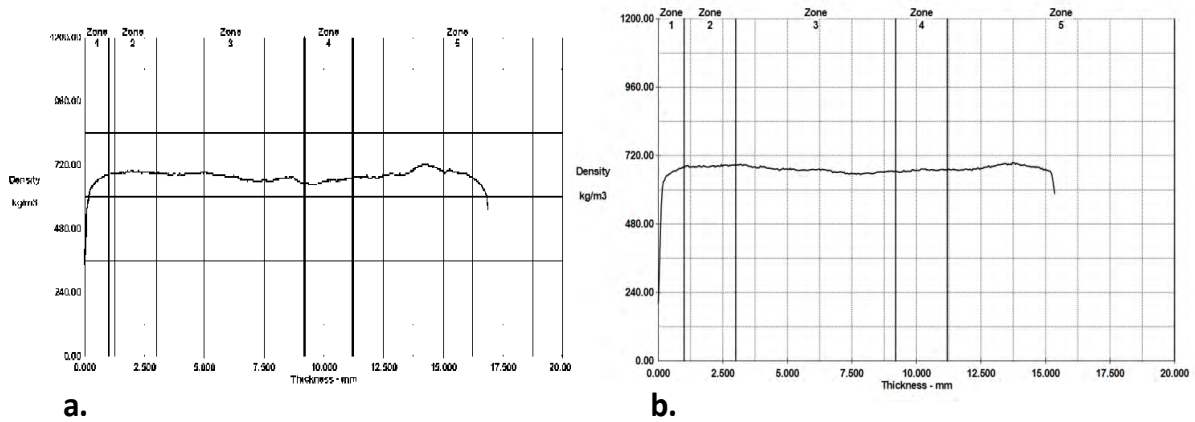
Na Figura 61d pode se observar o efeito da resina de óleo de mamona utilizada como revestimento superficial na proteção do material aos diferentes fatores de degradação. As condições de T82°C e UR93% não se apresentam como fatores de alteração na densidade dos materiais. De igual forma o ensaio ASTMD 3273 (2012) se apresenta como o ensaio de maior redução na densidade isto possivelmente devido em parte às condições de alta umidade presentes durante os 28 dias de ensaio em câmara.

Figura 61. Perfis de densidade após ensaios de durabilidade. BCPSR (a) Intemperismo natural (b) Ensaios acelerados. BCPCR(c) Intemperismo natural (d) Ensaios acelerados.



Fonte: Própria autoria. Ponto A: elevação no perfil devido ao revestimento superficial. Ponto B: Redução da densidade fase superior de exposição 12 meses. Ponto C: Redução do perfil de densidade fase exposta ensaio UV600h.

Figura 62. Perfis de densidade média para painéis homogêneos fabricados com resina poliuretana a base de óleo de mamona (a) Fibra de coco (b) Partículas de bagaço de cana de açúcar .



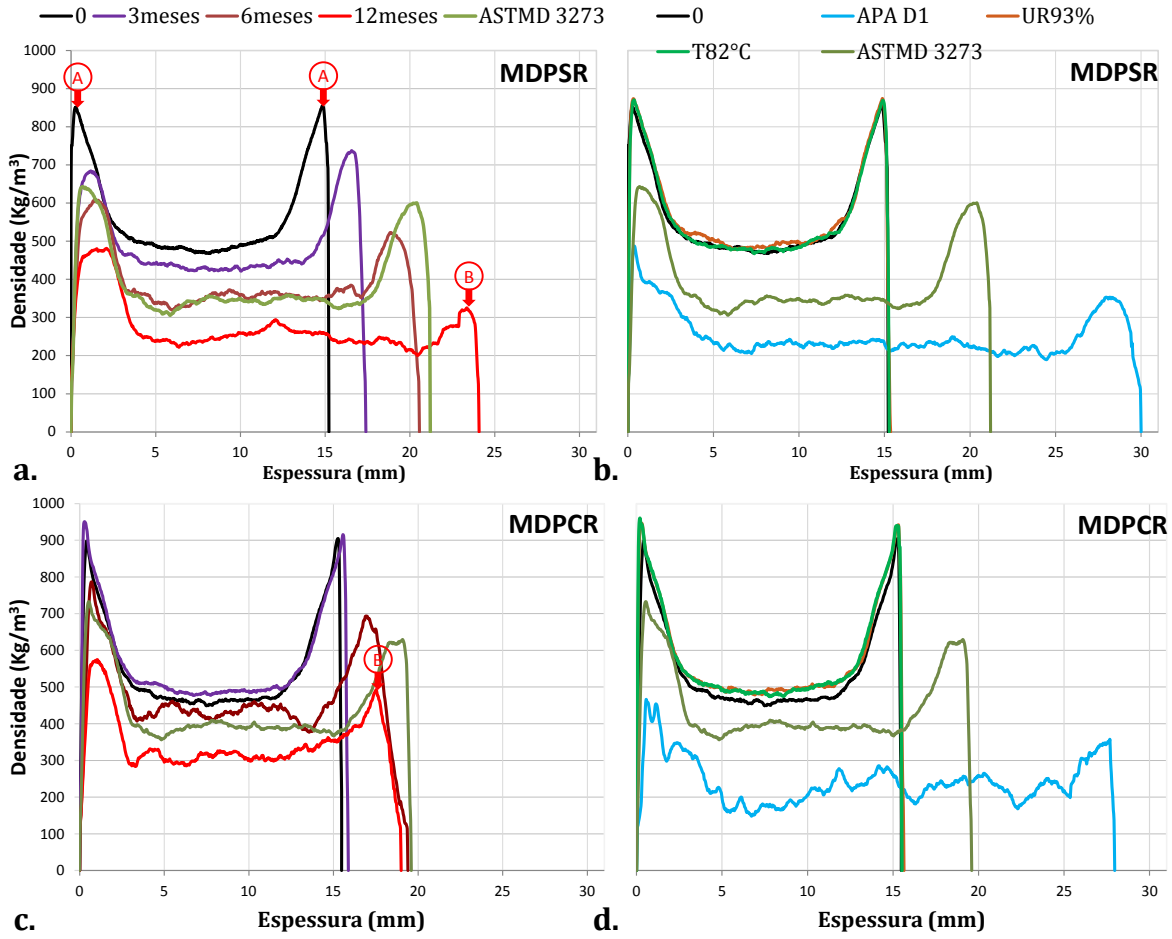
Fonte: (a) BUENO, S. B. **Chapas de partículas multicamadas com resíduos lignocelulósicos e resina PU de mamona**. 88 f. Dissertação (Mestrado) – FZEA -USP, Pirassununga, 2015. (b) SARTORI, D. L. **Painel modular de chapas de partículas de bagaço de cana para fechamento lateral de instalação para bovinos** 178 f. Tese (Doutorado) – FZEA-USP, 2015.

Os painéis comerciais de madeira MDP apresentam no perfil de densidade inicial (pela linha preta) similar à letra M, caracterizados pela maior densidade nas faces (indicadas pelos pontos A) sendo perfil típico de painéis de partículas MDP multicamada (BONILLA, 2015) e MDF de eucalipto - *Eucalytus grandis* e bagaço de cana de açúcar (BELINI et al., 2014). As variações internas nos painéis podem ser obervadas após os ensaios de durabilidade na Figura 63.

A exposição ao intemperismo natural nos painéis MDPSR apresentam uma redução na densidade média. Pode-se observar que após 6 meses de exposição os painéis apresentam um perfil na zona média similar ao perfil encontrado após o ensaio de crescimento por fungos emboloradores (Figura 63a). O efeito do revestimento superficial nos painéis MDPCR pode-se observar na Figura 63c, onde a redução na densidade com o passar dos diferentes tempos de exposição foi menor em comparação aos materiais não revestidos, de igual forma pode se observar uma maior diminuição na densidade para as faces externas que estiveram expostas aos fatores ambientais de precipitação, radiação solar, temperatura e umidade relativa (pontos B).

A Figura 63b apresenta os perfis para os ensaios de durabilidade acelerados nos painéis MDPSR. Os ensaios acelerados de APA D1 e crescimento de fungos emboloradores se apresentam como os ensaios que incidem na redução da densidade abaixo de 400kg/m^3. Assim mesmo o aumento no inchamento na espessura do material isto devido as condições extremas do ensaio acelerado de imersão em água e altas temperaturas.

Figura 63. Perfis de densidade após ensaios de durabilidade. MDPSR (a) Intemperismo natural (b) Ensaios acelerados. MDPCR(c) Intemperismo natural (d) Ensaios acelerados. Ponto A: elevação no perfil devido camadas externas. Ponto B: Redução da densidade fase superior de exposição 12 meses.



Fonte: Própria autoria

Os resultados obtidos pela análise de densitometria de raios x dos painéis de bagaço de cana de açúcar BCP e painéis comerciais de madeira MDP são apresentados na Tabela 35, apresentando os valores para densidade máxima, média e mínima após os diferentes ensaios de durabilidade para ambos os materiais com e sem revestimento superficial. Os valores de densidade (máxima, média e mínima) indicaram uma diferença entre as diferentes ensaios de durabilidade para ambos os materiais (BCP e MDP) com e sem revestimento superficial.

A homogeneidade nos valores de densidade média obtidos para os painéis de bagaço de cana de açúcar foi influenciada pelo revestimento, para o caso dos ensaios acelerados os painéis de BCPCR a menor densidade média (670 kg/m³) no ensaio ASTMD3273-2012 apresentado como o mais agressivo. No em tanto para os painéis BCPSR os menores valores obtidos foram para ensaios APA D1(649 kg/m³), UV600h(662 kg/m³) e ASTMD 3273-2012 (564 kg/m³). No ensaio de intemperismo natural pode-se observar o efeito do revestimento superficial que proporcionou uma maior homogeneidade na densidade média durante o 3 e

6 meses de exposição em relação à densidade inicial obtida. A diminuição gradativa da densidade média nos painéis BCPSR foi identificada desde os 3 meses de exposição.

Tabela 35. Densidades máximas, médias e mínimas dos perfis obtidos para painéis de bagaço de cana de açúcar e painéis de madeira comercias após ensaios de durabilidade.

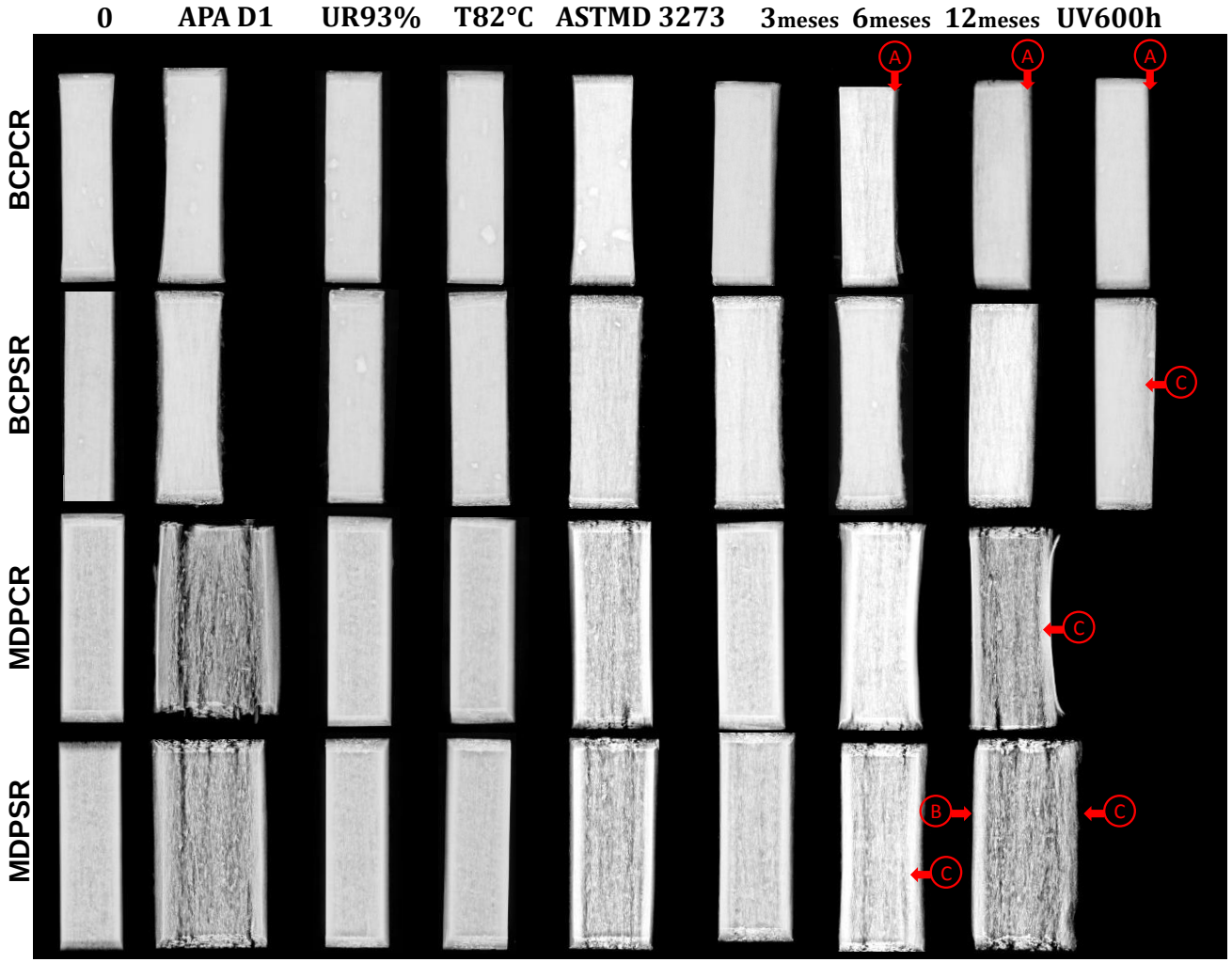
		Com revestimento superficial						Sem revestimento superficial					
	Ensaios de durabilidade	**Máxima**		**Média**		**Mínima**		**Máxima**		**Média**		**Mínima**	
BCP	**Inicial**	820	ab	784	ab	738	a	785	a	738	ab	526	a
	APA - D1	823	ab	758	ab	537	bc	737	ab	649	bc	463	ab
	UR93%	822	ab	771	a	550	b	824	a	768	a	550	a
	T82°C	824	a	771	a	562	b	750	a	708	b	522	a
	ASTM D3273 (2012)	740	b	670	b	457	c	625	b	564	c	396	b
	UV600h	803	a	747	ab	516	b	750	a	662	bc	464	ab
BCP	**Inicial**	820	ab	738	a	785	a	784	a	738	a	526	a
	3meses	832	a	765	a	544	c	704	b	631	b	500	ab
	6meses	781	b	734	a	659	b	718	b	633	b	442	b
	12meses	710	c	640	b	433	d	555	c	477	c	338	c
MDP	**Inicial**	717	a	585	a	382	b	709	a	611	a	504	a
	APA - D1	342	c	245	c	171	d	443	b	360	b	240	b
	UR93%	752	a	627	a	470	a	711	a	610	a	443	a
	T82°C	754	a	629	a	472	a	712	a	609	a	450	a
	ASTM D3273 (2012)	624	b	486	b	278	c	538	b	426	b	247	b
MDP	**Inicial**	717	a	585	a	382	a	709	a	611	a	504	a
	3meses	745	a	611	a	381	a	607	b	499	b	308	b
	6meses	643	b	495	b	324	ab	510	c	421	c	263	bc
	12meses	508	c	394	c	221	b	392	d	318	d	210	c

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey (P>0,05)

Fonte: Própria Autoria

As imagens de raios x digital (Figura 64) mostram a redução e o gradiente de densidade nas regiões centrais dos corpos de prova indicada pela baixa atenuação de raios x, desta forma corroborando os resultados obtidos através dos perfis de densidade. Os pontos A indicam as faces expostas nos materiais nos ensaios de intemperismo natural e artificial. Como exemplo observe-se que para o material MDP após 12 meses de exposição a região na fase superior (exposta) (ponto c) indica uma atenuação do raios-X a diferença da face inferior a qual não este exposta diretamente aos fatores ambientais.

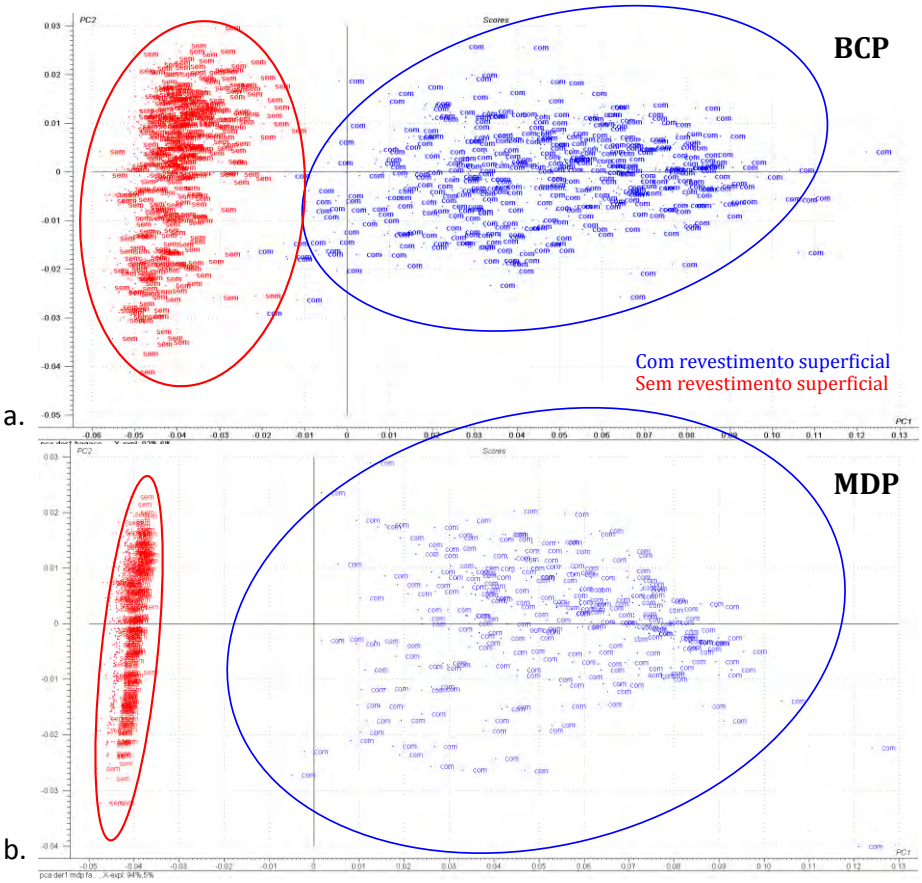
Figura 64. Imagens de raios x digital para painéis BCP e MDP após ensaio de envelhecimento acelerado, intemperismo natural, intemperismo artificial e crescimento de Fungos.



3.3 Análise dos ensaios de durabilidade em painéis particulados BCP e BDP por espectroscopia no infravermelho próximo(NIR)

Os resultados obtidos para a análise de componentes principais (ACP) para ambos os materiais (BCP e MDP) com e sem revestimento superficial (CR e SR) para cada um dos ensaios de durabilidade por envelhecimento acelerado, intemperismo natural, intemperismo artificial e crescimento de fungos emboloradores são apresentados a seguir.
Inicialmente observe-se na Figura 65a e Figura 65b que a análise por espectroscopia por infravermelho próximo permite a classificação e identificação de dois matérias com e sem revestimento superficial. De igual forma apresenta uma heterogeneidade maior nas amostras sem revestimento devido às características próprias das fibras. Esta heterogeneidade é diminuída pela adição do revestimento superficial em ambos os materiais. Belini et al. (2011) avaliaram painéis de eucalipto com diferentes teores de bagaço de cana de açúcar. A aplicação da metodologia de analise de ACP pelos autores permitiu distinguir os painéis de partículas de bagaço de cana de açúcar com fundamento nos diferentes padrões de resposta.

Figura 65. Resultados da Análise de Componentes Principais dos dados espectrais para as amostras de BCP e MDP

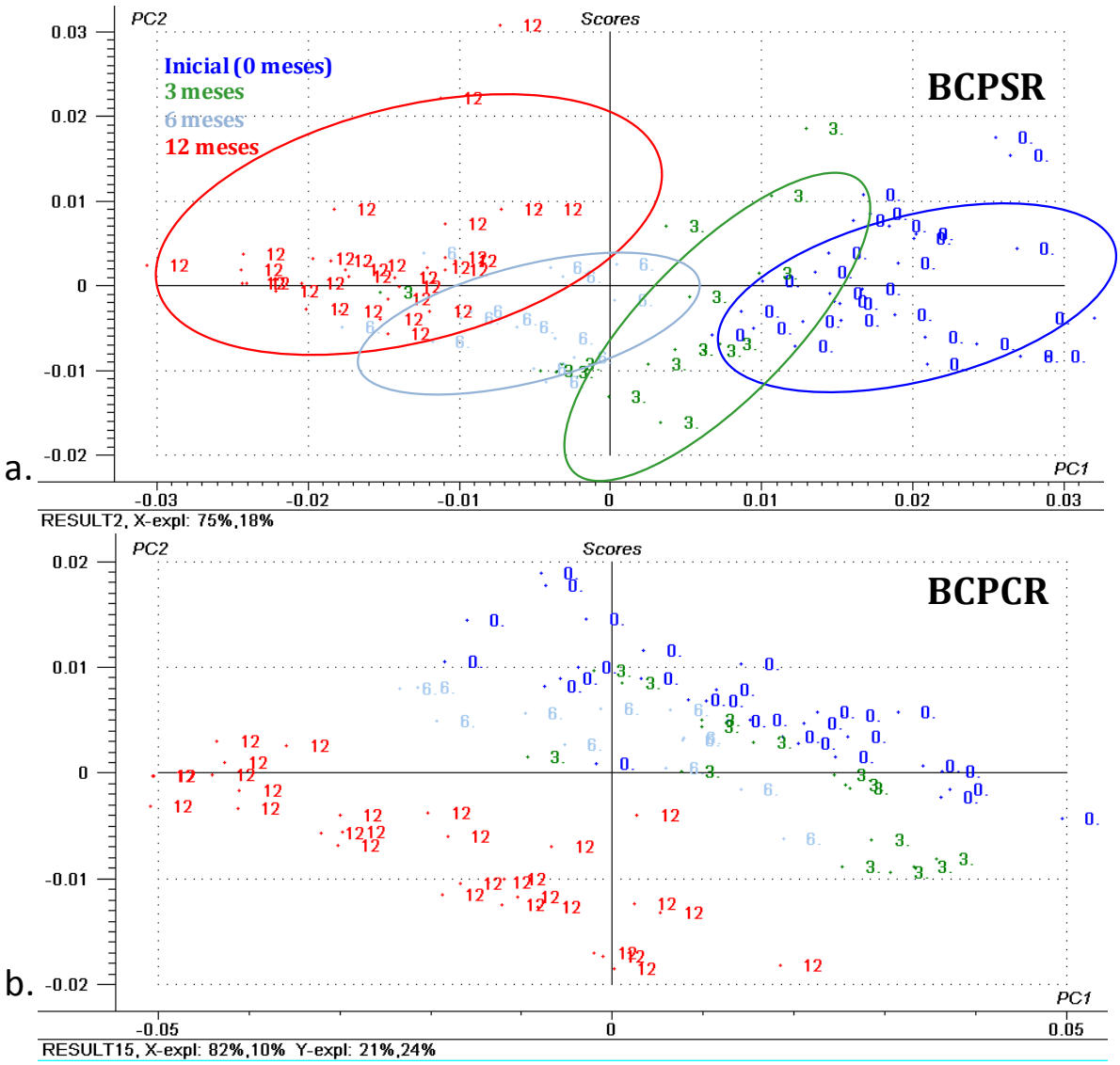


Fonte: Própria autoria

Para a Figura 66a os resultados da análise de componentes principais PC1 e PC2 indicam os diferentes grupos de amostras analisadas para bagaço de cana sem revestimento superficial (BCPSR) após os diferentes tempos de exposição (0, 3, 6 e 12 meses). Contudo para os corpos de prova com revestimento superficial (BCPCR) na .

Figura 66b essa classificação torna-se mais difícil de ser obervada. Isto possivelmente pode ser explicado pela ação da resina poliuretana a base de óleo de mamona utilizada como revestimento, que permite evidenciar uma maior diferença entre o grupo de amostras após 12 meses de exposição e as expostas aos outros tempos (3 e 6 meses).

Figura 66. Resultados da Analise de Componentes Principais dos dados espectrais para as amostras de (a) BCP SR e (b) BCPCR.

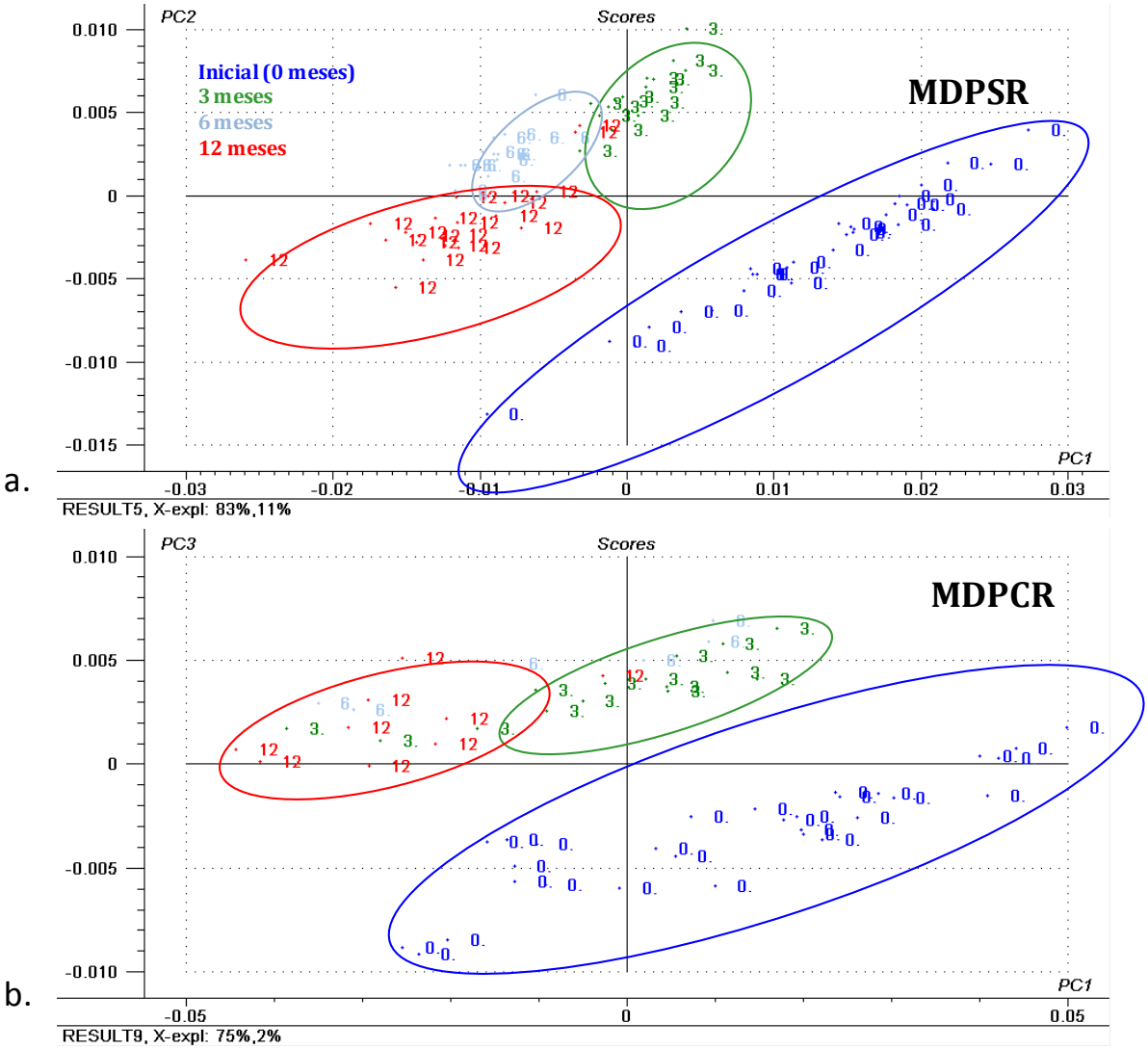


Fonte: Própria autoria

Para os corpos de prova dos painéis de madeira comercial a análise de componentes principais PC1 e PC2 representam o 94% da variabilidade dos dados e permitiu a identificação dos grupos expostos aos diferentes tempos durante o ensaio de envelhecimento natural como apresentado na Figura 67a e Figura 67b, onde é possível

discriminar as amostras de 0, 3, 6 e as amostras de 12 meses. Contudo os dados correspondentes aos corpos de prova com revestimento superficial apresentam uma maior variabilidade que pode ser atribuída ao efeito do revestimento superficial.

Figura 67. Resultados da Analise de Componentes Principais dos dados espectrais para as amostras após ensaio de envelhecimento natural (a) MDPSR e (b) MDPCR

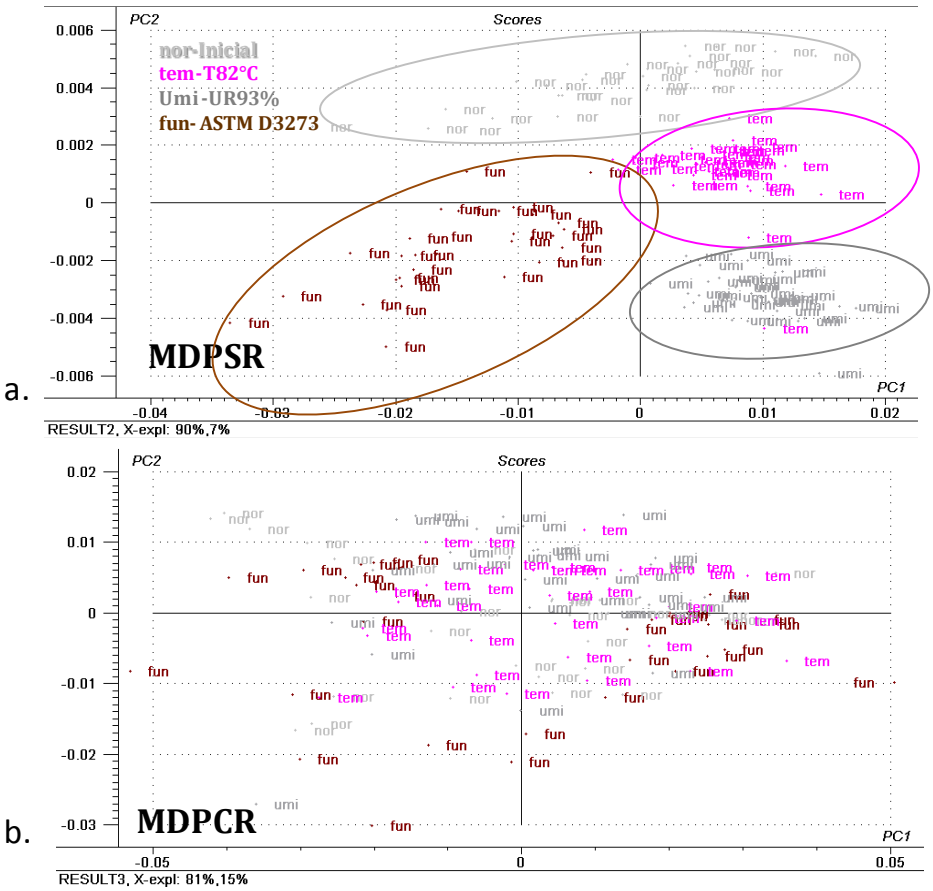


Fonte: Própria Autoria

Finalmente para realizado o analise de componentes principais para os dados espectrais para painéis comerciais de madeira MDP com e sem revestimento superficial após três dos ensaios de envelhecimento acelerado, pode se inferir que a composição química dos materiais uma vez expostos apresenta mudanças que são explicadas e identificadas mediante a técnica de espectroscopia por infravermelho (Figura 68a). No entanto e corroborando o efeito de proteção da resina poliuretana utilizada como revestimento superficial apresenta uma variabilidade entre os grupos analisados impedindo de realizar uma classificação (Figura 68b). Gaspar et al. (2009) aplicaram o NIR para classificar

madeira colada submetida a ciclos de impregnação com água e secagem e atribuíram essas diferenças à degradação produzida no adesivo utilizado para a colagem.

Figura 68. Resultados da Analise de Componentes Principais dos dados espectrais para as amostras após ensaios de envelhecimento acelerado T82°C, UR93% e ASTMD 3273-12 (2012) (a) MDPSR e (b) MDPCR



Fonte: Própria autoria

Os espectros da face superficial obtidos dos corpos de prova para ambos os materiais indicam a variação dos valores de absorbância. Isto possibilitou diferenciar os diferentes ensaios de envelhecimento aos que foram expostos os corpos de prova assim como os efeitos gerados na composição dos materiais após exposição. As diferenças dos espectros de absorbância após os diferentes ensaios de envelhecimento natural indicam a possibilidade da aplicação da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) na identificação de características relacionadas com a durabilidade de painéis alternativos de bagaço de cana de açúcar (Figura 69 e Figura 69b).

Em materiais complexos tais como a madeira os cálculos para identificar banda da lignina pode ser mais complexa. Isto por ter uma estrutura complexa o que a situa em diferentes lugares do espectro (SCHWANNINGER; RODRIGUES; FACKLER, 2011). No entanto os autores indicam a banda de 5974 cm^{-1} como uma localização correta da lignina em madeiras

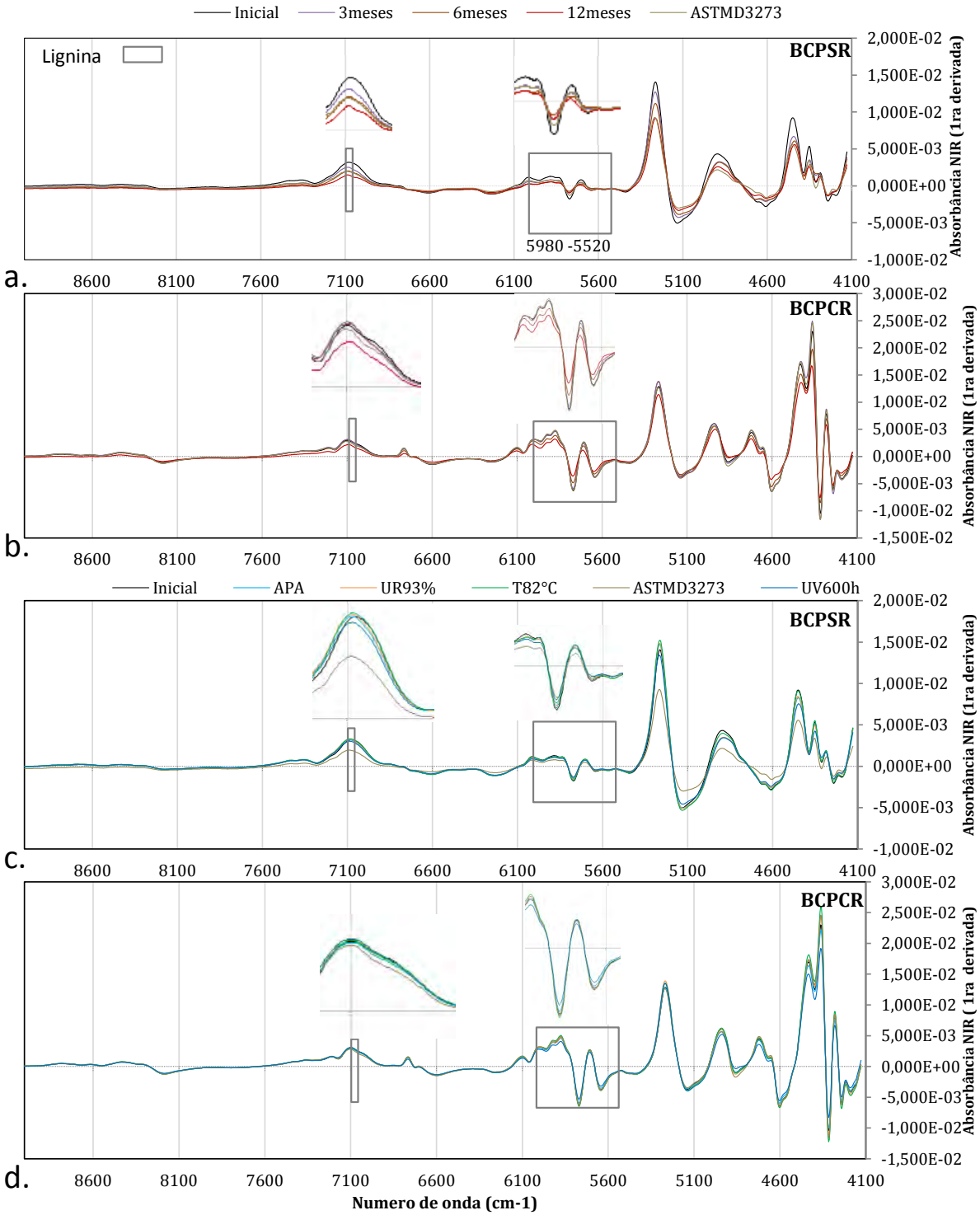
duras (hardwood). Belini (2012) avaliou painéis e destaca regiões do espectro que caracterizam a composição química com o numero de onda entre 4060 a 4282, 4505 a 4545, 5051 a 5150 e 7057 a 7092 cm-1, indicativos da celulose, hemicelulose, umidade e lignina respectivamente. Para os espectros deste estudo se destacam duas regiões analisadas para a lignina entre e 7057 a 7092 cm^{-1} e 5520-5980 cm^{-1}.

Em primeiro lugar observe-se que a absorbância diminui em relação ao tempo de exposição: 3 meses (linha roxa), 6 meses (linha marrom) e 12 meses (linha vermelha) como apresenta a Figura 69a. Cabe resaltar que para o caso dos corpos de prova de painéis de bagaço de cana de açúcar com revestimento superficial essa diferencia é visível mais facilmente para identificar os corpos que foram expostos durante 12 meses. Isto pode ser explicado pelo efeito protetor da resina poliuretana que protegeu os materiais dos fatores meteorológicos como radiação solar, precipitação, umidade e temperatura que degradaram a lignina com mais facilidade nos materiais não revestidos superficialmente (Figura 69b).
O efeito dos ensaios de envelhecimento acelerado indicam diferenças nos espectros entre os materiais revestidos e não revestidos superficialmente. Para os materiais não revestidos a absorbância na região da lignina apresentou maior diminuição para o ensaio ASTMD3273 (2012) como mostrado na Figura 69c, quando comparados com as amostras de painéis revestidos superficialmente (Figura 69d).

Um comportamento similar foi obtido nos espectros, para as amostras dos corpos de prova de painéis de madeira MDP sem revestimento que apresentam diminuição na absorbância (Figura 70a) onde adicionalmente são mostradas altas amplitudes entre os corpos não envelhecidos (linha preta) e os envelhecidos. Finalmente o efeito dos ensaios de envelhecimento acelerado para os painéis de madeira comercial indicam diferenças nos espectros entre os materiais revestidos e não revestidos superficialmente.

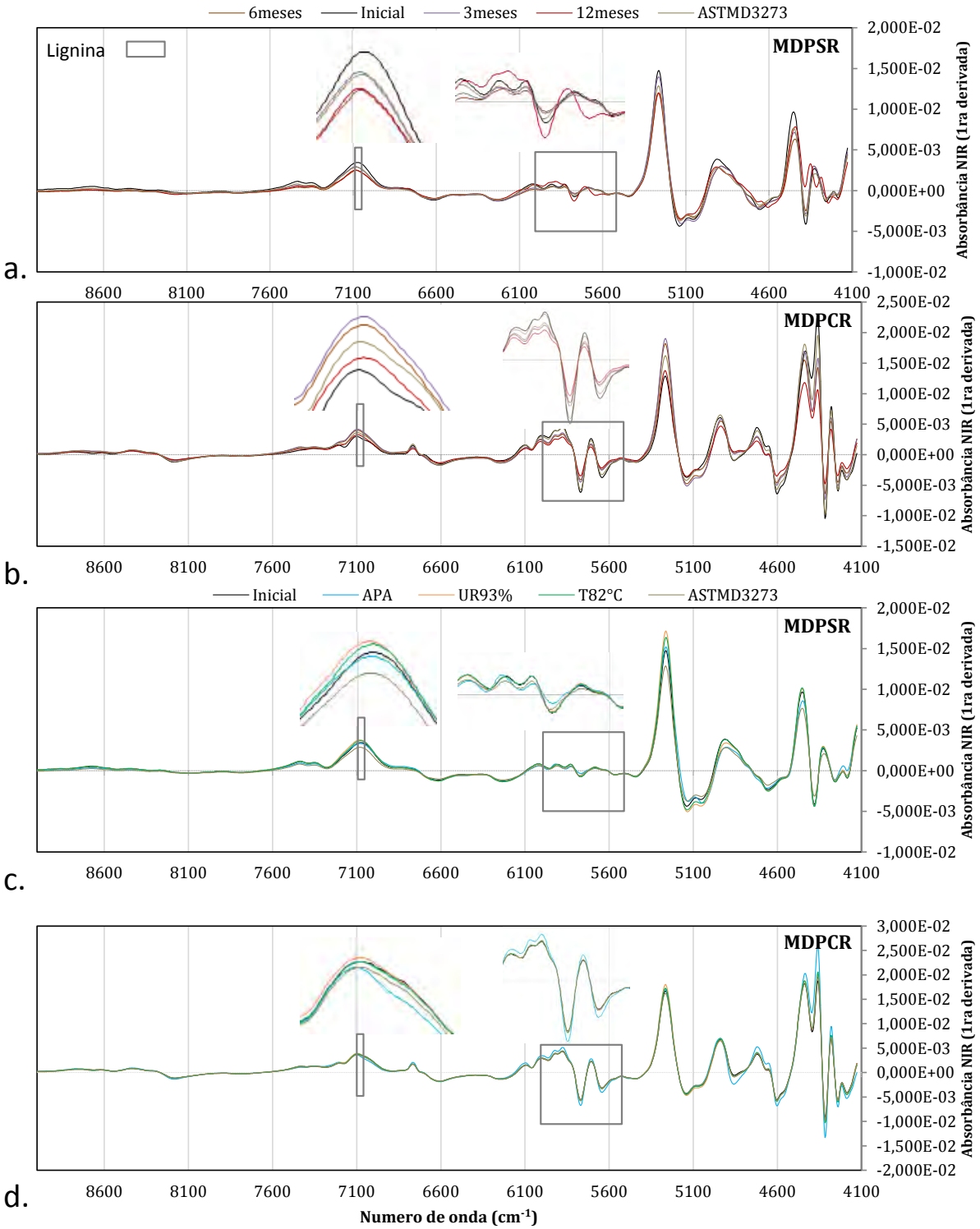
Os espectros para materiais não revestidos indicaram uma redução na absorbância na região da lignina para o ensaio ASTMD3273 (2012) (Figura 70c) quando comparados com as amostras de painéis revestidos superficialmente (Figura 70d). Entre tanto essas diferenças só são observadas em algumas regiões do espectro.

Figura 69. Espectros de absorbância, obtidos entre (9000-4100 cm^{-1}) para painéis de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona após ensaios de envelhecimento. Natural (a) BSPSR e (b) BCPCR . Acelerado (c) BSPSR e (d) BCPCR.



Fonte: Própria autoria

Figura 70. Espectros de absorbância, obtidos entre (9000-4100 cm^{-1}) para painéis de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona após ensaios de envelhecimento. Natural (a) MDPSR e (b)MDPCR . Acelerado (c) MDPSR e (d) MDPCR.



Fonte: Própria autoria

4 Considerações finais

- A análise realizada pelo perfil de densidade nas amostras indicou para os corpos de prova de BCP sem envelhecimento, um comportamento típico de painéis homogêneos, indicando que condições de processo de fabricação dos painéis em escala laboratorial foram adequadas. Os perfis de densidade permitiram observar a deterioração exercida pelos ensaios de envelhecimento acelerado e natural.

- Os resultados obtidos mediante a análise de componentes principais ACP indicam que a técnica de espectroscopia por infravermelho próximo pode ser uma ferramenta para verificar a presença de revestimento superficial em painéis desconhecidos. De igual forma indicam a possibilidade da aplicação na identificação e classificação de características relacionadas com a durabilidade de painéis alternativos de bagaço de cana de açúcar BCP e painéis comerciais MDP a base de madeira.

- A variação nos valores de absorbância obtidos nos espectros da face superficial obtidos dos corpos de prova para ambos os materiais, possibilitaram diferenciar os ensaios de envelhecimento natural e acelerado aos que foram expostos os corpos de prova assim como os efeitos gerados na composição dos materiais após exposição. Entretanto estudos mais aprofundados são necessários para compreender como o NIR pode avaliar o desempenho físico mecânico dos materiais após ensaios de envelhecimento.

5 Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. ASTM D 1435-94 - Standard practice for outdoor weathering of plastics. Philadelphia, 1994. 5 p.

_____. ASTM D 3273-12 - Resistence to growth of mold on the surface of interior coatings in na environmental chamber. Philadelphia, 2012. p. 1-8.

_____. ASTM G154-06 - Standard practice for operating fluorescent light apparatus for UV exposure of nonmetallic materials. Philadelphia, 2006. p. 2168-2178.

_____. ASTM D 1037 - Standard test methods for evaluating properties of wood-based fiber and particle panel materials. Philadelphia, 1996. p. 137-166.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA - ABIPA. Texto referencia do PSQ. Programa setorial da qualidade de painéis de partículas de madeira (MDP) e painéis de fibra de madeira (MDF). abr. 2013. Disponível em: <http://www.abipa.org.br/ProgramaSetorialQualidade.php>. Acesso em: 12 maio 2013.

APA – The Engineered Wood Association. PRP -108 – performance standards and policies for structural – use panels. Tacoma, WA: The Association, 1994. 72 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 14810-2-Painéis de partículas de média densidade - requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

BARBOSA, L. C. A. Espectroscopia no infravermelho na caracterização de compostos orgânicos. Viçosa: UFV, 2007. 189 p.

BELINI, U. L. et al. Near Infrared spectrocopy for estimating sugarcane bagasse content in medium density fiberboard. Bioresources, Raleigh, v. 6, p. 1816-1829, 2011.

BELINI, U. L. Caracterização tecnológica de painéis de fibras da madeira de eucalipto, Eucalytus grandis, e de partículas do bagaço do colmo de cana-de-açúcar , Saccharum sp. 2012. 169 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

BELINI, U. L. et al. Density profile as a tool in assessing quality of new composite. Materials Research, São Carlos, v. 17, p. 138-145, 2014.

BUENO, S. B. Chapas de partículas multicamadas com resíduos lignocelulósicos e resina PU de mamona. 2015. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2015.

CARVALHO, G. G. P. et al. Valor nutritivo do bagaço de cana-de-açúcar amonizado com quatro doses de uréia. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 41, n. 1, p. 125-132, 2006.

FARUK, O. et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. Progress in Polymer Science, London, v. 37, n. 11, p. 1552-1596, 2012.

FIORELLI, J. et al. Physico-chemical na anatomical chracterization of residual lignocellulosic fibers. Cellulose, Dordrecht, v. 21, p. 3269-3277, 2014.

FRANCO, M. P. Efeito da substituição pelo sódio em árvores de *Eucalytus grandis* W. Hill ex Maiden, visando a expansão das plantações florestais sob condições de estresse hídrico. 2014. 199 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2014.

GASPAR, F. Application of near infrared spectroscopy and mul- tivariate data analysis for the evaluation of glue lines of untreated and copper azole treated laminated timber before and after ageing. Polymer Degradation and Stability, London, v. 94, n. 7, p. 1061-1071, 2009.

GOUVÊA, A. F. G et al. Determinação da densidade básica da madeiras de eucalyptus por diferentes métodos não destrutivos. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 35, n. 2, p. 349-358, 2011.

GRECON. Stenograph. Disponível em:<http://grecon.de/file/pdfs/products/gesamt_ci2pt.pdf> Acesso em: 2 dez. 2012.

HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T.; CHAIX G. Robustness of models based on near infrared spectra to predict the basic density in *Eucalyptus urophylla* wood. Journal of Near Infrared Spectroscopy, Chichester, v. 17, p. 141-150, 2009.

HEIN, P. R. G. et al. Estimation of physical and mechanical properties of agro-based particleboards by near infrared spectroscopy. European Journal of Wood and Wood Products, Heildelberg, v. 69, p. 431-442, 2011.

LANA, R. P. Nutrição e alimentação animal: mitos e realidades. Viçosa: UFV, 2005. 344 p.

MALONEY, T. M. The family of wood composite materials. Forest Products Journal, Peachtree Corners, v. 46, n. 2, p. 19-26. 1996.

MENDES, L. M.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; IWAKIRI, S. Revista da Madeira Wood Magazine, São Paulo, Edição Especial – "Painéis", p. 12, 2003.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. Journal of the Brazilian Chemical Society, São Paulo, v. 14 n. 2, 2003.

REZENDE, C. A. et al. Chemical and morphological characterization of sugarcane bagasse submitted to a delignification process for enhanced enzymatic digestibility. Biotechnology for Biofuels, London, v. 4, art. 54, 2011.

RIALS, T. G.; KELLEY, S. S.; SO, C. L. Use of advanced spectroscopic techniques for prediting the mechanical properties of wood composites. Wood Fiber Science, Madison, v. 34, n. 3, p. 398-404, 2002.

RODRIGUES, A.; PAULO, E. F. Introdução à analise multivariada. In: CORRAR L. J.; PAULO, E.; DIAS FILHO, J. M. (Coords.). Análise multivariada: para os cursos de administração ciências contábeis e economia. São Paulo: Atlas, 2014. Cap. 1, p. 1-11.

ROWELL, R. M.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S. Characterization and factors affecting fiber properties. In: NATURAL POLYMERS AND AGROFIBERS BASED COMPOSITES, 1., 2000, São Carlos. Anais... São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2000. p. 115-134.

SANTANA, M. A. E.; TEIXEIRA, D. E. Uso do bagaço de cana-de-açúcar na confecção de chapas de aglomerados. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7.;CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1., 1993,Curitiba. Anais... São Paulo: SBS/SBEF, p. 667-672.1993.

SARTORI, D. L. Painel modular de chapas de partículas de bagaço de cana para fechamento lateral de instalação para bovinos. 2015. 178 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2015.

SARTORI, D. et al. Painel em madeira de reflorestamento e chapas de partículas para instalações rurais. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 19, p. 171-178, 2012.

SCHWANNINGER, M.; RODRIGUES, J. C.; FACKLER, K. A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. Journal of Near Infrared SpectroScopy, Chichester, v. 19, p. 287-308, 2011.

SICOPLAN. MDF plant: technology manual. 1996. v. 1.

TAYLOR, A. Potential of visible and near infrared spectroscopy to quantify phenol formaldehyde resin content in oriented strandboard. European Journal of Wood and Wood Products, Heildelberg, v. 67, n. 1, p. 3-5, 2009.