

JULIA CAROLINA ATHANÁZIO-HELIDORO

**PRESERVAÇÃO DE PAINÉIS COMPENSADOS: ESTUDO COMPARATIVO DE
PROCESSOS, PRODUTOS E DESEMPENHOS**

Botucatu

2021

JULIA CAROLINA ATHANÁZIO-HELIODORO

**PRESERVAÇÃO DE PAINÉIS COMPENSADOS – ESTUDO COMPARATIVO DE
PROCESSOS, PRODUTOS E DESEMPENHO**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Campus
de Botucatu, para obtenção do título de
Doutor em Ciência Florestal

Orientador: Adriano Wagner Ballarin
(UNESP)

Coorientadores: Hernando Alfonso Lara
Palma (UNESP) e Gisleine Aparecida da
Silva (IPT)

Botucatu

2021

A865p

Athanázio-Heliodoro, Julia Carolina

Preservação de painéis compensados : Estudo comparativo de processos, produtos e desempenho / Julia Carolina

Athanázio-Heliodoro. -- Botucatu, 2021

131 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Adriano Wagner Ballarin

Coorientador: Hernando Alfonso Lara-Palma

1. Preservação de painéis compensados. 2. CCA. 3. CCB. 4. Resina poliuretana. 5. Resina fenólica. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).


Essa ficha não pode ser modificada.


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO DA TESE: PRESERVAÇÃO DE PAINÉIS COMPENSADOS – ESTUDO COMPARATIVO DE PROCESSOS, PRODUTOS E DESEMPENHOS

AUTORA: JULIA CAROLINA ATHANAZIO HELIODORO
ORIENTADOR: ADRIANO WAGNER BALLARIN
COORIENTADOR: HERNANDO ALFONSO LARA PALMA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em CIÊNCIA FLORESTAL, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. **ADRIANO WAGNER BALLARIN** (Participação Virtual)
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu - UNESP


P) Prof. Dr. **SÉRGIO BRAZOLIN** (Participação Virtual)
Centro de Tecnologia de Recursos Florestais / Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo


P) Prof.ª Dr.ª **CRISTIANE NÁCIO DE CAMPOS** (Participação Virtual)
Campus de Itapeva / UNESP


P) Prof. Dr. **RICARDO MARQUES BARREIROS** (Participação Virtual)
Campus de Itapeva / UNESP


P) Prof. Dr. **HUMBERTO DE JESUS EUFRAIDE JUNIOR** (Participação Virtual)
Pós-Doutorando - Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP

Botucatu, 05 de fevereiro de 2021

*Aos meus pais Cássia e Tuco, à minha irmã Letícia e ao meu
marido Lucas,
dedico este trabalho*

AGRADECIMENTOS

À Deus com a intercessão de Nossa Senhora;

Ao meu orientador professor Dr. Adriano Wagner Ballarin;

Ao professor Hernando Alfonso Lara Palma, ao técnico Ailton, ao professor Sérgio A. Rodrigues e ao aluno de iniciação científica Gabriel Delaqua Santos;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001;

À UNIVESP pela bolsa de estudos concedida para estágio de doutoramento;

À Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - FCA – UNESP Botucatu e aos professores e funcionários do campus;

Ao Instituto de pesquisas tecnológicas - IPT e sua Fundação – FIPT pelo financiamento através do programa Novos Talentos e pela cessão de seus equipamentos e dependências para realização de análises, e aos seus pesquisadores e funcionários, especialmente à Gisleine Aparecida da Silva e Sérgio Brazolin;

À Humberto Tufollo e Ricardo Montanha pela colaboração com o trabalho;

À Montana Química S/A, pelo apoio logístico, nas pessoas do Dr. Ennio Lepage e Elaine Guedes;

Às empresas Usina Araucária, pela realização dos tratamentos preservativos; à Indústria de Compensados Caribe S.A, parceira de todos os trabalhos pela confecção dos painéis; à Hexion Química do Brasil, na pessoa do senhor Edmir Adam e à Imperveg, na pessoa do senhor Donizette Curcio Luciano pela doação dos adesivos e acompanhamento da produção.

Agradeço pelo suporte acadêmico, técnico e pelos conhecimentos divididos, sem os quais este trabalho não se realizaria.

Aos meus pais Rita de Cássia Athanázio e Antônio de Pádua Heliodoro (Tuco) e à minha irmã Maria Letícia Athanázio Heliodoro;

Ao meu marido Lucas Lucchesi de Oliveira;

Ao meu avô Antônio Athanázio Sobrinho e à minha vózinha Maria José de Barros Athanázio (in memoriam);

Aos meus avós Benedito e Terezinha Vendrame Heliodoro;

Ao meu tio Carlos Alberto Athanázio Neto (in memoriam), e toda à família e amigos que torcem por mim;

Ao meu padraсто Edson Victoriano;

Agradeço pela ajuda, pelo amor, paciência e dedico todo meu trabalho!

RESUMO

O painel compensado tem aplicações consagradas na indústria moveleira e da construção civil, além de usos específicos na indústria de ônibus, caminhões, vagões de trens e contêineres. Mais recentemente, um novo uso se apresenta com potencial crescente, como componente do sistema de construção habitacional *Wood Frame*. Como qualquer produto à base de madeira, o painel compensado pode sofrer degradação – deterioração pela umidade, fungos, cupins e brocas - quando exposto a condições adversas. O tratamento preservativo, com finalidade de ampliar a sua durabilidade, pode ser feito diretamente no painel já pronto ou incorporado no processo produtivo, pelo tratamento prévio das lâminas. Na bibliografia há poucos relatos desse tipo de tratamento prévio, feito em lâminas. Outra alternativa para melhorar a durabilidade dos painéis em serviço seria o uso do adesivo poliuretano à base de óleo de mamona que, por si só é potencialmente hidrofóbico. Com o intuito de desenvolver painéis compensados de alta qualidade e durabilidade prolongada, buscou-se com este trabalho estudar diferentes processos produtivos e produtos. O presente estudo apresenta como diferenciais o tratamento preservativo em dois processos distintos (tratamento do painel e das lâminas), dois produtos preservativos (CCA-C e CCB) e duas resinas (fenólica e poliuretana) em painéis de dimensões comerciais. Os painéis foram produzidos com madeira de *Pinus taeda* em dimensões comerciais, com utilização de 360 g m⁻² de cola por linha dupla de colagem. Os painéis colados com a resina fenólica foram pré-prensados a frio e, posteriormente, prensados a quente por 20 minutos (pressão de 1,2 MPa e temperatura de 130°C) e os painéis produzidos com resina poliuretana foram prensados diretamente por 30 minutos (pressão de 1,2 MPa e temperatura de 65°C). Os ensaios foram feitos seguindo as normas brasileiras da ABNT para painéis compensados. Os testes de empenamento evidenciaram baixos níveis de distorção sofridos pelos painéis prensados com resina poliuretana que, além disso, tiveram os melhores desempenhos físico-mecânicos quando comparados aos painéis prensados com a resina fenólica. Dentre os painéis feitos com a resina fenólica, o desempenho mecânico foi prejudicado pela interação química entre madeira e produto preservativo. Foi verificado que os painéis que receberam tratamento preservativo nas lâminas em etapa prévia à prensagem, tiveram melhores níveis de retenção e penetração dos produtos que os painéis tratados após prensagem, e que os ingredientes ativos do CCA-C e do CCB, especialmente o cromo, depositado na superfície das lâminas de madeira afetam a rugosidade superficial das lâminas, diminuindo sua molhabilidade e, conseqüentemente a absorção de água e o inchamento. Na comparação entre produtos, o CCB mostrou-se um produto instável pela tendência à precipitação do boro, com níveis de retenção dos ingredientes ativos no painel inferiores ao proposto pelas normas.

Palavras-chave: Compensado. CCA. CCB. Propriedades físico-mecânicas. Resina fenólica. Resina poliuretana.

ABSTRACT

The plywood panel has consolidated applications in the furniture and civil construction industry in addition to specific uses in the bus, truck, train car and container industry. More recently, a new use appears with increasing potential, as a component of the Wood Frame housing construction system. Like any wood-based product, the plywood panel can suffer degradation - deterioration by fungi, termites and borers - when exposed to adverse conditions. The preservative treatment, with the purpose of increasing its durability, can be done directly on the ready-made panel, a method that can cause a decrease in the physical-mechanical performance of the product, or incorporated in the production process, by the previous treatment of the blades. There are few reports in the bibliography of this type of previous treatment. Another alternative to increase the durability of the panels would be the use of castor oil-based polyurethane adhesive, which in itself has the potential to preserve the wood against moisture. In order to develop high quality and long lasting plywood panels, this work sought to study different production processes. It presents as differentials the study of the treatment in two different processes (treatment of the panel and the blade), two preservative products (CCA-C and CCB) and two resins (phenolic and polyurethane) and the conduct of the study in panels of commercial dimensions. The panels were produced with *Pinus taeda* wood in commercial dimensions, using 360 g.m⁻² of glue in a double line. The panels bonded with the phenolic resin were cold-pressed and then hot-pressed for 20 minutes (pressure of 1.2 MPa and temperature of 130°C) and the panels produced with polyurethane resin were directly pressed for 30 minutes. (pressure of 1.2 MPa and temperature of 65°C). The tests were carried out, generally following the Brazilian standards. The warping tests showed the low levels of distortion suffered by the panels pressed with polyurethane resin, which, in addition, had the best physical-mechanical performances when compared to the panels pressed with the phenolic resin. Among the panels made with phenolic resin, the mechanical performance, in general, was affected by the chemical interaction between wood and a preservative product. It was also verified that the panels that received preservative treatment on the veneers, in a stage prior to pressing, had better product retention and penetration levels than those treated after pressing; and that the active ingredients of CCA-C and CCB, especially chromium, are deposited on the surface of wood veneers, affecting the roughness of the blade, decreasing its wettability and, consequently, water absorption and swelling. When comparing products, the CCB proved to be an unstable product due to the tendency for boron precipitation, with levels of retention of active ingredients in the panel below those proposed by the standards.

Keywords: Plywood. CCA. CCB. Physical-mechanical properties. Phenolic resin. Polyurethane resin.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
CAPÍTULO 1 - PAINÉIS COMPENSADOS PRESERVADOS COM CCA-C EM ETAPA PRELIMINAR E POSTERIOR À Prensagem	32
1.1 Introdução	34
1.2 Material e Métodos	36
1.2.1 Produção dos compensados	36
1.2.2 Tratamento preservativo das lâminas e dos painéis	38
1.2.3 Confeção dos corpos de prova e ensaios	39
1.2.3.1 Ensaios físicos nas lâminas, corpos de prova e painéis	40
1.2.3.2 Ensaios mecânicos nos corpos de prova	41
1.2.3.3 Penetração e retenção do produto preservativo	42
1.2.4 Análise estatística	44
1.3 Resultados e discussão	44
1.3.1 Empenamento	44
1.3.2 Densidade e umidade	45
1.3.3 Absorção e inchamento	45
1.3.4 Molhabilidade das lâminas	47
1.3.5 Qualidade da colagem	48
1.3.6 Flexão	49
1.3.7 Penetração	50
1.3.8 Retenção	51
1.4 Conclusões	53
REFERÊNCIAS	54
CAPÍTULO 2 - EFEITO DOS PRODUTOS PRESERVATIVOS CCA-C E CCB NA QUALIDADE DE PAINÉIS COMPENSADOS DE <i>PINUS SPP.</i> ..	59
2.1 Introdução	61
2.2 Material e Métodos	63
2.2.1 Produção dos compensados	63
2.2.2 Tratamento preservativo dos painéis compensados	64
2.2.3 Avaliação do desempenho dos painéis e da qualidade do tratamento preservativo	64
2.2.3.1 Ensaios físicos nas lâminas, corpos de prova e painéis	65
2.2.3.2 Ensaios mecânicos nos corpos de prova	66
2.2.3.3 Penetração e retenção dos produtos preservativos	67
2.2.4 Análise estatística	69
2.3 Resultados e discussão	69
2.3.1 Molhabilidade das lâminas	69
2.3.2 Distribuição espacial dos princípios ativos dos preservativos	70
2.3.3 Empenamento	74
2.3.4 Umidade de equilíbrio e densidade na umidade de equilíbrio	74
2.3.5 Absorção e Inchamento	75
2.3.6 Qualidade da colagem	76
2.3.7 Penetração do produto preservativo	77
2.3.8 Retenção do produto preservativo	78
2.4 Conclusões	80
REFERÊNCIAS	81

	CAPÍTULO 3 - EFEITOS DE DIFERENTES PRÉ-TRAMENTOS DAS LÂMINAS E ADESIVOS NO DESEMPENHO MECÂNICO DE PAINÉIS COMPENSADO	86
3.1	Introdução	88
3.2	Material e Métodos	90
3.2.1	Produção dos compensados	90
3.2.2	Tratamento preservativo das lâminas	92
3.2.3	Confecção dos corpos de prova e ensaios gerais	94
3.2.3.1	Ensaio físico nas lâminas, corpos de prova e painéis	94
3.2.3.2	Ensaio mecânico nos corpos de prova	96
3.2.3.3	Penetração e retenção dos produtos preservativos	97
3.2.4	Análise estatística	98
3.3	Resultados e discussão	98
3.3.1	Ensaio físico	98
3.3.2	Molhabilidade das lâminas	101
3.3.3	Ensaio mecânico	103
3.3.4	Ensaio químico	105
3.4	Conclusão	108
	REFERÊNCIAS	109
	CONCLUSÕES FINAIS	116
	REFERÊNCIAS	119
	APÊNDICE	119
	ANEXO	119

INTRODUÇÃO GERAL

Painéis compensados de alta durabilidade e desempenho têm uma demanda crescente no Brasil e no mundo devido às exigências mercadológicas por produtos de alta qualidade, resistência à água e aos organismos xilófagos (TUFOLO NETTO, 2010).

Além dos usos já conhecidos na indústria moveleira e construção civil, os painéis compensados também são empregados pela indústria de ônibus, caminhões, vagões de trens e contêineres, que inicialmente tinham seus pisos produzidos com compensado sem tratamento preservativo. No entanto, o revestimento utilizado pela indústria não é suficiente para proteção contra umidade deste componente à base de madeira, e observou-se apodrecimento devido ao contato com água em menos de cinco anos. Um tratamento preservativo adequado, como recomendado pela norma brasileira NBR 15570 - Especificações técnicas para fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros (ABNT, 2008); ou o uso de uma resina com boas propriedades hidrorrepelentes são fundamentais para garantir um prolongamento da durabilidade deste painel, com qualidade (TUFOLO NETTO; GAIANE; CARLOS, 1986).

Mais recentemente, o painel compensado passou também a ser matéria-prima de componentes como fechamentos, contrapiso e contrateto do sistema de construção habitacional *Wood Frame* - sistema que tende a crescer no país com a iniciativa da Caixa Econômica Federal, que incentiva esse tipo de construção de rápida execução e com preços menores, para habitações populares. A notícia de julho de 2013, com o título: “*Wood Frame* recebe concessão da Caixa Econômica Federal visando o estímulo a novas tecnologias” (PORTAL BRASIL ENG, 2013) assegurou que o banco, após comprovar o desempenho do sistema em diversos testes, iniciaria o financiamento de construções com uso dessa tecnologia. Em março de 2014, a Caixa Econômica Federal anunciou em seu site: “Governo autoriza expansão de construção de casas com *Wood Frame*” (AGÊNCIA CAIXA, 2014) e acrescentou que o primeiro teste do Programa Minha Casa, Minha Vida construído com uso desta tecnologia, em Pelotas - RS, foi finalizado em prazo menor do que o esperado e o sistema construtivo escolhido teve uma emissão de gás carbônico menor do que o do sistema convencional para construção das residências. As diretrizes do Sistema Nacional de Avaliação Técnica - SINAT 005 - Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2017), estabelecem os

requisitos e critérios de desempenho para esses sistemas no Brasil. Também, especificam os tratamentos preservativos que devem ser feitos nos painéis de fechamento usados nas construções *Wood Frame* caso estes não possuam durabilidade natural.

De fato, como qualquer produto à base de madeira, os painéis compensados podem sofrer degradação – deterioração por fungos, cupins e brocas - em maior ou menor grau, quando expostos a condições adversas como umidade excessiva ou contato com o solo. Para aumentar a vida útil da madeira em até 10 vezes (BARILLARI, 2002), diversos tratamentos podem ser feitos, com a finalidade de evitar que esta sofra deterioração precoce. No entanto, a produção de madeira tratada é bem menor do que a de madeira sem tratamento. Em 2015 a indústria madeireira brasileira produziu 19,87 milhões de metros cúbicos de produtos à base de madeira (serrados, compensados e painéis de madeira reconstituída) e apenas 1,65 milhões de metros cúbicos de madeira tratada (ABIMCI, 2016).

O tratamento preservativo pode ser feito diretamente no painel já pronto, método que tende a causar uma diminuição no desempenho físico-mecânico do produto devido à secagem (IBACH, 2010), ao produto preservativo (BURMESTER; BECKER, 1963; EATON *et al.*, 1978; VICK; KUSTER, 1992; ACKER; TSOUMIS, 1991; STEVENS, 1993; BARNES *et al.*, 1996; PINHEIRO, 2001; FERREIRA *et al.*, 2017) ou em função do processo (TASCIOGLU; TSUNODA, 2010; MENDES *et al.*, 2013; TASCIOGLU, 2014). O processo pode ser também incorporado no processo produtivo, pelo tratamento das lâminas em etapa prévia à confecção do painel. A norma NBR 16143 (ABNT, 2013) fixa retenções mínimas para cada uso da madeira. Em consonância com a maioria da literatura internacional, essa norma especifica que a retenção de 6,5 kg m⁻³ de i.a. (ingrediente ativo) é suficiente para preservar a madeira de ampla gama de organismos xilófagos com os preservativos CCA-C e CCB.

Na bibliografia nacional e internacional há poucos relatos desse tipo de tratamento prévio, citando apenas a possibilidade de fazê-lo ou testando o método de pré-tratamento com outras variáveis e preservativos, seja em produtos diferentes como o OSB - *Oriented Strand Board* - ou em escalas laboratoriais, restringindo uma avaliação completa. No compensado, testes industriais foram realizados pela Indústria de Compensados Caribea Ltda. com o tratamento do painel já pronto. Esses testes evidenciaram que, em escala comercial, os painéis de maiores dimensões podem sofrer deformações

comprometedoras de sua qualidade durante o tratamento sob pressão e posterior secagem. Essa constatação potencializa a opção por tratamento das lâminas, em etapa prévia à execução do painel, tema pouco abordado na literatura nacional e internacional.

Alternativamente ao tratamento com preservativos químicos, o adesivo poliuretano a base de óleo de mamona (PU), além de ser proveniente de fonte renovável e biodegradável, demonstra ter potencial antifúngico e hidrorrepelente e poderia ser utilizado com a finalidade de aumentar a durabilidade do painel (JESUS, 2000; DIAS; LAHR; ROCCO, 2004; AZAMBUJA; DIAS, 2006; THORAT; TAYDE, 2015; FERRO *et al.*, 2015; 2016; PEREIRA *et al.*, 2016). Estudos preliminares mostraram o desempenho mecânico superior desses painéis, em relação aos colados com o adesivo fenol-formaldeído, convencionalmente utilizado (DO MARCO; BALLARIN; LARA PALMA, 2015; LARA PALMA; DO MARCO; BALLARIN, 2017).

Além disso, a produção de painéis de madeira de maior resistência à umidade, maior qualidade e desempenho mecânico e alta durabilidade diminuiria ainda mais a pressão sobre as florestas nativas e sobre os demais produtos não renováveis que podem ser substituídos pela madeira tratada aumentando, inclusive, o tempo de fixação de CO₂ (TUFOLO NETTO, 2010).

Com a tendência do aumento da demanda do painel compensado pela inserção no mercado brasileiro do sistema de construção habitacional *Wood Frame* e com a obrigatoriedade de tratamento dos painéis usados nos pisos de meios de transporte, busca-se com este trabalho estudar os tratamentos preservativos em painéis compensados de alta durabilidade de dimensões comerciais e seus efeitos no desempenho. Apresenta como diferenciais o estudo comparativo da efetividade do tratamento em dois processos distintos (tratamento do painel já consolidado e da lâmina em etapa prévia à prensagem), dois produtos preservativos (CCA-C e CCB) e dois adesivos (fenólico e poliuretano), e o uso de painéis de dimensões comerciais, que poderão evidenciar as potenciais deformações já observadas nos estudos prévios.

Painéis compensados e suas aplicações

O compensado é o pioneiro entre os painéis produzidos no Brasil, com produção iniciada na década de 40 do século passado. É formado por lâminas de madeira em número ímpar e sobrepostas em direções ortogonalmente alternadas e coladas com uso

de pressão e calor, o que lhe confere uma isotropia planar que não se observa na madeira serrada.

O compensado pode ser classificado como de uso interior, quando não possui proteção hidrorrepelente, ou de uso exterior, quando produzido com adesivo à prova d'água e apresente alta resistência mecânica e contra umidade (ABNT CB31, 2001).

Tem aplicações em diferentes áreas como construção civil, indústria moveleira e mercado de embalagens. Os compensados de uso estrutural são muito utilizados na construção civil por sua qualidade na confecção de formas de concreto, por exemplo.

Os maiores consumidores de painéis compensados no mundo em 2019 são a China e os EUA que ocupam as primeiras posições do mercado provavelmente pelo uso generalizado desse produto nas construções em elementos como fechamentos, contrapisos, contratetos, elementos estruturais e outros componentes. Nesse ano o Brasil aparece em sexto lugar nesse *ranking*, com uma produção de 2,764 milhões de m³, representando apenas 1,8% da produção mundial deste produto, sendo 66% exportado e 34% consumo doméstico, mantendo o painel compensado como o produto de madeira mais vendido pelo país no mercado internacional (FAOSTAT, 2020; ITTO, 2020)

No Brasil, a demanda pelo compensado ainda deverá crescer no setor de construções habitacionais do tipo *Wood Frame* – sistema já consolidado nos EUA, Canadá e Chile. O sistema é composto por perfis de madeira que em conjunto com as placas estruturais formam painéis estruturais (diafragma) capazes de resistir às cargas verticais (telhados e pavimentos), perpendiculares (ventos) e cortantes e, assim, transmitem as cargas até a fundação (STAMATO, 2010). Possui vantagens sobre o sistema em alvenaria usado no Brasil como rápida execução com bom desempenho térmico e acústico; menor gasto em energia e menor produção de resíduos, poluição do ar e emissão de CO₂; sistema resistente, leve e flexível e; adaptação a todos os climas, de quente e úmido a extremamente frios (SPOSTO, 2005; RICHTER, 2007; MOLINA; CALIL JR., 2010; WERNWR; BURROWS, 2014). Tais vantagens foram atestadas por pesquisadores e empresas brasileiras (VASQUES, PIZZO; 2014; TECVERDE, 2015) e têm sido verificadas em na prática durante a execução das construções (PORTAL BRASIL ENG, 2013; AGÊNCIA CAIXA, 2014).

Além dos usos conhecidos e do uso potencial em construções habitacionais, os painéis compensados também são empregados pela indústria de ônibus, caminhões, vagões de trens e contêineres. Inicialmente, eram produzidos sem tratamento preservativo e utilizados na produção de pisos e outros componentes. Supunha-se que os revestimentos aplicados sobre esses painéis, quando da composição dos pisos, já seriam suficientes para garantir a proteção desses elementos contra a umidade e o apodrecimento. No entanto, constatou-se que em menos de cinco anos os pisos passavam a apresentar problemas de umidade elevada e apodrecimento causados pelo fluxo de pessoas com sapatos úmidos, lavagem diária (infiltração de água através dos tapetes plásticos de revestimento) e pela passagem do veículo sobre poças d'água e enxurradas (infiltração de água pela parte inferior dos painéis apesar da impermeabilização neles aplicada). A impermeabilização e o tapete dificultavam, na verdade, a secagem da madeira (TUFOLO NETTO; GAIANE; CARLOS, 1986). Desde 2009 a norma brasileira NBR 15570 - Especificações técnicas para fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros (ABNT, 2008) – exige o tratamento preservativo sob pressão dos pisos usados na fabricação de ônibus para transporte coletivo. A norma especifica, ainda, que os painéis usados devem ser do tipo estrutural, colados com adesivos à prova d'água, compostos com espécies permeáveis ao tratamento preservativo; citando os preservativos CCA e CCB com retenções mínimas de $6,5 \text{ kg m}^{-3}$ e penetração total no painel (NBR 15570/2009).

Adesão e adesivos utilizados na fabricação de painéis compensados

A adesão entre as lâminas sobrepostas para formação do painel compensado é condicionante do seu desempenho físico-mecânico. Dá-se por difusão de polímeros quando ocorre a nível molecular, por adesão química quando ocorre através de ligações primárias ou forças secundárias intermoleculares ou ainda pode ocorrer mecanicamente, quando o adesivo penetra na madeira formando ganchos que sustentarão a ligação após a solidificação (IWAKIRI, 1998).

De acordo com Iwakiri (2005) e Firhart (2013), algumas das propriedades dos adesivos, responsáveis por criar uma boa adesão são a umectação ou molhabilidade - capacidade que a gota de adesivo tem de formar um ângulo de contato com a superfície da madeira e é influenciada pela qualidade da superfície da madeira; a fluidez - capacidade de espalhamento do adesivo; a penetração - capacidade do adesivo de

penetrar nos espaços vazios da madeira, formando pequenos ganchos; *gel time* - tempo entre adesivo estar pronto para aplicação e o seu endurecimento e a viscosidade – velocidade com que o fluido pode se movimentar que se altera com a idade do adesivo e temperatura ambiente e influencia no espalhamento, umectação e penetração na madeira.

Quanto menor a umidade da lâmina, maior a absorção do adesivo pela madeira e maior a velocidade de cura (KOLLMANN; CÔTE, 1984). A secagem das lâminas com e sem tratamento deve ser feita aproximadamente até 4-8% de umidade para não influenciar na qualidade mecânica dos painéis após sua produção, melhorar a fixação dos produtos preservativos nas lâminas tratadas e diminuir a emissão de formaldeído (GUO; COOPER; 1999; AYDIN *et al.*, 2006).

Apesar da água colaborar com o transporte de calor para o interior das camadas de lâminas de madeira, uma queda nas propriedades físicas e mecânicas de 55% em média pode ser observada quando a umidade nas lâminas passa de 3% para 15% (AYDIN *et al.*, 2006; FERRAZ, 2013).

Os adesivos mais usados na fabricação de compensados de madeira são a uréia-formaldeído (UF) e o fenol-formaldeído (FF). Cerca de 90% dos painéis de madeira produzidos pelo processo seco no mundo são colados com esses dois adesivos (PIZZI; MITTAL, 1994). Pelo fato de ambos serem derivados do petróleo, um recurso natural não-renovável, são considerados um problema ambiental e possuem um alto preço, representando o maior custo na produção dos painéis de madeira. Dentre os dois adesivos, a UF tem um custo menor, mas é menos resistente à água, sendo indicada apenas para usos internos (SILVA *et al.*, 2012). Ambos, ainda, podem emitir formaldeído em forma de gás, especialmente durante e nos primeiros dias após prensagem dos painéis de madeira, causando irritações nasais, nos olhos e garganta, tosse, sibilância, erupções cutâneas e náuseas quando emitido a níveis a partir de 0,24 mg m⁻³ de ar e alergias e doenças respiratórias a níveis ainda menores (GUPTA *et al.*, 1982; MÄKINEN *et al.*, 1999; BÖHM *et al.*, 2012).

O adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (*Ricinus communis*) – PU - vem se mostrando uma alternativa viável para uso em compensados (DIAS; LAHR; ROCCO, 2004), e outros painéis de madeira (FERRO *et al.*, 2015; 2016; PEREIRA *et al.*, 2016). Desenvolvido na década de 80 por pesquisadores do Instituto de Química de São Carlos – USP, é biodegradável, não-tóxico e proveniente de fonte natural renovável (DIAS;

LAHR; ROCCO, 2004; THORAT; TAYDE, 2015). Essa resina ainda permite manuseio à temperatura ambiente, é resistente a raios ultravioleta, possui alta resistência mecânica e não necessita de prensagem a quente para sua cura, embora a temperatura aumente a qualidade da colagem e a velocidade do processo de fabricação (JESUS, 2000; AZAMBUJA; DIAS, 2006). A resina também já foi aplicada, com resultados superiores ao adesivo de contato tradicional, no interior de aeronaves (BORGES, 2015) e tem potencial para produzir painéis de alta durabilidade devido às suas propriedades antifúngicas, antimicrobianas e antibacterianas (TAKANO *et al.*, 2007; SALLES *et al.*, 2015; BADARO *et al.*, 2017; GAHUKAR, 2017; SUURBAAR; MOSIBIL; DONKOR, 2017).

Segundo o fabricante (IMPERVEG®), o adesivo poliuretano é um bicomponente composto por um polioli e por isocianato que é aditivado com o óleo de mamona para controle do isocianato (NCO livre - Nitrogênio, Carbono e Oxigênio). Possui tempo e temperatura de cura menores que dos adesivos comumente utilizados na indústria e, por isso, pode ter vantagens, como a diminuição do custo do processo. No entanto, como o tempo de “seco ao toque” do adesivo é de apenas 30 minutos, os painéis formados precisam ser consolidados na prensa dentro desse intervalo de tempo para não perder qualidade. A polimerização final do adesivo se dá em seis horas, porém as propriedades mecânicas do painel formado ainda podem ter incrementos dentro de sete dias, segundo o fabricante.

Resultados iguais ou superiores aos já encontrados com adesivos convencionais foram relatados com o uso da PU para OSB (FERRO *et al.*, 2015; 2016), MDF (PEREIRA *et al.*, 2016), compensados (DIAS *et al.*, 2004), MLC (AZAMBUJA; DIAS, 2006) e madeira serrada (LI *et al.*, 2017). Em estudos em condições laboratoriais (amostras de pequenas dimensões) a resina também já foi aplicada, com resultados superiores ao adesivo de contato tradicional, no interior de aeronaves (BORGES, 2015) e tem potencial para produzir painéis de alta durabilidade devido ao seu potencial fungicida, inseticida e nematocida (TAKANO *et al.*, 2007; SALLES *et al.*, 2015; BADARO *et al.*, 2017; GAHUKAR, 2017; SUURBAAR *et al.*, 2017). Porém, o seu desempenho físico-mecânico em painéis de madeira de dimensões comerciais nunca foi avaliado e pode estar condicionado pelo tempo de seco ao toque.

Propriedades mecânicas de painéis compensados

Por conta de sua natureza biológica, a madeira é essencialmente um material anisotrópico e heterogêneo. Contudo, pelo fato de possuir alguma organização interna, - anatomicamente apresenta três eixos preferenciais: axial ou longitudinal (coincidente com o fuste da árvore, grã), radial e tangencial - podem-se adotar hipóteses simplificadoras do seu comportamento.

De fato, por conta da disposição preferencial de seus elementos anatômicos, pode-se assumi-la como um material ortotrópico, isto é, com propriedades mecânicas únicas e independentes nas direções dos três eixos anatômicos perpendiculares: longitudinal, radial e tangencial. O eixo longitudinal L é paralelo às fibras (grã); o eixo radial R é normal às fibras, na direção de crescimento dos anéis e o eixo tangencial T é normal às fibras (grã), mas tangente aos anéis de crescimento (BODIG; JAYNE, 1982; FPL, 2010). Doze constantes (nove independentes) são necessárias para descrever o comportamento elástico da madeira: três módulos de elasticidade E, três módulos de rigidez G e seis relações de Poisson μ (relação entre as deformações transversal e longitudinal relativas). O conhecimento desses parâmetros elásticos, que expressam relações tensão-deformação ou relações entre deformações nas direções de simetria elástica, é de fundamental importância para que seja possível a modelagem matemática de seu comportamento estrutural (LARA-PALMA, 1986).

Para a grande maioria das madeiras comerciais americanas esses parâmetros elásticos já foram determinados e tem seus valores por espécie (FPL, 2010). No Brasil, poucos são os valores disponíveis a respeito desses parâmetros, destacando-se quase que exclusivamente o módulo de elasticidade na direção longitudinal – paralela às fibras (BALLARIN; NOGUEIRA, 2003).

Bodig e Jayne (1982) sugerem as seguintes relações entre constantes elásticas da madeira:

$$E_L : E_R : E_T \approx 20 : 1,6 : 1$$

$$G_{LR} : G_{LT} : G_{RT} \approx 10 : 9,4 : 1$$

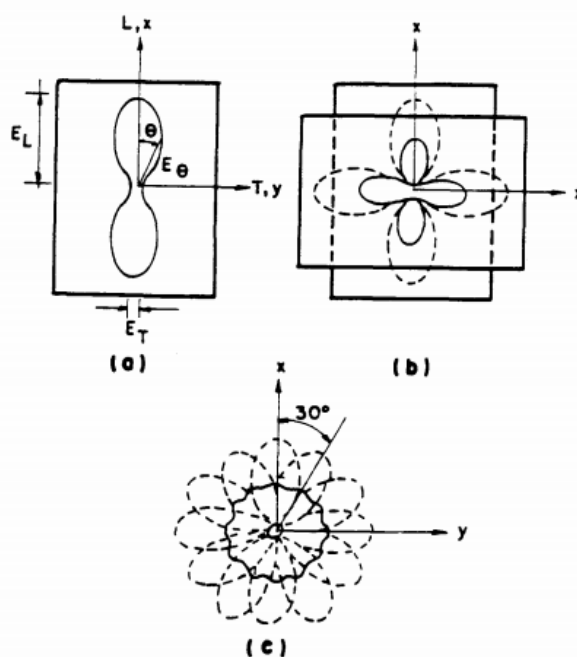
$$E_L : G_{LR} \approx 14 : 1$$

Evidencia-se a desproporcional rigidez da madeira serrada na direção longitudinal (E_L), 12,5 a 20 vezes mais rígida que nas outras duas direções (radial e tangencial).

O compensado, produto formado por lâminas de madeira coladas sobrepostas em direções ortogonally alternadas, busca resgatar, em maior ou menor grau, a isotropia planar que não se observa na madeira serrada apesar de ainda manter em determinado grau a resistência e rigidez à flexão distintas nas direções longitudinal (ao longo do comprimento do painel) e transversal (ao longo da largura) (KOLLMANN *et al.*, 1975; TSOUMIS, 1991).

Essa homogeneização do comportamento nas duas direções perpendiculares contidas em seu plano constitutivo aumenta na medida em que aumenta o número de lâminas do compensado. Ocorre devido à laminação cruzada, que equaliza a variação das propriedades da madeira (Figura 1). Na Figura 1a está representada a variação da rigidez da madeira em uma lâmina, no plano longitudinal-tangencial. Com a adição de uma lâmina de forma cruzada (formando um ângulo de 90°) essa e as demais propriedades da madeira são ponderadas (trevo em linha cheia na Figura 1b). A extensão desse comportamento, num painel com várias lâminas, em direções desalinhadas a 30° uma da outra, leva a uma rigidez quase homogênea para qualquer direção do plano (Figura 1c).

Figura 1 – Variação nos parâmetros elásticos em um compensado: (a) lâmina simples; (b) Lâminas cruzadas a 90° ; (c) Lâminas adjacentes em ângulo de 30°

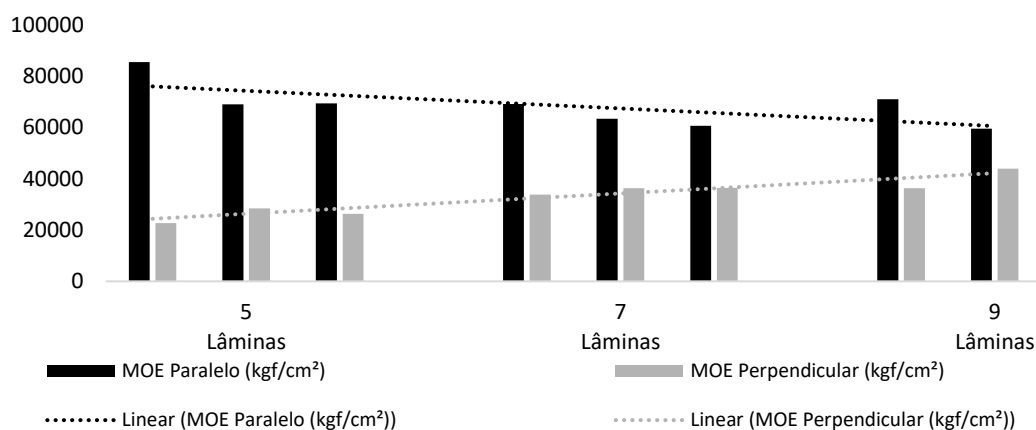


Fonte: Bodig e Jayne (1982), modificado por Lara-Palma (1986)

Em um compensado convencional - lâminas sobrepostas em direções ortogonalmente alternadas - a resistência e rigidez na direção longitudinal (maior dimensão) do painel são um pouco menores que as respectivas propriedades na madeira que o originou, enquanto que nas outras direções (perpendicular, por exemplo), essas propriedades são significativamente maiores que as da madeira.

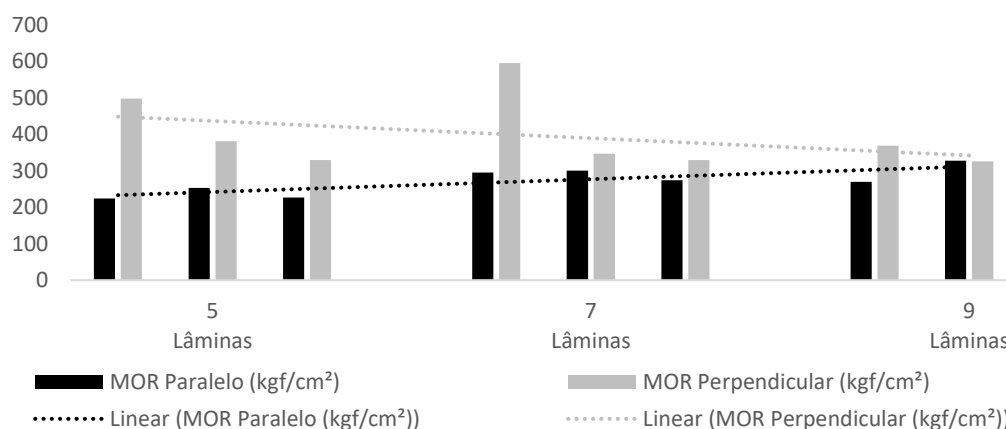
A ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI, 2002) indica valores referenciais de resistência e rigidez à flexão estática de compensados de *Pinus* com 5, 7 e 9 lâminas e mostra que, quanto maior o número de lâminas sobrepostas, menor é a diferença de valores desses parâmetros mecânicos nas duas direções – paralela e perpendicular (Figuras 2 e 3).

Figura 2 – Variação da rigidez à flexão estática de compensados de *Pinus* com 5, 7 e 9 lâminas



Fonte: ABIMCI (2002)

Figura 3 – Variação da resistência à flexão estática de compensados de Pinus com 5, 7 e 9 lâminas



Fonte: ABIMCI (2002)

Quando o painel compensado é utilizado estruturalmente como chapa – solicitações em seu plano - a resistência é dada basicamente pelas lâminas de maior resistência na direção de solicitação, independentemente do seu posicionamento, nas faces ou mais próximo do centro do compensado. Quando o painel compensado é utilizado estruturalmente como placa, ou seja, com cargas perpendiculares ao seu plano constitutivo, não só a resistência e rigidez das lâminas, mas também o posicionamento das lâminas tem influência no desempenho. Lâminas de maior resistência e rigidez irão ditar o comportamento, porém seus efeitos serão tanto maiores quanto mais próximas da borda elas estiverem. Assim, de maneira geral, durante a concepção dos compensados deve-se priorizar lâminas de maiores resistências e rigidezes mais próximas das faces.

Diversos trabalhos avaliam a qualidade estrutural de compensados por meio da mensuração da sua resistência e rigidez (módulo de elasticidade) à flexão estática, considerando-se as direções longitudinal e transversal do painel. Os parâmetros intervenientes dos desempenhos são o posicionamento das lâminas de maior densidade (TRIANOSKI; IWAKIRI, 2018), diferentes gramaturas de adesivo (LIMA; PIO, 2007), espécies ou tempos de prensagem (ALMEIDA *et al.*, 2012; KRAL; KLÍMEK, 2015; MUHAMMAD-FITRI *et al.*, 2018), materiais adicionais de reforço (DIAS *et al.*, 2003), predição dessa resistência com o uso de redes neurais e regressões estatísticas (FERNANDEZ *et al.*, 2012).

Na avaliação da qualidade estrutural dos compensados é também importante o ensaio de cisalhamento na linha de cola que, simulando condições ambientais, determina a qualidade da colagem das lâminas, avaliando uma possível falha na linha de cola ou na madeira. A qualidade da linha de cola é influenciada pela qualidade do adesivo, sua viscosidade e pela anatomia da madeira e condições de prensagem que afetam na ancoragem adesivo x madeira (MARRA, 1992; TSOUJIS, 1991).

Tratamento preservativo de painéis compensados

Como qualquer produto à base de madeira, o painel compensado pode sofrer degradação – deterioração por fungos, cupins e brocas - em maior ou menor grau, quando exposto a condições adversas como umidade excessiva ou contato com o solo.

No Brasil, apenas 8,30% dos produtos à base de madeira são tratados (ABIMCI, 2016). Em 2017 estavam cadastradas junto ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) 576 usinas de preservação. Dos 1,65 milhões de metros cúbicos da madeira tratada em 2015 (ABIMCI, 2016), 60% foram utilizados no setor rural (moirões, estacas e instalações rurais), 13% no setor elétrico (postes e cruzetas), 11% no setor ferroviário (dormentes) e apenas 15% na construção civil (peças roliças e serradas, telhas, estruturas). Outros usos, como pisos automotivos e exportações respondem por 1% (IBÁ, 2015). Somente a título comparativo, em 2005 os Estados Unidos tinham uma produção anual de madeira tratada de 15 milhões de metros cúbicos, sendo mais de 70% destinados à construção civil (TUFOLO NETTO, 2010; FERRARINI *et al.*, 2010).

O custo da madeira de Pinus preservada é aproximadamente 50% maior que o da madeira sem tratamento. Com a preservação, espera-se durabilidade até dez vezes superior à da madeira não preservada, para iguais condições de uso, de agressividade biológica, para a mesma espécie (BARILLARI, 2002).

Dentre os métodos de tratamento da madeira, o mais utilizado é o em autoclave (84%), seguido dos métodos por imersão e por adição de inseticida na cola na fabricação de painéis de madeira reconstituída. Estima-se que apenas 25% do volume total de painéis compensados produzidos recebam tratamento preservativo (REMADE, 2006; FERRARINI *et al.*, 2010).

Os produtos mais utilizados na preservação de madeiras no Brasil são o CCA-C (arseniato de cobre cromatado) e o CCB tipo óxido (borato de cobre cromatado). Apresentam características básicas que os diferenciam como toxicidade máxima a organismos xilófagos e mínima a organismos não xilófagos (Tabela 1) (VIDAL *et al.*, 2015).

Tabela 1 – Composição do CCA e CCB

Produto	Componente	Tipo A	Tipo B	Tipo C (CCA-O)
CCA	Cromo - CrO ₃	65,5	35,3	47,5
	Cobre - CuO	18,1	19,6	18,5
	Arsênio - As ₂ O ₅	16,4	45,1	34,0
	Óxido - NaHSO ₄	-	-	2,1
CCB-O	Óxido de cobre - CuO	26,0	-	-
	Boro - B	10,5	-	-
	Óxido de cromo - CrO ₃	63,5	-	-

O CCA-C, preservativo hidrossolúvel, é o produto mais utilizado no mercado brasileiro (na forma óxida), representando 90% da preservação de madeira sob pressão, sendo os 10% restantes com CCB, na forma óxida ou salina (TUFOLO NETTO, 2009). É muito eficiente na proteção de madeiras contra insetos (cupins e brocas), fungos apodrecedores e perfuradores marinhos; apresenta a mais longa permanência na madeira dentre os preservativos conhecidos e reage muito bem com ela logo após o tratamento. Há a formação de um complexo repelente à água, que o torna insolúvel e resistente à lixiviação (WILKINSON, 1979). O cobre e o arsênio são os inibidores do desenvolvimento de fungos e insetos, respectivamente, e o cromo é o responsável pela fixação do produto (DAWSON *et al.*, 1991). Pesquisas têm demonstrado que o cobre e o arsênio estão fortemente ligados à madeira por efeito do cromo, minimizando o perigo de contaminação ambiental (FREITAS, 2002).

Nos EUA, a utilização do CCA-C para tratamento de madeira para usos residenciais ou contato contínuo com as pessoas foi restringido como medida de precaução pela EPA – *Environmental Protection Agency*, ou agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Apesar disso, a própria agência concluiu que o produto, quando usado na forma de óxido não representa nenhum perigo para a saúde humana, pois, depois que reage com a madeira, há a formação de um complexo insolúvel, o que o torna repelente à água e resistente à lixiviação (WILKINSON, 1979; KEAR *et al.* 2008; VIDAL *et al.* 2015). Após estabilização, um máximo de 6% do peso do arsênio total

presente no painel foi volatilizado quando a temperatura foi elevada a 280°C (CUYPERS *et al.*, 2009). Além disso, quanto maiores e mais homogêneas as partes do composto de madeira (como no caso do compensado) maior a retenção do arsênio e do cromo e menor a sua volatilização (KAKITANI, HATA, KAJIMOTO, 2004; CUYPERS *et al.*, 2011).

O CCB (borato de cobre cromatado) também possui ação fungicida e inseticida, embora seja mais lixiviável que o preservativo CCA-C. Tem velocidade de fixação mais lenta do que a do CCA-C, possibilitando aquecimento sem formação de precipitados. Uma vez introduzido na madeira, reage com seus componentes celulares (celulose, hemiceluloses e lignina), e os torna insolúveis na forma de substâncias complexas, minimizando a lixiviação do produto. Neste produto, o boro tem função inseticida e fungicida, esta última reforçada pela ação do cobre, e fixados pelo cromo (LEPAGE, 2010).

A ação fungicida e inseticida dos ingredientes ativos de produtos preservativos como o CCA-C e o CCB faz sua função nos painéis compensados de madeira devido, por exemplo, às propriedades inibidoras da respiração das células fúngicas pelos componentes dos preservativos (REINPRECHT, 2010; MENDES *et al.*, 2014; REINPRECHT; KMET'OVA, 2014).

O tratamento preservativo pode ser feito diretamente no painel já pronto, método que tende a causar uma diminuição no desempenho físico-mecânico do produto devido à secagem (IBACH, 2010), ao produto preservativo (BURMESTER; BECKER, 1963 EATON *et al.*, 1978; VICK; KUSTER, 1992; ACKER; TSOUMIS, 1991; STEVENS, 1993; BARNES *et al.*, 1996; PINHEIRO, 2001; FERREIRA *et al.*, 2017) ou em função do processo (TASCIOGLU; TSUNODA, 2010; MENDES *et al.*, 2013; TASCIOGLU, 2014). O processo pode ser também incorporado no processo produtivo, pelo tratamento das lâminas em etapa prévia à confecção do painel. A norma NBR 16143 (ABNT, 2013) fixa retenções mínimas para cada uso da madeira. Em consonância com a maioria da literatura internacional, essa norma especifica que a retenção de 6,5 kg m⁻³ de i.a. (ingrediente ativo) é suficiente para preservar a madeira de ampla gama de organismos xilófagos com os preservativos CCA-C e CCB.

A espécie de madeira utilizada na produção de painéis compensados e o tipo de adesivo usado influenciam fortemente na resistência à deterioração dos painéis compensados (DEN BULCKE *et al.*, 2011; REINPRECHT; KMETOVÁ; IZDINSKÝ, 2012). De fato, embora não seja utilizado especificamente com essa finalidade, o adesivo

poliuretano à base de óleo mamona (PU) mostra potencial fungicida, inseticida e nematicida. A mamona (*Ricinus communis*) já é utilizada na agricultura, na forma oleosa, para proteção de plantações e sementes contra pragas como insetos foliares e controle de nematóides (GAHUKAR, 2017). Soluções de *Ricinus communis* também foram testadas para limpeza dentária (SALLES *et al.*, 2015; BADARO *et al.*, 2017). A ação antifúngica do detergente derivado do óleo da mamona reduziu em níveis entre 79,4 e 100% a germinação de conídios, dependendo da variação e da concentração aplicada (TAKANO *et al.*, 2007) e ação antibacteriana do extrato da planta foi estudada por Suurbaar, Mosobil e Donkor (2017).

Além disso, diversos autores indicam que as lâminas e painéis devem estar com umidades abaixo do ponto de saturação das fibras, ou seja, abaixo de 28%, para melhor retenção dos produtos preservativos (CHONG, 1977; USTA, 2004; LOPES, *et al.*, 2017).

Propriedades dos painéis compensados preservados

Alguns estudos atribuem a queda nas propriedades da madeira e seus produtos aos componentes químicos dos preservativos usados no tratamento, como o cromo, cobre, arsênio, boro e amônia, que estão presentes em preservativos à base de água, e reagem com a madeira (VICK; KUSTER, 1992; ACKER; STEVENS, 1993), principalmente se os processos de secagem não forem controlados (IBACH, 2010). Diversos estudos iniciais constataram perda de resistência, atribuindo-a a uma alteração química ocorrida na madeira durante o processo de fixação dos ingredientes ativos (BURMESTER; BECKER, 1963; EATON *et al.*, 1978; TSOUMIS, 1991; BARNES *et al.*, 1996; PINHEIRO, 2001).

Outros estudos, no entanto, como o de Taşçioğlu *et al.* (2014), atribuem ao tratamento sob pressão (que utiliza a água como veículo), e não ao preservativo em si, a causa da queda nas propriedades de resistência. Segundo os autores, os ingredientes ativos dos produtos utilizados podem ter efeito insignificante neste fenômeno de redução das propriedades mecânicas. O pós-tratamento de painéis de madeira com preservativos à base de água causaria um inchamento excessivo, em alguns casos irreversível, que varia de 2,3 a 18,5%, dependendo do tipo de composto e da composição química do preservativo, prejudicando o desempenho mecânico do produto final (TASCIOGLU; TSUNODA, 2010; MENDES *et al.*, 2013; TASCIOGLU, 2014).

Os estudos sobre o desempenho global (físico, mecânico e biológico) de painéis compensados preservados são escassos em âmbito nacional, sobretudo quando da utilização de CCB.

O tratamento com CCA-C em peças de madeira de eucalipto prejudicou a eficiência da colagem de painéis de madeira laminada colada, diminuindo propriedades como densidade básica e resistência ao cisalhamento paralela às fibras (SEGUNDINHO *et al.*, 2017).

Mendes *et al.* (2013) estudaram o efeito do tratamento preservativo sobre as propriedades físicas e mecânicas de painéis compensados produzidos em escala laboratorial (1,10 m x 1,10 m) com tratamento sob pressão aplicado sobre os painéis já prontos. Concluíram que houve diminuição das propriedades mecânicas, atribuída parcialmente ao tratamento sob pressão adotado.

Ferreira *et al* (2017) verificaram aumento no teor de umidade de painéis compensados tratados com CCA-C e diminuição na sua resistência à flexão. Já os painéis compensados (0,45m x 0,45m) prensados após o tratamento preservativo das lâminas não apresentaram queda na resistência à flexão em relação aos painéis com lâminas sem tratamento. Contudo, o tratamento das lâminas diminuiu a molhabilidade da superfície e, portanto, a qualidade de colagem. Painéis compensados tratados após a prensagem apresentaram queda na resistência à flexão de até 30% (FERREIRA; CAMPOS; SILVA, 2016). Os mesmos autores recomendaram testes com outros adesivos, como o PU, e análises de resistência dos painéis ao ataque de organismos xilófagos (FERREIRA; CAMPOS; SILVA, 2017).

Pesquisa inicial sobre o tema, realizada no Laboratório de Ensaio de Materiais da Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu – UNESP, mostrou que, painéis compensados de dimensões comerciais, produzidos com lâminas de *Pinus taeda* L. tratadas antes da prensagem, não apresentaram ondulações, empenamentos e delaminações, além de não ter sido observada diferença estatística entre as propriedades de flexão longitudinal e transversal (tensão de ruptura e módulo de elasticidade) e resistência da linha de cola ao esforço de cisalhamento para os painéis sem e com tratamento preservativo (DO MARCO; BALLARIN; LARA PALMA, 2015; LARA PALMA; DO MARCO; BALLARIN, 2017).

Com o intuito de desenvolver painéis compensados de alta qualidade e durabilidade prolongada, buscou-se com este trabalho estudar diferentes processos produtivos e produtos. Apresenta como diferenciais o estudo do tratamento preservativo em dois processos distintos (tratamento do painel e das lâminas), dois produtos preservativos (CCA-C e CCB) e duas resinas (fenólica e poliuretana) e a condução do estudo em painéis de dimensões comerciais (Anexo A).

CAPÍTULO 1

PAINÉIS COMPENSADOS PRESERVADOS COM CCA-C EM ETAPA PRELIMINAR E POSTERIOR À PRENSAGEM

Athanázio-Heliodoro, J.C.; Lara-Palma, H.A.; Dellaqua-Santos, G.F.; Silva, G.A.;
Ballarin, A.W.

Resumo

O painel compensado possui aplicações já consagradas na indústria moveleira e construção civil e um mercado crescente como componentes do sistema de construção habitacional *Wood Frame*. Porém, como qualquer produto à base de madeira pode sofrer degradação – deterioração por fungos, cupins e brocas - quando exposto a condições adversas. Com finalidade de ampliar a sua durabilidade, um tratamento preservativo pode ser feito diretamente no painel já pronto, método convencional, mas que pode causar uma diminuição no desempenho físico-mecânico do produto, ou incorporado no processo produtivo, pelo tratamento prévio das lâminas. Com o intuito de desenvolver painéis compensados com durabilidade prolongada, mantendo a alta qualidade, buscou-se com este trabalho estudar os dois tipos de processos produtivos, feitos em painéis de dimensões comerciais. Os compensados foram produzidos com madeira de *Pinus taeda*, com utilização de 360 g.m⁻² de cola fenólica em linha dupla; sofreram uma pré-prensagem a frio e, posteriormente, prensagem a quente por 20 minutos (pressão de 1,2 MPa e temperatura de 130°C). Lâminas e painéis foram tratados com CCA-C pelo método de célula cheia. Os ensaios foram feitos seguindo as normas brasileiras da ABNT. O desempenho mecânico, em painéis tratados prontos e previamente, foi prejudicado pela interação química entre madeira e produto preservativo. Os painéis que receberam tratamento preservativo nas lâminas, em etapa prévia à prensagem, tiveram níveis de molhabilidade, absorção e inchamento melhores que os painéis tratados prontos. Os níveis de retenção foram maiores para os painéis tratados previamente, com melhor penetração dos produtos.

Palavras-chave: Compensado. CCA. Propriedades físico-mecânicas. Resina fenólica.
Lâminas

Abstract

The plywood panel has already established applications in the furniture and civil construction industry and a growing market as components of the Wood Frame housing construction system. However, as any wood-based product can suffer degradation - deterioration by fungi, termites and borers - when exposed to adverse conditions. In order to extend its durability, a preservative treatment can be done directly on the ready-made panel, a conventional method, but which can cause a decrease in the physical-mechanical performance of the product, or incorporated into the production process, by the previous treatment of the veneers. In order to develop plywood panels with long durability, maintaining high quality, this work sought to study the two types of production processes, made in panels of commercial dimensions. The plywoods were produced with *Pinus taeda* wood, using 360 g.m⁻² of phenolic glue in a double line; they underwent a cold pre-pressing and, subsequently, hot pressing for 20 minutes (pressure of 1.2 MPa and temperature of 130 ° C). The tests were carried out following the Brazilian standards of ABNT. Mechanical performance, in both situations, was impaired by the chemical interaction between wood and a preservative product. The panels that received preservative treatment on the veneers, in a stage prior to pressing, had better levels of wettability, absorption and swelling than the treated panels. Retention levels were higher for panels previously treated, with better product penetration.

Keywords: Plywood. CCA. Physical-mechanical properties. Phenolic resin. Veneers.

1.1 Introdução

Os painéis compensados têm aplicação potencialmente crescente no Brasil, como componentes estruturais e de fechamento de sistemas construtivos em madeira do tipo *Wood frame*. Esse sistema de construção habitacional é comum na América do Norte e está em expansão na América do Sul devido à sua rapidez e facilidade de execução, custo competitivo, além de ser ambientalmente sustentável (SPOSTO, 2005; RICHTER, 2007; MOLINA; CALIL JR., 2010; WERNWR; BURROWS, 2014, VASQUES, PIZZO; 2014; TECVERDE, 2015).

Nas construções habitacionais, assim como no uso em pisos de carrocerias de trens, ônibus e caminhões, por exemplo, os painéis têm contato constante com umidade, o que favorece ataques de agentes deterioradores, diminuindo consideravelmente sua durabilidade (TUFOLO NETTO, 2010).

Por essa razão, a norma brasileira NBR 15570 - Especificações técnicas para fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros (ABNT, 2008) e a diretriz SINAT 005 - Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2017) respectivamente determinam que painéis de madeira usados em pisos de carrocerias e em construções habitacionais sejam submetidos a tratamento preservativo sob pressão com CCA-C ou CCB.

O uso desses produtos traria a preocupação adicional quanto à toxicidade; no entanto, pesquisas comprovaram que, no caso do CCA-C, o cobre e o arsênio estão fortemente ligados à madeira pelo efeito fixador do cromo, minimizando o perigo de contaminação ambiental (FREITAS, 2002). Durante a fixação dos ingredientes ativos que são solúveis em água, há a formação de um complexo que se torna insolúvel na madeira através da redução do cromo - que ganha elétrons do cobre e do arsênio, fixando-os - o que os torna resistente à lixiviação e adiciona à madeira, uma proteção contra umidade (WILKINSON, 1979; LEPAGE, 1986; BROWN; EATON, 2000). A fixação dos produtos é efetiva mesmo quando a temperatura dos elementos tratados subiu até 280°C, sendo volatilizado somente 6% em peso do conteúdo de arsênio (CUYPERS *et al.*, 2009).

Segundo Lepage (1986) e Silva (2008) alguns parâmetros são importantes para se avaliar um tratamento preservativo de qualidade e garantir, portanto, uma proteção eficaz contra o ataque de organismos xilófagos e, por conseguinte, contra a umidade. Dentre eles destacam-se a completa penetração do produto na madeira ou em seus

subprodutos - evitando deixar partes, como o miolo do painel, sem proteção – uma retenção total mínima do preservativo para cada uso da madeira e um correto balanceamento dos ingredientes ativos presentes no produto preservativo - determinada pela norma NBR 16143 - Preservação de Madeiras: Sistemas de Categorias de Uso (ABNT, 2018).

Apesar dos benefícios do tratamento preservativo da madeira e seus subprodutos, produtos químicos como o cromo, cobre e arsênico, usados em conservantes à base de água para proteção hidrorrepelente e contra organismos xilófagos reagem com a madeira, causando reduções significativas nas propriedades mecânicas, principalmente se os processos de secagem não forem controlados (IBACH, 2010). Diversos estudos constataram queda nas propriedades físico-mecânicas de painéis compensados e as atribuíram a uma alteração química ocorrida na madeira durante o processo de fixação dos ingredientes ativos devido ao de uso soluções ácidas ou alcalinas (BURMESTER; BECKER, 1963; EATON *et al.*, 1978; TSOUMIS, 1991; VICK; KUSTER, 1992; ACKER; STEVENS, 1993, BARNES *et al.*, 1996; PINHEIRO, 2001; MENDES *et al.*, 2013; FERREIRA, 2017; SEGUNDINHO *et al.*, 2017).

Outras pesquisas sugerem que o sistema vácuo-pressão do tratamento sob pressão e não o produto preservativo em si seria o causador da queda nas propriedades físico-mecânicas. Segundo elas, os ingredientes ativos dos produtos utilizados teriam efeito insignificante na redução das propriedades mecânicas. O tratamento de painéis de madeira com preservativos à base de água causaria um inchamento excessivo, em alguns casos irreversível, prejudicando as demais propriedades (TAŞÇIOĞLU; TSUNODA, 2010; MENDES *et al.*, 2013; TAŞÇIOĞLU *et al.*, 2014).

Uma alternativa para se evitar a queda nas propriedades mecânicas dos painéis compensados, nesses casos, seria a realização do tratamento preservativo em etapa prévia à prensagem, evitando a reumidificação do painel já pronto durante o tratamento sob pressão e diminuindo, por conseguinte, o empenamento do painel, normalmente observado nas indústrias. Além disso, o tratamento feito nas lâminas de madeira poderia beneficiar a penetração e a retenção do preservativo em todas as camadas do compensado posteriormente produzido (FERREIRA *et al.*, 2016).

Em pesquisas do tratamento preservativo por imersão e aspensão das lâminas em escala laboratorial, antes da produção dos compensados, utilizando bórax e ácido bórico, pôde-se concluir que o produto preservativo não influenciou na rugosidade superficial

dos compensados produzidos. Promoveu, contudo, menor capacidade de umectação da superfície e, conseqüentemente, menor absorção do adesivo; 15 minutos de contato com o preservativo foram suficientes para uma retenção de 0,46% de equivalente de ácido bórico (WILLERDING; VIANEZ, 2003; AYDIN; COLAKOGLU, 2007).

O tratamento preservativo de lâminas, feito em autoclave em etapa prévia à produção do painel é pouco estudado e, no geral, apenas em amostras em escala laboratorial. Os resultados até agora obtidos mostraram que estes painéis não apresentaram queda na resistência à flexão em relação aos painéis sem tratamento, porém o tratamento foi responsável pela diminuição da molhabilidade da superfície e, portanto, da qualidade de colagem (DO MARCO *et al.*, 2015; FERREIRA; CAMPOS; SILVA, 2016; LARA PALMA *et al.*, 2017; 2017; FERREIRA, 2017).

Como parte de um trabalho mais amplo, que estuda diferentes alternativas de processos produtivos, produtos preservativos e adesivos para produção de painéis compensados de dimensões comerciais de alta durabilidade, busca-se neste capítulo avaliar a efetividade do tratamento preservativo e o desempenho físico-mecânico dos painéis compensados preservados por dois processos distintos: preservação pré-prensagem - tratamento da lâmina em etapa prévia à prensagem do painel - e preservação pós-prensagem - tratamento do painel já consolidado. O estudo apresenta como diferencial o uso de painéis de dimensões comerciais, que poderão evidenciar as potenciais deformações já observadas em estudos prévios.

Buscou-se responder às seguintes questões:

- O tratamento preservativo convencional, aquele realizado no painel pronto, é mais efetivo em relação ao tratamento preservativo na lâmina, antes da prensagem?
- O tratamento sob pressão, bem como a secagem posterior à preservação promovem encurvamentos nos painéis?
- O tratamento preservativo das lâminas causa delaminação ou redução do desempenho mecânico do painel?

1.2 Material e Métodos

1.2.1 Produção dos compensados

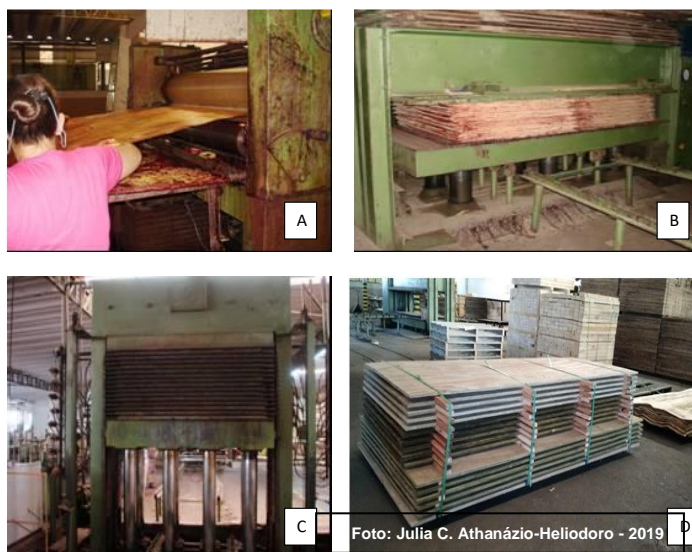
A madeira utilizada para produção dos compensados foi proveniente de plantios comerciais de *Pinus taeda*. Os painéis foram confeccionados na Indústria de

Compensados Caribea, em São Manuel-SP, com sete lâminas de espessura nominal de 2,5 mm cada e dimensões comerciais (2440 mm de comprimento e 1200 mm de largura). Foram mantidas as variáveis do processo de fabricação usuais da indústria (Tabela 1). Foi utilizada a resina fenol-formaldeído (FF) CASCOPHEN HL-7090 HS da marca CASCO® - Hexion® com aplicação de 360 g m⁻² em linha dupla de colagem (Figura 1).

Tabela 1 – Variáveis do processo de fabricação

Etapa	Variáveis		
	Pressão (MPa)	Temperatura (°C)	Tempo (min)
Pré-prensagem	6	Ambiente	10
Prensagem	12	130	20

Figura 1 –Etapas do processo de fabricação de painéis compensados: A - aplicação de cola nas lâminas; B - pré-prensagem a frio; C - prensagem a quente; D - painéis logo após a prensagem a quente



Foram avaliadas quatro situações de produção de painéis compensados (tratamentos) com cinco repetições por situação, variando-se processo e produtos (Tabela 2) sendo uma testemunha, sem tratamento preservativo, uma com tratamento preservativo convencional com CCA-A, feito nos painéis já prontos, uma com o tratamento feito nas lâminas de madeira com CCA-A, em etapa prévia à prensagem e um tratamento feito em autoclave com água – adotado exclusivamente na análise de propriedades mecânicas - para simular o efeito do sistema vácuo-pressão aplicado no painel, sem a possível interferência dos sais nas propriedades físico-mecânicas.

Tabela 2 – Tratamentos do programa experimental

Referência	Processo produtivo	Produto utilizado no tratamento	Tratamento
1	sem tratamento - testemunha	-	Testemunha
2	no painel	Água	Painel - H ₂ O
3	(já prensados)	CCA-C	Painel - CCA-C
4	nas lâminas (antes da prensagem)	CCA-C	Lâminas - CCA-C

*Tratamento em autoclave com água utilizado exclusivamente para avaliação da interferência dos produtos preservativos e do sistema vácuo-pressão no desempenho mecânico.

1.2.2 Tratamento preservativo das lâminas e dos painéis

As lâminas e os painéis foram tratados na Usina Araucária na cidade de Cunha-SP com CCA-C da fabricante Montana Química e com água para avaliação do efeito dos ingredientes ativos (i.a.) do produto preservativo e do processo vácuo-pressão nas propriedades dos painéis tratados.

Para alcançar uma retenção média de 6,5 kg de i.a. m⁻³ para a madeira de Pinus, considerando-se que após o tratamento sob pressão ela absorve aproximadamente 540 litros de água por metro cúbico, seria necessário utilizar um preservativo com concentração de ingredientes ativos de 0,012 kg por litro (1,2%). Assim, para garantir uma retenção mínima de 6,5 kg de i.a. m⁻³, foi utilizada uma concentração maior de ingredientes ativos, de 0,018 kg por litro (1,8%).

Os tratamentos foram realizados sob pressão em autoclave pelo método de célula cheia, garantindo máxima retenção da solução. O método inclui vácuo inicial de 500 mmHg (0,066 MPa) por 30 minutos, seguido da introdução do produto preservativo diluído, pressão de 1,0 MPa por 60 minutos e vácuo final de 500 mmHg por 15 minutos.

Para as lâminas, que apresentavam umidades entre 5% e 7% antes do tratamento sob pressão, foi necessária uma reumidificação prévia (Figura 2-B), aumentando a umidade para próximo do PSF – ponto de saturação das fibras – evitando, assim, uma retenção muito elevada da solução no tratamento. Experiências anteriores já evidenciavam que uma retenção muito elevada promove a surgimento de uma camada de pó (resíduos do tratamento) sobre a lâmina, que dificulta a colagem posterior no processo de confecção do compensado, prejudicando a resistência final do produto.

Figura 2 –A - Tratamento de lâminas sob pressão em autoclave na Usina Araucária; B - Umidificação das lâminas previamente ao tratamento; C - Secagem das lâminas preservadas em secador industrial



Após o tratamento, lâminas e painéis foram estabilizados por um período de 30 dias (LEPAGE; SALIS, 2015) para fixação dos ingredientes ativos. Em seguida, as lâminas foram colocadas no secador industrial (Figura 2-C) até atingirem novamente umidade de 5% a 7%, adequada para a produção dos compensados. Essa secagem das lâminas é fundamental para reduzir o teor de umidade em menor tempo e com a mínima ocorrência de defeitos, promovendo as condições adequadas para colagem e poderia substituir a secagem feita atualmente, antes da prensagem (BALDWIN, 1995; IWAKIRI, 2005).

1.2.3 Confecção dos corpos de prova e ensaios

A avaliação do desempenho dos painéis compensados foi conduzida com ensaios físicos e mecânicos, atendendo-se no geral às prescrições das normas indicadas na Tabela 3.

Os ensaios físicos e mecânicos foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais do Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia e no Laboratório de Qualidade e Painéis de Madeira do Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP – Botucatu, em corpos de prova retirados dos painéis seguindo as prescrições da NBR 9488 - Amostragem de compensado para ensaio - Procedimento (ABNT, 2011a) e da NBR 9489 – Condicionamento de corpos de prova de compensados para ensaios – Requisitos (ABNT, 2011b), além do plano de corte apresentado no Apêndice A.

Tabela 3 – Ensaios e normas para painéis compensados da madeira

Ensaio	Normas/metodologias	Réplicas*
Flexão estática (longitudinal e transversal - $E_{M,l}$; $E_{M,t}$; $f_{M,l}$; $f_{M,t}$)	NBR 9533 (ABNT, 2012a)	5
Qualidade da colagem / cisalhamento na linha de cola (f_v)	NBR ISO 12466-1 (ABNT, 2012b) NBR ISO 12466-2 (ABNT, 2012c)	6
Densidade aparente	NBR 9485 (ABNT, 2011c)	6
Teor de umidade	NBR 9484 (ABNT, 2011d)	6
Inchamento e absorção (estabilidade dimensional)	NBR 9535 (ABNT, 2011e) e 9486 (ABNT, 2011f)	6
Empenamento	ISO 9709/2005	1
Molhabilidade	Ferreira, 2017	12
Penetração e Retenção	NBR 6232 (ABNT, 2013) e IPT 2930, revisão 11	5

Notas: $E_{M,l}$ - módulo de elasticidade à flexão longitudinal; $E_{M,t}$ - módulo de elasticidade à flexão transversal; $f_{M,l}$ - resistência à flexão longitudinal; $f_{M,t}$ - resistência à flexão transversal; f_v - tensão de ruptura.
*Recomendadas pelas normas.

1.2.3.1 Ensaio físico nas lâminas, corpos de prova e painéis

O empenamento foi medido seguindo as recomendações adaptadas da norma ISO 9709 (ISO, 2005) utilizando uma linha esticada entre as extremidades do painel como referência para medição do desvio do painel em ambas as direções, em termos percentuais, sendo considerado encurvamento o desvio na direção paralela às fibras das capas e encanoamento o desvio na direção transversal às fibras das capas (Figura 3).

Figura 3 – Medição do empenamento em uma das direções do painel compensado



A densidade aparente, teor de umidade, absorção e inchamento foram avaliados em corpos de prova seguindo-se as normas apresentadas na Tabela 3. A densidade aparente e o teor de umidade foram determinados após o condicionamento dos corpos

de prova até o equilíbrio em câmara de climatização com 65% de umidade relativa e 21°C de temperatura.

A molhabilidade das lâminas foi avaliada no Laboratório de Árvores, Madeiras e Móveis - LAMM do CT-Floresta do Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT em amostras de lâminas tratadas com CCA-C e lâminas sem tratamento. Foram avaliadas quatro lâminas por tratamento e em cada uma delas, foram feitas três repetições.

A avaliação foi feita adaptando-se o procedimento analógico usado por Ferreira (2017) para um processo digital, com medição do ângulo entre gota e lâmina para comparação dos resultados com os reportados na literatura.

Foi gotejada água destilada sobre a superfície da lâmina e foi feita uma fotografia após 10 segundos de descanso usando o equipamento “*Dino-lite*” *Digital Microscope Pro*. A leitura do ângulo entre a lâmina e a gota foi feita com processamento da foto digital no *software Dino Capture 3.3.0.0* na escala de aproximação 43 (Figura 4). A medida do ângulo foi usada para comparação com os valores reportados na literatura internacional.

Figura 4 – Molhabilidade das lâminas: A - Gotejamento da água destilada sobre a lâmina; B - Fotografia digital; C - Medição dos ângulos laterais



1.2.3.2 Ensaios mecânicos nos corpos de prova

Para os ensaios de flexão estática foi utilizada Máquina Universal de Ensaios DL 30000 MF, eletromecânica e computadorizada da EMIC-Equipamentos e Sistemas de Ensaio Ltda. Os corpos de prova ensaiados tiveram suas umidades medidas e os resultados de resistência e rigidez à flexão foram corrigidos para a umidade referencial de 12% de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997).

A qualidade da colagem foi avaliada por meio do ensaio de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento, realizado em máquina MCIS, eletromecânica, com capacidade 5 kN (500 kgf) da EMIC-Equipamentos e Sistemas de Ensaio Ltda. Visando

o uso desses painéis em ambiente externo ou ambiente submetido a alta umidade, foi tomada como referência à classe 3 da norma NBR ISO 12466-2 (ABNT, 2012). Nessa situação o teste de cisalhamento deve ser realizado em corpos de prova que receberam dois diferentes pré-tratamentos distintos: um básico e um adicional. O tratamento básico utilizado foi a imersão prévia dos corpos de prova em água fria durante 24 horas para posterior ensaio. O tratamento adicional foi o BDB – *boiling, drying, boiling*, no qual os corpos de prova passam por imersão em água em ebulição por 4 horas (*boiling*), seguido por secagem em estufa ventilada por um período de tempo de 16 a 20 horas à temperatura de $60 \pm 3^{\circ}\text{C}$ (*drying*), nova imersão por 4 horas em água em ebulição (*boiling*) e, por último, um resfriamento em água por 1 hora à temperatura inferior a 30°C (NBR ISO 12466-1; ABNT, 2012).

1.2.3.3 Penetração e retenção do produto preservativo

Os ensaios de penetração e de retenção do produto preservativo foram realizados no Laboratório de Árvores, madeiras e móveis – LAMM do IPT. Para ambos os testes foram feitas seis repetições por painel em cinco painéis por tratamento.

O ensaio de penetração do produto preservativo seguiu as recomendações da norma NBR 6232- Penetração e retenção de preservativos em madeira tratada sob pressão (ABNT, 2013), que tem como princípio a ocorrência de reações colorimétricas na presença do produto preservativo. A avaliação visual foi feita após aplicação manual de solução de cromoazurol-S que evidencia a penetração do cobre no compensado (Figura 5-A e B).

Figura 5 – Sequência dos ensaios de penetração e retenção do produto preservativo: A e B - Análise de penetração antes e depois da aplicação da solução de cromoazurol-S; C - Retirada de disco para cálculo da densidade aparente ; D - Moagem do material ; E - Extração a quente ; F - Leitura e espectrofotômetro de chamas

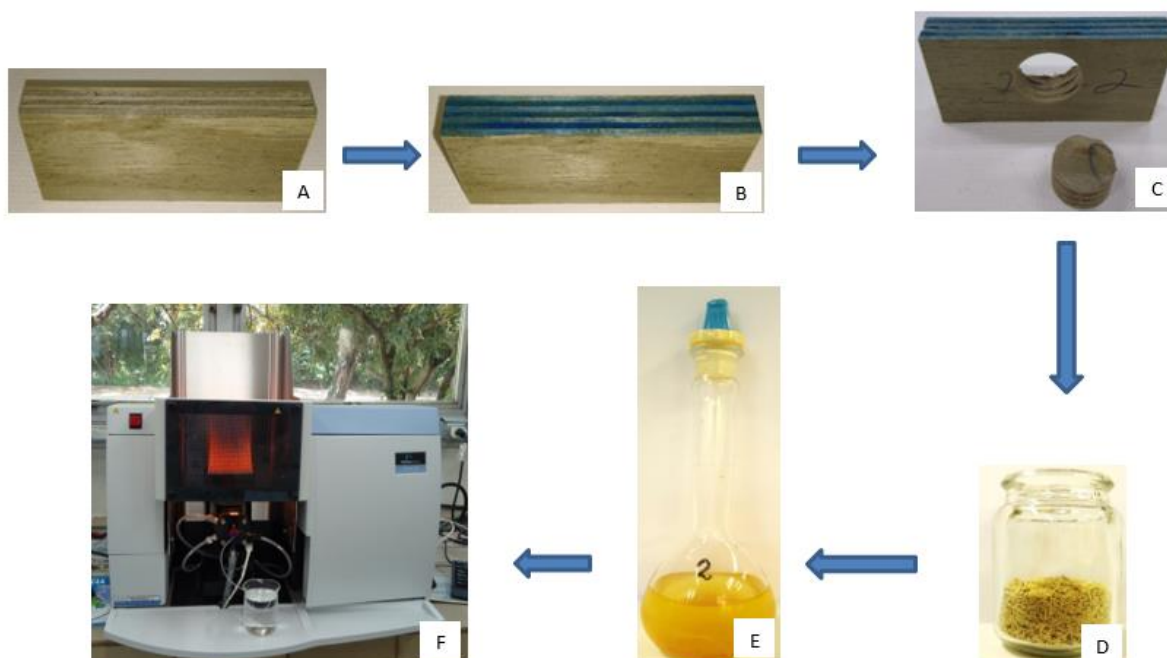


Foto: Julia C. Athanázio-Heliodoro - 2019

Os mesmos corpos de prova foram utilizados para análise da retenção do produto preservativo. Um disco de 2,5 cm de diâmetro foi retirado de cada corpo de prova para cálculo da densidade aparente após serem secos até massa constante em estufa a $103\pm 2^\circ$ (Figura 5-C). O material foi climatizado e moído em moinho do tipo *Willey* na granulometria de 30 *mesh* (Figura 5-D) para extração a quente em banho maria com mistura de peróxido de hidrogênio e ácido sulfúrico (Figura 5-E). As concentrações dos elementos cobre, cromo e arsênio foram avaliadas por espectrofotometria de absorção atômica (Figura 5-F) segundo procedimento interno IPT 2930 - revisão 11, que é baseado na norma NBR 6232 (ABNT, 2013).

O balanceamento percentual entre os três ingredientes ativos que compõe o preservativo CCA-C foi calculado pela proporção entre um óxido e a somatória de todos os óxidos retidos no painel. Os resultados foram comparados com os limites apresentados pela norma NBR 16202 – Postes de eucalipto preservado para redes de distribuição elétrica — Requisitos (ABNT, 2013c) estabelece limites para esse balanceamento para as soluções CCA-C e CCB. Os limites de retenções na madeira,

para cada um dos ingredientes ativos que compõe o CCA-C foi avaliado em um estudo feito pelo IPT 32306 (IPT, 1994) e serão usados aqui, juntamente com os limites do balanceamento para soluções da norma NBR 16202 (ABNT, 2013), para verificar a qualidade do tratamento preservativo feito em lâminas e em compensados prontos.

1.2.4 Análise estatística

Os resultados dos ensaios nos corpos de prova, agrupados por painel – considerada aqui a unidade amostral - foram analisados no *Exstat* em gráficos do tipo *Box-plot*, para eliminação de possíveis *outliers*, ou seja, resultados discrepantes dos demais. A média dos resultados obtidos para cada painel após eliminação de *outliers* foi usada na análise estatística. A comparação entre as situações estudadas (Tabela 1) foi feita pelo método de *Bonferroni* ($p < 0,05$).

1.3 Resultados e discussão

1.3.1 Empenamento

Diferente do esperado, o tratamento sob pressão dos painéis já prontos (painel-CCA-C) não aumentou o encurvamento e o encanoamento destes. O cuidado durante o tratamento, com todos os painéis tabicados e amarrados durante o tempo de tratamento sob pressão e secagem (Figura 1) pode ter diminuído a variação dimensional dos produtos (Tabela 4). O teste de empenamento, exclusivamente, foi feito com apenas cinco repetições – os painéis em dimensões comerciais – e o pequeno número de amostras pode ser responsável pelos altos valores de desvio padrão e, conseqüentemente, pela igualdade estatística encontrada, apesar dos valores médios diferentes.

Tabela 4 – Empenamento (média \pm desvio-padrão) dos painéis

Tratamento	Encurvamento (%)	Encanoamento (%)
Testemunha	0,46 \pm 0,29 a	0,78 \pm 0,61 a
Painel - CCA-C	0,44 \pm 0,14 a	0,92 \pm 0,77 a
Lâminas - CCA-C	0,58 \pm 0,28 a	0,23 \pm 0,30 a

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$).

1.3.2 Densidade e umidade

Não houve diferença estatística significativa entre os resultados de densidade das situações estudadas. Todos os painéis foram produzidos com matéria-prima de mesma procedência, no mesmo processo industrial. Além disso, as diferentes umidades entre tratamentos não foram suficientes para promover diferenciações significativas nas densidades (Tabela 5). Apesar da densidade mais baixa que as normalmente reportadas na literatura (CAMPOS *et al.*, 2009; MENDES *et al.*, 2013; FERREIRA *et al.*, 2017; MACEDO *et al.*, 2019), os valores ficaram dentro dos delimitados pelo Catálogo técnico número 1 – Compensado de Pinus (ABIMCI, 2002).

As umidades foram estatisticamente menores e iguais entre si para painéis sem tratamento e para painéis prensados com lâminas previamente tratadas com CCA-C. Os painéis que receberam preservação posterior (painel-CCA-C) tiveram maior umidade por serem os únicos a sofrerem imersão completa em solução preservante dentro da autoclave após a prensagem.

Tabela 5 – Densidade e umidade (média ± desvio-padrão) dos painéis compensados

Tratamento	Densidade (kg m ⁻³)	Umidade (%)
Testemunha	493 ± 36 a	8,18 ± 0,48 a
Painel - CCA-C	464 ± 23 a	12,41 ± 0,11 b
Lâminas - CCA-C	496 ± 13 a	8,11 ± 0,51 a

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$).

1.3.3 Absorção e inchamento

Os menores valores de absorção foram observados em painéis tratados sob pressão com CCA-C, especialmente após a prensagem, enquanto que painéis sem tratamento tiveram absorção estatisticamente superior ao Painel-CCA-C (Tabela 6).

A menor absorção observada nos painéis tratados pode ser explicada em partes pela menor quantidade de espaços vazios na madeira, visto que estes painéis apresentaram umidade inicial mais elevada, ou seja, tiveram seus sítios higroscópicos preenchidos com H₂O ou componentes do produto preservativo antes de serem submetidos ao teste de absorção (MENDES *et al.*, 2013). Realmente, segundo Kollmann e Côte (1984), quanto maior a umidade da lâmina, menor a absorção de água pela madeira. Além disso, os sais do CCA-C diminuem a molhabilidade da superfície da

madeira e, conseqüentemente, diminuem também a sua capacidade de absorção de água e seu inchamento (FERREIRA, 2017).

Tabela 6 – Absorção (média \pm desvio-padrão) dos painéis compensados

Tratamento	Absorção (%)
Testemunha	55,54 \pm 1,17 b
Painel - CCA-C	49,80 \pm 1,65 a
Lâminas - CCA-C	50,00 \pm 4,03 ab

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$).

O mesmo padrão observado nos ensaios de absorção, com valores maiores para a testemunha sem tratamento ocorreu, no geral, no ensaio de recuperação em espessura, o que era esperado pois, quanto menor a quantidade de água absorvida, menor a variação na espessura do painel (Tabela 7).

A prensagem das lâminas para formação do painel compensado produz um incremento da densidade e também tensões internas, fatores estes que afetam a estabilidade dimensional do painel na direção da prensagem (perpendicular ao plano do painel). Em contato com água, o painel compensado sofre inchamento em espessura formado por dois componentes: o inchamento por absorção de água e o causado pela liberação das tensões de prensagem.

A recuperação em espessura é a medida da capacidade do painel retornar às suas dimensões iniciais, depois de entrar em contato com água. Valores de recuperação em espessura próximos a zero indicam que, após imersão em água e secagem, a espessura do corpo de prova se manteve praticamente a mesma da espessura do corpo de prova de controle (que não sofreu imersão nem, portanto, alívio de tensões), ou seja, o material não tinha muitas tensões internas ou a colagem foi efetiva, revelando bom desempenho.

Entre as variáveis de prensagem o tempo de prensagem afeta de maneira significativa a recuperação de espessura, sendo que para tempos mais longos corresponderam valores maiores de recuperação de espessura. Segundo Wellons et al. (1983) maiores tempos de prensagem aumentam a compressão e, como consequência, crescem as tensões internas nos painéis compensados, promovendo maiores valores de recuperação de espessura.

Os painéis com tratamento nas lâminas e nos painéis prontos tiveram recuperação em espessura estatisticamente igual e inferior à recuperação em espessura dos painéis sem tratamento. Este desempenho superior pode ter sido ocasionado por menores tensões internas geradas durante a prensagem, mas elas não estariam relacionadas ao tempo de prensagem nem tampouco aos níveis de pressão, já que foram idênticos aos dos painéis sem tratamento.

Tabela 7 – Inchamento e recuperação em espessura (média \pm desvio-padrão) dos painéis compensados

Tratamento	Recuperação em espessura (%)	Inchamento (%)	Inchamento + Recuperação em espessura (%)
Testemunha	3,59 \pm 1,22 b	6,11 \pm 0,75 a	9,70 \pm 1,58 b
Painel - CCA-C	0,82 \pm 0,45 a	6,84 \pm 0,49 a	7,66 \pm 0,77 ab
Lâminas - CCA-C	1,13 \pm 0,67 a	6,02 \pm 0,79 a	7,15 \pm 0,73 a

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$).

Ferreira (2017) testou o tratamento prévio de lâminas com CCA-C para posterior prensagem de painéis compensados em tamanhos reduzidos e também obteve menores valores de inchamento para painéis com tratamento realizado na lâmina. Os valores obtidos neste trabalho (Tabela 7), estatisticamente iguais entre si, também foram próximos dos valores obtidos por Ferreira de 6,87% para painéis com lâminas tratadas e 7,84% para painéis tratados quando prontos.

Todos os valores do trabalho de Ferreira (2017) e deste foram inferiores aos obtidos por Mendes *et al.* (2013) que observou inchamentos nos compensados tratados entre 7,84% e 8,37%.

1.3.4 Molhabilidade das lâminas

Corroborando os resultados obtidos nos testes de absorção, o ensaio de molhabilidade das lâminas também mostrou que o produto preservativo diminui o acesso de água e, conseqüentemente, de adesivos ao interior da lâmina de madeira (Tabela 8 e Figura 6). Segundo Ferreira (2017), o cromo, responsável pela fixação dos ingredientes ativos do preservativo na madeira e distribuído na superfície das lâminas impede a

infiltração da água. O ângulo observado entre a gota e as lâminas tratadas com CCA-C foi bastante próximo de ângulo de 113,12° medido por Ferreira, Campos e Silva (2016).

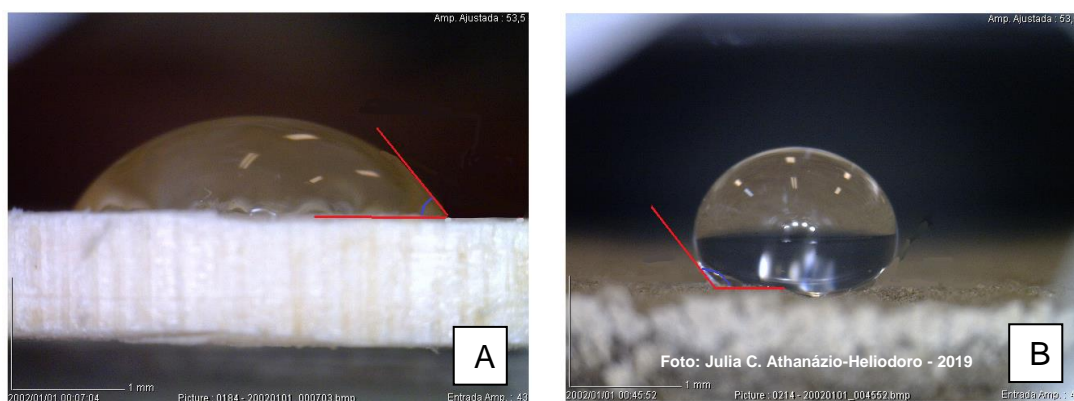
As lâminas tratadas com CCA-C também tiveram um maior ângulo de contato entre gota e lâmina, indicando menor molhabilidade causada pelo acúmulo dos óxidos As, Cu e Cr nas paredes celulares. A penetração de água ao longo do tempo também foi mais lenta indicando o desenvolvimento de uma característica higroscópica pelo complexo madeira-preservativo, explicada pela deposição de óxidos na madeira e pela presença de cera em CCAs comerciais (ZHANG *et al.*, 1997; MALDAS; KAMDEM, 1998 a e b; TAŞÇIOĞLU, 2007).

Tabela 8 – Molhabilidade das lâminas - ângulo de contato (média ± desvio-padrão) entre gota d'água e superfície de lâminas sem tratamento e tratadas

	Ângulo (graus)
Testemunha	87,48 ± 14,56 b
Tratamento nas lâminas com CCA-C	118,23 ± 6,54 a

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$).

Figura 6 – Exemplo de medição do ângulo de contato de gota d'água com a superfície da lâmina no ensaio de molhabilidade. A – Lâmina sem tratamento; B – lâmina tratada com CCA-C



1.3.5 Qualidade da colagem

Painéis tratados com CCA-C ou com água, painéis feitos com lâminas tratadas ou painéis sem tratamento não apresentaram diferença estatística significativa na resistência na linha de cola (cisalhamento) para nenhum dos dois pré-tratamentos utilizados – 24 horas em água fria ou com dois ciclos de fervura - BDB (Tabela 9).

Segundo a norma NBR ISO 12466-1 (ABNT, 2012), neste caso não foi necessária a avaliação da porcentagem de falha na madeira visto que todos os resultados dos ensaios de cisalhamento obtidos ficaram acima de 1 MPa.

Os produtos preservativos diminuíram a molhabilidade das lâminas e a absorção de água, atestando um ganho na qualidade higroscópica com o pré-tratamento das lâminas do compensado, o que poderia prejudicar a qualidade de colagem, mas isso não foi verificado. A capacidade de colagem não foi prejudicada com a alteração do método de tratamento.

Tabela 9 – Resistência da colagem ao esforço de cisalhamento dos painéis compensados (média ± desvio-padrão)

	Cisalhamento 24 horas água fria (MPa)	Cisalhamento BDB (MPa)
Testemunha	1,49 ± 0,22 a	1,19 ± 0,16 a
Tratamento no painel com H2O	1,43 ± 0,47 a	1,03 ± 0,14 a
Tratamento no painel com CCA-C	1,28 ± 0,24 a	1,09 ± 0,32 a
Tratamento nas lâminas com CCA-C	1,50 ± 0,36 a	1,32 ± 0,21 a

Nota: BDB – Boiling, drying, boiling. Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$).

Mesmo sem diferença estatística significativa, os painéis prensados com lâminas tratadas apresentaram resistências maiores nos dois tipos de pré-tratamentos, seguido dos painéis sem tratamento, demonstrando que o tratamento de painéis já prontos sob pressão, seja com água ou com CCA-C pode, em certo nível, prejudicar as propriedades mecânicas dos painéis compensados, segundo o que têm sido relatado na bibliografia (BURMESTER; BECKER, 1963; EATON *et al.*, 1978; TSOUMIS, 1991; BARNES *et al.*, 1996; PINHEIRO, 2001; MENDES *et al.*, 2013).

1.3.6 Flexão

Na direção longitudinal, embora as situações com tratamento preservativo (na lâmina ou no painel) tenham revelado resistências médias menores, só foi observada diferença estatística entre os painéis com lâminas tratadas e os painéis “tratados” com água (Tabela 10). Se analisada a resistência relativa à flexão (resistência dividida pela densidade) observa-se que os tratamentos com CCA-C (na lâmina e no painel) tem resistências estatisticamente iguais e menores que as dos painéis que receberam exclusivamente água na autoclave. Essa associação de ocorrências sugere uma

provável ação prejudicial dos ingredientes ativos do produto preservativo CCA-C no desempenho mecânico do painel compensado, como atribuído pelo *Wood Handbook* (IBACH, 2010) e por Acker e Stevens (1993), Vick e Kuster (1992) e Pinheiro (2001). Essa constatação é contrária à relatada na literatura por Taşçioğlu *et al.* (2014) e por Mendes *et al.* (2013) que atribuíram a queda nas propriedades ao tratamento sob pressão.

O módulo de elasticidade na direção longitudinal e todos os resultados de resistência e rigidez na direção transversal não revelaram diferença estatística significativa entre as situações estudadas, demonstrando que o tratamento prévio das lâminas, apesar de melhorar a capacidade hidrorrepelente dos compensados, não prejudica suas propriedades mecânicas em relação ao tratamento realizado no painel já pronto.

Tabela 10 – Resistência e MOE à flexão (média ± desvio-padrão) dos painéis compensados

Tratamentos	Resistência (MPa)	100×MOR/ρ		MOE (MPa)
		Longitudinal		
Testemunha	40,77 ± 2,31 ab	8,21 ± 0,28 b		4541 ± 419 a
Tratamento no painel com H2O	44,49 ± 1,22 a	9,09 ± 0,28 a		5141 ± 512 a
Tratamento no painel com CCA-C	36,96 ± 4,91 ab	7,97 ± 0,99 b		3955 ± 1126 a
Tratamento nas lâminas com CCA-C	34,07 ± 5,61 b	6,94 ± 1,10 b		4475 ± 733 a
		Transversal		
Testemunha	24,01 ± 2,97 a	4,85 ± 0,74 a		2241 ± 524 a
Tratamento no painel com H2O	26,29 ± 3,90 a	5,37 ± 0,79 a		2016 ± 366 a
Tratamento no painel com CCA-C	23,98 ± 4,24 a	5,18 ± 0,96 a		1861 ± 339 a
Tratamento nas lâminas com CCA-C	21,00 ± 3,24 a	4,28 ± 0,69 a		2201 ± 149 a

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$). 100×MOR/ρ: resistência relativa.

1.3.7 Penetração

O tratamento preservativo tradicional, feito no painel compensado já pronto não permitiu uma penetração completa do produto em todas as camadas, deixando as lâminas externas do compensado protegidas – em cor azul - e lâminas internas desprotegidas - sem coloração (Figura 7-B). Quando usado como componente de construções habitacionais ou em mobiliário, onde o painel será serrado para ser aplicado, as partes sem tratamento ficarão expostas e susceptíveis à ação de organismos xilófagos e à umidade. Tascioglu e Tsunoda (2012) também verificaram um gradiente de

retenção de preservativo entre as seções superficiais e o miolo dos painéis compensados tratados sob pressão. Já os painéis feitos com lâminas previamente tratadas tiveram penetração em toda a espessura dos painéis.

Figura 7– Penetração do produto preservativo CCA-C nos painéis compensados tratados A – tratamento nas lâminas e B – tratamento nos painéis

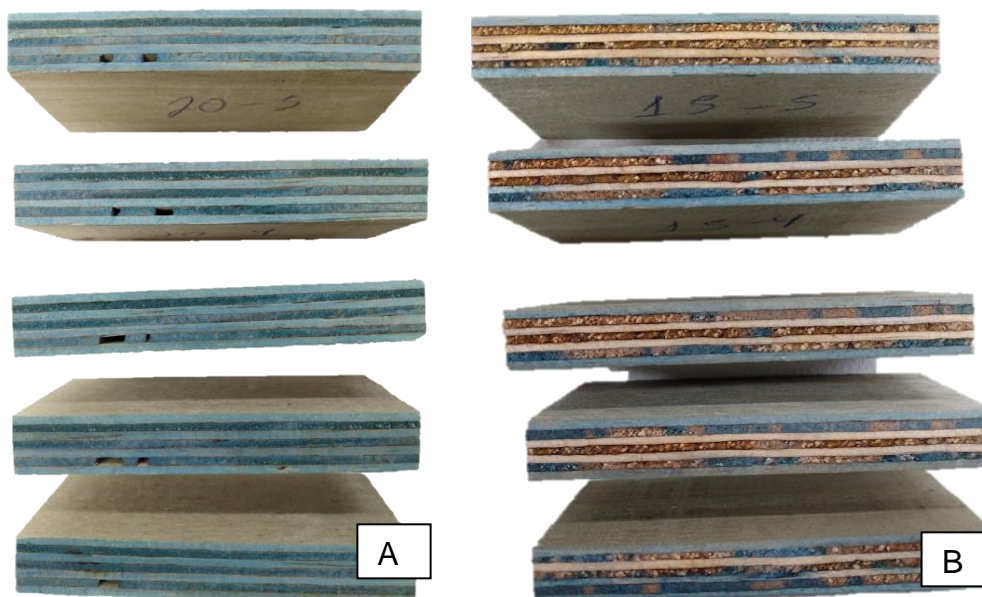


Foto: Julia C. Athanázio-Heliodoro - 2019

1.3.8 Retenção

Conforme comentado, foi planejada uma retenção total mínima (e não média) de $6,5 \text{ kg m}^{-3}$ de ingredientes ativos do produto preservativo para os painéis compensados com tratamento no painel e na lâmina o que permitiria o uso exterior, na categoria quatro, fora de contato com o solo e sujeito à intempéries, resistente à organismos xilófagos como cupim de madeira seca, broca de madeira, cupim subterrâneo, cupim arborícola, fungo embolorador ou manchador e fungo apodrecedor (ABNT, 2013b).

No entanto, as retenções foram superiores à esperada para ambos os tratamentos, provavelmente pelo aumento da concentração do preservativo de 1,2% para 1,8%. Com as retenções obtidas (Tabela 11) permite-se um uso diferenciado dos produtos na categoria 5 - subcategorias “c” ou “e” para componentes estruturais de difícil manutenção e enterradas no solo ou em contato com água doce sujeitas à deterioração por organismos xilófagos (ABNT, 2013b).

Tabela 11 – Retenção dos componentes do produto preservativo CCA-C (média ± desvio-padrão) nos painéis compensados

Tratamento	Retenção			
	CuO (kg m ⁻³)	CrO ₃ (kg m ⁻³)	As ₂ O ₅ (kg m ⁻³)	Total (kg m ⁻³)
Painel com CCA-C	1,74 ± 0,27 a	4,40 ± 0,51 b	3,38 ± 0,39 b	9,52 ± 1,16 b
Lâminas com CCA-C	2,10 ± 0,32 a	6,18 ± 0,68 a	4,50 ± 0,58 a	12,78 ± 1,58 a

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$).

Foi possível observar uma retenção total 34% maior de preservativo para os painéis prensados com lâminas tratadas, mostrando que esse método é vantajoso em relação ao de tratamento do painel já pronto, que impede a total penetração e uma maior retenção, especialmente do cromo e do arsênio (Tabela 11).

Os painéis tratados prontos tiveram altas retenções médias, apesar que a linha de cola das capas e contracapas criarem uma barreira para a penetração do produto preservativo no miolo dos painéis. A retenção nas lâminas externas foi, assim, maior que retenção média obtida de 9,52 kg m⁻³.

As retenções dos ingredientes ativos no compensado (Tabela 12), apesar de diferentes para painéis tratados prontos (maior retenção de cobre) e painéis tratados na lâmina (maior retenção de cromo), manteve-se, no geral, dentro dos limites estabelecidos tanto pela norma NBR 16202 (ABNT, 2013) quanto pelo estudo IPT 32306 (1994) para a retenção na madeira, com exceção do tratamento com CCA-C em lâminas, que apresentou proporção de cobre menor que o mínimo estabelecido pela ABNT (ABNT, 2013b) como reportado por Dahlgren e Hartford (1972) que observaram um pequeno desbalanceamento de cobre, cromo e arsênio durante o mecanismo de fixação dos ingredientes ativos na madeira atribuída à diferença no tempo de fixação de cada um dos componentes individuais do CCA-C. Na Tabela 12 podem ser observados os limites de balanceamento estabelecidos pela norma NBR 16202/2013, pelo estudo IPT 32306 (1994) para a retenção na madeira e balanceamento encontrado nos painéis compensados (média ± desvio-padrão).

Tabela 12 – Limites de balanceamento estabelecidos pela NBR 16202 (ABNT, 2013c) e pelo estudo IPT 32306 (IPT, 1994) para a retenção na madeira e balanceamento encontrado (média \pm desvio padrão)

	CuO (%)	CrO₃ (%)	As₂O₅ (%)
CCA-C Painei	18,22 \pm 0,87	46,26 \pm 0,85	35,54 \pm 0,49
CCA-C Lâmina	16,36 \pm 0,55	48,42 \pm 0,78	35,20 \pm 0,46
Limites IPT 32306	15,20 – 22,80	41,80 – 53,20	27,30 – 40,70
Limites NBR 16202	17,00 – 21,00	44,50 – 50,50	30,00 – 38,00

1.4 Conclusões

O tratamento preservativo feito diretamente em painéis já prontos, além de reter uma quantidade menor de ingredientes ativos, também teve penetração desigual, evidenciando a vantagem do tratamento feito em lâminas, em etapa prévia à prensagem dos painéis. Além disso, esse tratamento prévio das lâminas não prejudicou a colagem dos painéis como esperado, apesar de aumentar a proteção do painel contra umidade, visto que apresentou menores níveis de molhabilidade, absorção e recuperação em espessura.

Não foram observados empenamentos significativos nos painéis de nenhum dos tratamentos, possivelmente devido ao cuidadoso tabicamento e amarração feitos durante o processo de preservação e de secagem, evitando o empenamento observado normalmente após tratamento sob pressão.

Não houve redução no desempenho mecânico dos painéis no tratamento CCA-C Lâminas, apesar de que, em ambas as situações – CCA-C Lâminas e CCA-C Painéis – a resistência foi prejudicada pela interação química entre madeira e produto preservativo, visto que os painéis submetidos a tratamento sob pressão apenas com água, teve resultados superiores aos tratados com CCA-C.

REFERÊNCIAS

- ACKER, J. V.; STEVENS, M. Effects of various preservative treatments on the mechanical and physical properties of plywood. **Conference**: 93-05-16/21 Orlando, Florida, USA. 1993.
- ABIMCI. Compensado de Pinus. Catálogo técnico número 1. Curitiba. 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15570** - Especificações técnicas para fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16143** - Preservação de Madeiras - Sistema de categorias de uso – Requisitos. Rio de Janeiro, 2013b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16202** - Postes de eucalipto preservado para redes de distribuição. Rio de Janeiro, 2013c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6232** - Penetração e retenção de preservativos em madeira tratada sob pressão – Requisitos. Rio de Janeiro, 2013a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190** -: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 107 p. 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9484** - Compensado – determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2011a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9485** - Compensado – determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2011b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9486** - Compensado - Determinação da absorção de água – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9588** - Amostragem de compensado para ensaio – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9589** - Condicionamento de corpos-de-prova de compensados para ensaios - Procedimento. Rio de Janeiro, 2011e.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9533** - Compensado – determinação da resistência à flexão estática. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9535** - Painéis de madeira compensada: determinação da recuperação em espessura e inchamento mais recuperação em espessura. Rio de Janeiro, 2011f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12466-1** - Madeira compensada – Qualidade de colagem Parte 1: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12466-2** - Madeira compensada – Qualidade de colagem Parte 2: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012b.

AYDIN, I.; COLAKOGLU, G. Variation in surface roughness, wettability and some plywood properties after preservative treatment with boron compounds. **Building and Environment**, West Lafayette, v. 42, n. 11, p. 3837-3840, 2007.

BALDWIN, R. F. Plywood and veneerbased products: manufacturing practices. San Francisco: **Miller Freeman**, 388p. 1995.

BARNES, H.M.; KHOUADJA, A.; LYON, D. E. Bending Properties of Treated **Wood Western Hemlock Plywood**. pg 2, 1996.

BROWN, C.J.; EATON, R.A. Leaching of copper, chromium and arsenic from CCA-treated Scots pine exposed in sea water. Stockholm. **The International research Group on Wood Preservation**, (IRG/WP, 00-50149). 2000.

BURMESTER, A.; BECKER, G. Investigations on the influence of wood preservatives on the strength of wood. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 21, n. 10, p. 393-409, 1963.

BURROWS, J. Canadian Wood-Frame House Construction - Rev. ed. 1948. "Third Combined Imperial/Metric Edition". Updated to conform to the 2010 **National Building Code of Canada and enhanced by John Burrows**. 2014.

CUYPERS, F.; DE DOBBELAERE, C.; HARDY, A.; VAN BAEL, M. K.; HELSEN, L. Thermal behaviour of arsenic trioxide adsorbed on activated carbon. **Journal of Hazardous Materials**. 166, 2009.

DAHLGREN, S.; HARTFORD, W. Kinetics and Mechanism of Fixation of Cu-Cr-As Wood Preservatives. **Holzforschung**. 26. 10.1515/hfsg.1972.26.3.105. 1972.

DIAS, F.M. Aplicação de resina poliuretana à base de manona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada. **Tese** (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo. São Carlos. 116 p. 2005.

DO MARCO, J. T.; BALLARIN, A. W.; LARA PALMA, H. A. Compensado de *Pinus taeda* l. com lâminas tratadas com CCA – Estudo preliminar. XV EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. **Anais**. Curitiba, PR, Brasil. 2015.

EATON, M. L.; DRELICHARZ, J. A.; ROE JUNIOR. T The mechanical properties of preservative treated marine piles: results of limited full scale testing. **Port Hueneme: Civil Engineering Laboratory**, (Technical Note, 1535). 42 p. 1978.

FERREIRA, B. S. Avaliação do desempenho de compensados de *Pinus taeda* submetidos a tratamento térmico e químico. 2017. 106 f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

FERREIRA, B. S.; CAMPOS, C. I.; SILVA, J. V. F. Influência do tratamento preservativo com CCA na flexão estática de compensados. **Anais. XV EBRAMEM**. Curitiba. 2016.

FERREIRA, B. S.; CAMPOS, C. I.; SILVA, J. V. F. Qualidade de colagem de compensados de madeira tratados com CCA. II Congresso Latinoamericano de Estructuras de madera y II Congreso Ibero-latinoamericano de la madera en la construcción. **Anais**. Junin. 2017.

FERREIRA, B.; SILVA, J.; DE CAMPOS, C. Static Bending Strength of Heat-Treated and Chromated Copper Arsenate-Treated Plywood. **BioResources**, 12(3), 6276-6282. 2017.

FREITAS, V.P. Variações na retenção de CCA-C em estacas de *Pinus* após 21 anos de exposição em campo de apodrecimento. (Dissertação (Mestrado), Piracicaba, ESALQ-USP, 2002.

IBACH, R. E. Wood Preservation. Cap. 14. In: **Wood Handbook**. Forest Products Laboratory. 463 p. 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9709:2005**. Structural timber — Visual strength grading — Basic principles. Switzerland. 2005.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. IPT 2930 – revisão 11.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. IPT 32306 - Determinação das tolerâncias de balanceamento para postes de madeira preservada: preservante CCA-C. **ABPM – Associação Brasileira de Preservadores de Madeira**. 1994.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 247 p. 2005.

KOLLMANN, F.P.; CÔTÉ, W.A. Principles of wood Science and technology. V. 1. Solid Wood. Springer-Verlag, 1984.

LARA PALMA, H. A.; DO MARCO, J. T.; BALLARIN, A. W. Propriedades físicas e mecânicas de compensados com lâminas de *Pinus taeda* l. tratadas com CCA. II Congresso Latinoamericano de Estructuras de madera y II Congreso Ibero-latinoamericano de la madera en la construcción. **Anais**. Junin. 2017.

LEPAGE, E. S. Moq® Ox 50 (CCB-O) – preservativo sustentável com longo histórico de eficiência. Revista **Referência**. P. 80 – 83. Disponível em <<http://www.montana.com.br/Noticias/Clippings/Revista-Referencia-Segunda-Feira-20-de-Setembro-de-2010>>. Acesso em 03/10/2015. 2010.

LEPAGE, E.S.; SALIS, G.A. **Atualizações em preservação de madeiras** – curso completo. São Paulo: Editora, 64p, 2015.

MALDAS, D.C.; KAMDEM, D.P. Surface characterization of chromated copper arsenate (CCA)-treated red maple. **Journal of Adhesion Science and Technology**, 12(7), 763–772. 1998.

MALDAS, D.C.; KAMDEM, D.P. Surface tension and wettability of CCA treated red maple. **Wood and fiber Science**, 30(4), 368–373. 1998.

MENDES, R.F.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; VIDAL, J.M.; ALMEIDA, N.F.; JANKOWSKY, I.P.. Efeito do tratamento preservativo de painéis compensados sobre as suas propriedades físico-mecânica. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 41, n. 100, p. 507-513, dez. 2013.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Diretrizes SINAT 005** – Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “Light Wood Framing”). Brasília: Ministério das Cidades. Secretaria Nacional da Habitação. Revisão 2. 2017.

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Sistema construtivo em Wood Frame para casas de madeira. São Paulo, SP. 2010. **Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 31, n. 2, p. 143-156, jul/dez. 2010.

PINHEIRO, R. V. Influência da preservação contra a demanda biológica em propriedades de resistência e de elasticidade da madeira. 162p. **Tese** (Doutorado em Engenharia de Estruturas) Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo. São Carlos. 2001.

SEGUNDINHO, P.G.D.A.; GONÇALVES, F.G.; GAVA, G.C.; TINTI, V.P.; ALVES, S.D.; E REGAZZI, A.J. Eficiência da colagem de madeira tratada com *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC) [Eficiência da linha de cola na madeira tratada *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de vigas laminadas coladas (glulam)]. **Revista Matéria**. 22 (2). 2017.

SILVA, G.A. A lixiviação de cobre, cromo, arsênio e boro em madeira recém tratada com preservativos hidrossolúveis, segundo parâmetros da NBR 10005:2004; 2008; Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2008.

SPOSTO, Quantificação e qualificação dos resíduos da construção civil, 2005.

TAŞÇIOĞLU C., TSUNODA, K. Biological performance of copper azole-treated wood and wood-based composites. **Holzforschung**. v. 64, n. 3, p. 399-406. 2010.

TAŞÇIOĞLU, C. AKCAY, C.; YALCIM, M.; SALHIM, H.I. Effects of post-treatment with CA and CCA on screw withdrawal resistance of wood based composites. **Wood research**. v. 59, n. 2. p. 343-350. 2014.

TAŞÇIOĞLU, C. Effects of wood preservatives in adhesive curing and changes in surface characteristics of treated wood. **Wood Research**. 52 (4),101-108, 2007.

TECVERDE. **A Tecverde tem a solução de modelo de negócio ideal para sua realidade**. Disponível em < <http://www.tecverde.com.br/para-construtores/>> Acesso em 22/09/2015. 2015.

TSOUMIS, George et al. Science and technology of wood: structure, properties, utilization. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

TUFOLO NETTO, H. Benefícios do uso da madeira de reflorestamento tratada para a construção civil. 2010. 47 p. **Monografia** (Especialização em Gestão Empresarial) – Instituto Nacional de Pós Graduação, São Paulo, 2010.

VASQUES, C.; PIZZO, L. M. B. F. **Comparativo de sistemas construtivos, convencional e Wood Frame em residências unifamiliares**. Lins-SP, Brasil. 2014.

VICK, C.B.; KUSTER, T.A. MECHANICAL INTERLOCKING OF ADHESIVE BONDS TO CCA-TREATED SOUTHERN PINE - A SCANNING ELECTRON MICROSCOPIC STUDY. **Wood and Fiber Science**. 24(1), p. 36-46, 1992.

WELLOWS, J.D. et al. Thickness loss in hot-pressed plywood. **Forest Product Journal**, Madison, V. 33, n. 1, p. 27-34, 1983.

WERNER, F.; RICHTER, K. Wooden building products in comparative LCA: A literature review. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 12(7): 470-479. 2007.

WILKINSON J.G. Industrial timber preservation. London: **The Rentokil Library/Associated Business**, 1979.

WILLERDING, A.L.; VIANEZ, B.F. Utilização de Bórax por Difusão na Preservação de Lâminas de Sumaúma (Ceiba pentandra (L.) Gaertn.). **Revista Árvore** (Impresso). 2003.

ZHANG, H.J.; GARDNER, D.J.; WANG, J.Z.; SHI, Q. Surface tension, adhesive, wettability, and bondability of artificial weathered CCA-treated southern pine. **Forest Products Journal**. 47(10): 69-72, 1997.

CAPÍTULO 2

EFEITO DOS PRODUTOS PRESERVATIVOS CCA-C E CCB NA QUALIDADE DE PAINÉIS COMPENSADOS DE *Pinus spp.*

Athanázio-Heliodoro, J.C.; Lara-Palma, H.A.; Dellaqua-Santos, G.F.; Silva, G.A.;
Ballarin, A.W.

Resumo

O compensado tem mercado potencialmente crescente devido à sua aplicação como componentes de sistemas construtivos habitacionais em madeira, comuns na América do Norte e em expansão na América do Sul, além de ser usado em pisos de carrocerias de ônibus, caminhões e trens. Nessas aplicações, devido ao contato constante com umidade, demandam uma proteção hidrorrepelente e contra organismos xilófagos que não comprometa suas demais propriedades a fim de aumentar a qualidade e durabilidade do produto. Para se avaliar a qualidade de um tratamento preservativo e garantir uma proteção eficaz são importantes uma completa penetração do produto preservativo; retenção total mínima do preservativo, determinada em função do uso da madeira por norma; além de um correto balanceamento dos ingredientes ativos presentes no produto preservativo. Por isso, buscou-se avaliar comparativamente a qualidade do tratamento com dois produtos preservativos (CCA-C e CCB) e seus efeitos no desempenho físico-mecânico de painéis de dimensões comerciais. Os compensados foram produzidos com madeira de *Pinus taeda*, com utilização de 360 g m⁻² de cola fenólica em linha dupla; sofreram uma pré-prensagem a frio e, posteriormente, prensagem a quente por 20 minutos (pressão de 1,2 MPa e temperatura de 130°C). Os painéis foram tratados sob pressão, com CCA-C e CCB pelo método de célula cheia. Os ensaios foram feitos seguindo as normas brasileiras da ABNT. A preservação dos painéis diminuiu a molhabilidade das lâminas e, portanto, o inchamento e a recuperação em espessura dos painéis. Os compensados tratados com CCA tiveram menores índices de absorção de água que aqueles tratados com CCB, apesar de ambos serem mais efetivos contra umidade que os painéis sem tratamento. Ambos os produtos afetaram a rugosidade das lâminas, sem influência na resistência ao cisalhamento dos painéis. Apesar das retenções totais terem sido semelhantes nos dois tratamentos, o tratamento com CCA apresentou um melhor desempenho no balanceamento dos ingredientes

ativos. O CCB mostrou-se um produto instável, pela tendência à precipitação do boro, com níveis de retenção desse ingrediente ativo inferiores ao proposto pelas normas.

Palavras-chave: Compensado. CCA. CCB. Propriedades físico-mecânicas. Resina fenólica.

Abstract

The plywood has a potentially growing market due to its application as components of wooden housing construction systems, common in North America and expanding in South America, in addition to being used in floors of bus bodies, trucks and trains. In these applications, due to the constant contact with humidity, they demand water-repellent protection and against xylophagous organisms that do not compromise its other properties in order to increase the quality and durability of the product. To assess the quality of a preservative treatment and ensure effective protection, complete penetration of the preservative product is important; minimum total condom retention, determined according to the use of wood as a rule; in addition to a correct balance of the active ingredients present in the preservative product. Therefore, we sought to comparatively evaluate the quality of the treatment with two preservative products (CCA-C and CCB) and their effects on the physical-mechanical performance of commercially sized panels. The plywoods were produced with *Pinus taeda* wood, using 360 g.m⁻² of phenolic glue in a double line; they underwent a cold pre-pressing and, subsequently, hot pressing for 20 minutes (pressure of 1.2 MPa and temperature of 130 ° C). The tests were carried out following the Brazilian standards of ABNT. The preservation of the panels decreased the wettability of the veneers and, therefore, the swelling and recovery in thickness of the panels. Plywood treated with CCA had lower water absorption rates than those treated with CCB, although both are more effective against moisture than untreated panels. Both products affected the roughness of the blades, with no influence on the shear strength of the panels. Although the total retentions were similar in both treatments, the CCA treatment showed a better performance in balancing the active ingredients. The CCB proved to be an unstable product, due to the tendency for boron precipitation, with retention levels of this active ingredient lower than that proposed by the standards.

Keywords: Plywood. CCA. CCB. Physical-mechanical properties. Phenolic resin.

2.1 Introdução

O compensado tem mercado crescente no Brasil devido à sua aplicação como componentes de sistemas construtivos em madeira do tipo *Wood frame*, construção habitacional comum na América do Norte e em expansão na América do Sul. É também usado em pisos de carrocerias de trens, ônibus e caminhões. Nessas duas aplicações, devido ao contato constante com umidade, demanda uma proteção hidrorrepelente e contra organismos xilófagos que não comprometa suas demais propriedades, aumentando a qualidade e durabilidade do painel (TUFOLO NETTO, 2010).

A norma brasileira NBR 15570 - Especificações técnicas para fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros (ABNT, 2008) e as diretrizes SINAT 005 - Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2017) determinam, para esses usos, o tratamento químico sob pressão dos painéis compensados, com produtos como o CCA-C ou CCB. Ambos os preservativos hidrossolúveis são compostos pelos sais cromo e cobre, responsáveis, respectivamente, pela fixação dos sais na madeira e pela inibição do desenvolvimento de fungos (DAWSON *et al.*, 1991). No CCA-C, produto mais utilizado no Brasil, o arsênio é responsável pela ação inseticida e no CCB, produto similar, porém mais lixiviável que o primeiro, o boro é responsável pela ação inseticida e fungicida (LEPAGE, 2010).

Apesar da preocupação em alguns países quanto à toxicidade dos produtos, pesquisas têm demonstrado que o cobre e o arsênio estão fortemente ligados à madeira por efeito do cromo, minimizando o perigo de contaminação ambiental (FREITAS, 2002). Após a fixação do produto, há a formação de um complexo repelente à água, o que o torna insolúvel e resistente à lixiviação (WILKINSON, 1979). Estudos mostraram que muito pouco conteúdo do arsênio (máximo de 6% do peso) foi volatilizado em painéis de madeira quando a temperatura subiu até 280°C (CUYPERS *et al.*, 2009) e que quanto maiores e mais homogêneas as partes do composto de madeira (como no caso do compensado) maior é a retenção do arsênio e do cromo na madeira (CUYPERS *et al.*, 2011).

Segundo SILVA (2008), para se avaliar a qualidade de um tratamento preservativo e garantir, portanto, uma proteção eficaz contra umidade e o ataque de organismos xilófagos são importantes: uma completa penetração do produto na madeira ou em seus subprodutos, evitando partes remanescentes, como o miolo, sem proteção; retenção

total mínima do preservativo, que é determinada em função do uso da madeira pela norma NBR 16143 - Preservação de madeiras — Sistema de categorias de uso (ABNT, 2013b), além de um correto balanceamento dos ingredientes ativos presentes no produto preservativo.

O *Wood Handbook* (IBACH, 2010) reporta que os produtos químicos como o cromo, cobre, arsênio e amônia, usados em conservantes à base de água, reagem com a madeira, sendo potencialmente prejudiciais às suas propriedades mecânicas, causando reduções significativas nessas propriedades, principalmente se os processos de secagem não forem controlados. No tratamento de painéis sob pressão, a perda de resistência provavelmente ocorre em função de uma alteração química na madeira durante o processo de fixação dos ingredientes ativos, devido ao uso de soluções ácidas ou alcalinas (BURMESTER; BECKER, 1963; EATON *et al.*, 1978; TSOUMIS, 1991; BARNES *et al.*, 1996; PINHEIRO, 2001; FERREIRA, 2017) ou, ainda, devido a alterações anatômicas promovidas no processo de vácuo-pressão (AYDIN e COLAKOGLU, 2007). Já segundo Mendes *et al.* (2013), Taşçioğlu *et al.* (2014) e Taşçioğlu e Tsunoda (2010), o tratamento sob pressão seria o causador da queda nas propriedades, e não o produto preservativo em si, devido a um inchamento excessivo e irreversível causado no autoclave.

Não foram encontrados trabalhos que avaliassem o comportamento relativo do tratamento preservativo com os dois produtos mais utilizados no Brasil (CCA-C e CCB) em painéis compensados de dimensões comerciais. Como parte de um trabalho mais amplo, que inclui diferentes alternativas de processos, produtos preservativos e adesivos para produção de painéis compensados de maior durabilidade, buscou-se neste capítulo avaliar comparativamente a qualidade do tratamento com dois produtos preservativos (CCA-C e CCB) e seus efeitos no desempenho físico-mecânico de painéis de dimensões comerciais.

Buscou-se, ainda, responder às seguintes questões:

- A penetração, a retenção e a distribuição dos ingredientes ativos são mais efetivos com o uso de algum dos produtos preservativos usados?
- Os preservativos usados influenciam no inchamento e absorção de água, encurvamento do painel, rugosidade da superfície, molhabilidade das lâminas e posterior resistência ao cisalhamento?

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Produção dos compensados

A madeira utilizada para produção dos compensados foi proveniente de plantios de *Pinus taeda*. Os painéis foram confeccionados na Indústria de Compensados Caribea, em São Manuel-SP, com sete lâminas de espessura nominal de 2,5 mm cada e dimensões comerciais, sendo 2440 mm de comprimento, 900 mm de largura para painéis tratados com CCB e 1200 mm de largura para os tratados com CCA-C, em função das larguras das autoclaves utilizadas.

Foram mantidas as variáveis do processo de fabricação usuais da indústria (Tabela 1 e Figura 1) com o uso da resina fenol-formaldeído (FF) CASCOPHEN HL-7090 HS da marca CASCO® - Hexion® com aplicação de 360 g.m⁻² (linha dupla de colagem).

Tabela 1 – Variáveis do processo de fabricação

Etapa	Variáveis		
	Pressão (MPa)	Temperatura (°C)	Tempo (min)
Pré-prensagem	6	Ambiente	10
Prensagem	12	130	20

Figura 1 –Etapas do processo de fabricação de painéis compensados: A - aplicação de cola nas lâminas; B - pré-prensagem a frio; C - prensagem a quente; D - painéis logo após a prensagem a quente



Buscando avaliar a qualidade da preservação como os produtos preservativos CCA-C e CCB e sua influência nas propriedades dos compensados, foram comparadas três situações (Tabela 2) com cinco repetições (cinco painéis) por situação.

Tabela 2 – Situações avaliadas no programa experimental

	Processo produtivo	Produto utilizado no tratamento	Tratamento
1	sem tratamento (testemunha)	-	Sem
2	no painel	CCA-C	CCA-C
3	(já prensados)	CCB-O	CCB

2.2.2 Tratamento preservativo dos painéis compensados

Os painéis foram tratados na Usina Araucária na cidade de Cunha-SP com CCA-C e CCB-O da fabricante Montana Química.

Para se alcançar uma retenção média de 6,5 kg de i.a. m^{-3} para a madeira de Pinus, considerando-se que após o tratamento sob pressão ela absorve aproximadamente 540 litros de água por metro cúbico, seria necessário utilizar um preservativo com concentração de ingredientes ativos de 0,012 kg por litro (1,2%). Contudo, para garantir uma retenção mínima (e não média) de 6,5 kg de i.a. m^{-3} , foi utilizada uma concentração maior de ingredientes ativos, de 0,018 kg por litro (1,8%).

Os tratamentos foram realizados sob pressão em autoclave pelo método de célula cheia, garantindo máxima retenção da solução. O método inclui vácuo inicial de 500 mmHg (0,066 MPa) por 30 minutos, seguido da introdução do produto preservativo diluído, pressão de 10 kgf cm^{-2} (1,0 MPa) por 60 minutos e vácuo final de 500 mmHg por 15 minutos.

Após o tratamento os painéis foram estabilizados por um período de 30 dias para fixação dos ingredientes ativos (LEPAGE; SALIS, 2015).

2.2.3 Avaliação do desempenho dos painéis e da qualidade do tratamento preservativo

O desempenho dos painéis compensados e a qualidade do tratamento preservativo foram avaliados em lâminas, corpos de prova ou nos próprios painéis. Os corpos de prova foram retirados dos painéis seguindo as prescrições da NBR 9488/2011 – Amostragem de compensado para ensaio – Procedimento (ABNT, 2011d), da NBR

9489– Condicionamento de corpos de prova de compensados para ensaios – Requisitos (ABNT, 2011e) e o plano de corte apresentado no Apêndice A.

A Tabela 3 sintetiza os ensaios e normas utilizadas.

Tabela 3 – Ensaios e normas para painéis compensados da madeira

Ensaios	Normas/metodologias	Réplicas*
Molhabilidade	Ferreira, 2017	12
Empenamento	ISO 9709/2005	1
Densidade aparente	NBR 9485 (ABNT, 2011)*	6
Teor de umidade	NBR 9484 (ABNT, 2011)*	6
Absorção e inchamento (estabilidade dimensional)	NBR 9535 (ABNT, 2011) e NBR 9486 (ABNT, 2011)	6
Qualidade da colagem / cisalhamento na linha de cola (f_v)	NBR ISO 12466-1 (ABNT, 2012a) NBR ISO 12466-2 (ABNT, 2012b)	6
Penetração e Retenção	NBR 6232 (ABNT, 2013a) e IPT 2930, revisão 11 (IPT)	5
MEV/EDS – distribuição espacial dos ingredientes ativos	Ferreira, 2017	3

* Recomendadas pelas normas.

2.2.3.1 Ensaios físicos nas lâminas, corpos de prova e painéis

A molhabilidade das lâminas foi avaliada no Laboratório de Árvores, Madeiras e Móveis - LAMM do CT-Floresta do Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT em amostras de lâminas tratadas com CCA-C e lâminas sem tratamento. Foram avaliadas quatro lâminas por tratamento e em cada uma delas, foram feitas três repetições.

A avaliação foi feita adaptando-se o procedimento analógico usado por Ferreira (2017) para um processo digital, com medição do ângulo entre gota e lâmina para comparação dos resultados com os reportados na literatura.

Foi gotejada água destilada sobre a superfície da lâmina e foi feita uma fotografia após 10 segundos de descanso usando o equipamento “*Dino-lite*” *Digital Microscope Pro*. A leitura do ângulo entre a lâmina e a gota foi feita com processamento da foto digital no *software Dino Capture 3.3.0.0* na escala de aproximação 43 (Figura 2). A medida do ângulo foi usada para comparação com os valores reportados na literatura internacional.

Figura 2 – Molhabilidade das lâminas: A – Gotejamento da água destilada sobre a lâmina; B – Fotografia digital; C – Medição dos ângulos laterais



A densidade aparente, teor de umidade, absorção e inchamento foram avaliados em corpos de prova seguindo-se as normas apresentadas na Tabela 3. A densidade aparente e o teor de umidade foram determinados após o condicionamento dos corpos de prova até o equilíbrio em câmara de climatização com 65% de umidade relativa e 21°C de temperatura.

O empenamento foi medido seguindo as recomendações adaptadas da norma ISO 9709 (ISO, 2005) utilizando uma linha esticada entre as extremidades do painel como referência para medição do desvio do painel em ambas as direções, em termos percentuais, sendo considerado encurvamento o desvio na direção paralela às fibras das capas e encanoamento o desvio na direção transversal às fibras das capas (Figura 3).

Figura 3 – Medição do empenamento nos painéis compensados



2.2.3.2 Ensaio mecânico nos corpos de prova

A qualidade da colagem foi avaliada por meio do ensaio de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento, realizado em máquina MCIS, eletromecânica, com

capacidade 5 kN (500 kgf) da EMIC-Equipamentos e Sistemas de Ensaio Ltda. Visando o uso desses painéis em ambiente externo ou ambiente submetido a alta umidade, foi tomada como referência à classe 3 da norma NBR ISO 12466-2 (ABNT, 2012). Nessa situação o teste de cisalhamento deve ser realizado em corpos de prova que receberam dois diferentes pré-tratamentos distintos: um básico e um adicional. O tratamento básico utilizado foi a imersão prévia dos corpos de prova em água fria durante 24 horas para posterior ensaio. O tratamento adicional foi o BDB – *boiling, drying, boiling*, no qual os corpos de prova passam por imersão em água em ebulição por 4 horas (*boiling*), seguido por secagem em estufa ventilada por um período de tempo de 16 a 20 horas à temperatura de $60 \pm 3^{\circ}\text{C}$ (*drying*), nova imersão por 4 horas em água em ebulição (*boiling*) e, por último, um resfriamento em água por 1 hora à temperatura inferior a 30°C (NBR ISO 12466-1; ABNT, 2012).

2.2.3.3 Penetração e retenção dos produtos preservativos

Os ensaios de penetração e de retenção dos produtos preservativos foram realizados no Laboratório de Árvores, Madeiras e Móveis – LAMM do CT-Floresta do Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT em São Paulo-SP. Para ambos os testes foram feitas repetições (corpos de prova) por painel em cinco painéis por tratamento.

O ensaio de penetração do produto preservativo seguiu as recomendações da ABNT NBR 6232 – Penetração e retenção de preservativos em madeira tratada sob pressão (ABNT, 2013a), que tem como princípio a ocorrência de reações colorimétricas na presença do produto preservativo. A leitura visual, tanto para CCA-C quanto para CCB, foi feita após aplicação manual de solução de cromoazurol-S que evidencia a penetração do cobre no compensado (Figura 4-A e B).

Os mesmos corpos de prova foram utilizados para análise da retenção do produto preservativo. Um disco de 2,5 cm de diâmetro foi retirado de cada corpo de prova para cálculo da densidade aparente após ser seco em estufa a $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ até atingir peso constante (Figura 4-C). O material foi climatizado e moído em moinho do tipo Willey na granulometria de 30 *mesh* (Figura 4-D) para extração a quente em banho maria com mistura de peróxido de hidrogênio e ácido sulfúrico (Figura 4-E). As concentrações dos elementos cobre, cromo e arsênio foram realizadas por espectrofotometria de absorção atômica, (Figura 4-F) segundo procedimento interno IPT 2930, revisão 11, que é baseado

na NBR 6232 – Penetração e retenção de preservativos em madeira tratada sob pressão (ABNT, 2013a).

Figura 4 – Análise de penetração antes e depois da aplicação do cromoazurol-S (A, B); Retirada de disco para cálculo da densidade aparente (C); Moagem do material (D); Extração a quente (E); Leitura e espectrofotômetro de chama (F)

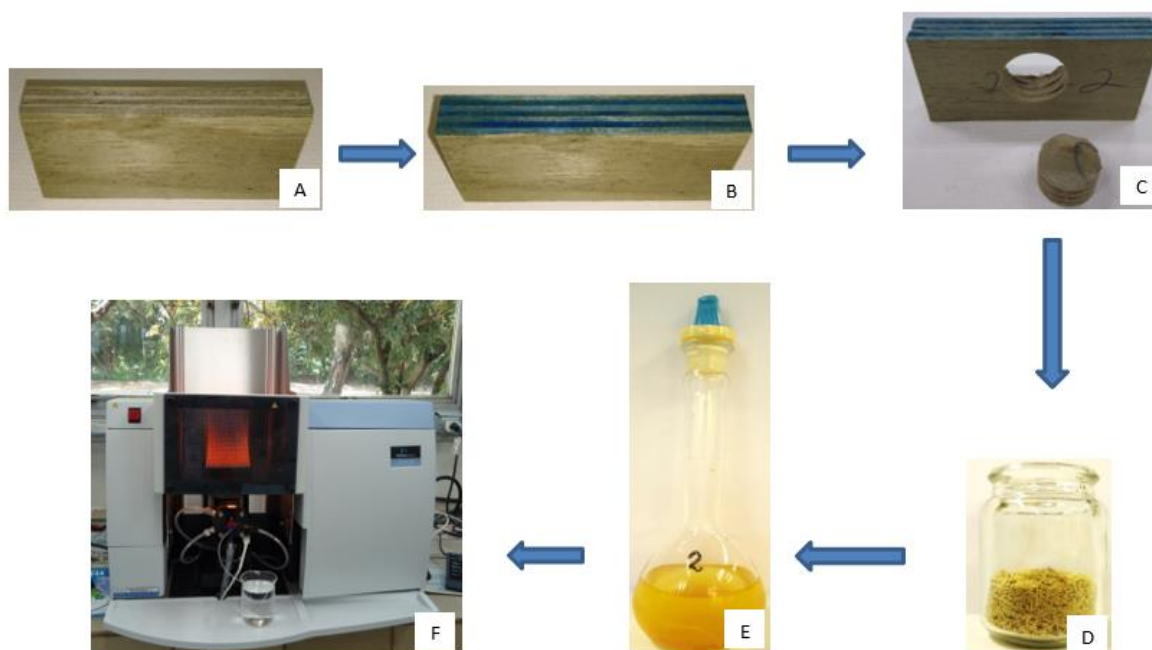


Foto: Julia C. Athanázio-Heliodoro - 2019

O balanceamento entre os ingredientes ativos dos preservativos também foi avaliado a partir dos resultados de retenção. Na avaliação desses resultados, para o tratamento com CCA-C adotaram-se os limites de balanceamento preconizados do estudo 32306 do IPT (IPT, 1994) e os da NBR 16202 - Postes de eucalipto preservado para redes de distribuição elétrica — Requisitos (ABNT, 2013c). Para o tratamento com CCB foram usados exclusivamente os limites propostos pela NBR 16202 (ABNT, 2013c).

A distribuição espacial dos princípios ativos dos preservativos foi avaliada por Microscopia Eletrônica de Varredura – Espectroscopia por Energia Dispersiva (MEV/EDS) no Laboratório de Corrosão e Proteção do Centro de Tecnologia em Metalurgia e Materiais – CTMM do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. As imagens das lâminas foram feitas com 100x de aumento e obtidas em detector de Elétrons Secundários (SE) e Retroespalhados (BSE). O equipamento utilizado foi da

marca JEOL, modelo JSM 6300. O mapa EDS de distribuição dos princípios ativos do produto preservativo foi realizado no aumento de 200x no detector da marca Thermo, modelo *Noran System SIX*. Foram feitas três repetições por tratamento para captura de imagens adequadas para avaliação em lâminas tratadas e sem tratamento usadas posteriormente para produção dos painéis.

2.2.4 Análise estatística

Os resultados dos ensaios nos corpos de prova, agrupados por painel – considerada aqui a unidade amostral - foram analisados no *Exstat* em gráficos do tipo *Box-plot*, para eliminação de possíveis *outliers*, ou seja, resultados discrepantes dos demais. A média dos resultados obtidos para cada painel após eliminação de *outliers* foi usada na análise estatística. A comparação entre as situações estudadas (Tabela 1) foi feita pelo método de *Bonferroni* ($p < 0,05$).

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Molhabilidade das lâminas

O tratamento sob pressão com ambos os preservativos – CCA-C e CCB – diminuiu o acesso de água ao interior da lâmina de madeira (Tabela 4 e Figura 5). Segundo Ferreira (2017), o cromo, componente responsável pela fixação dos ingredientes ativos do preservativo na madeira de ambos os produtos testados, distribuído na superfície das lâminas impede a infiltração da água.

Os resultados obtidos neste trabalho foram compatíveis com os obtidos por Ferreira, Campos e Silva (2017) para lâminas tratadas com CCA-C que observaram ângulo de $113,12^\circ$.

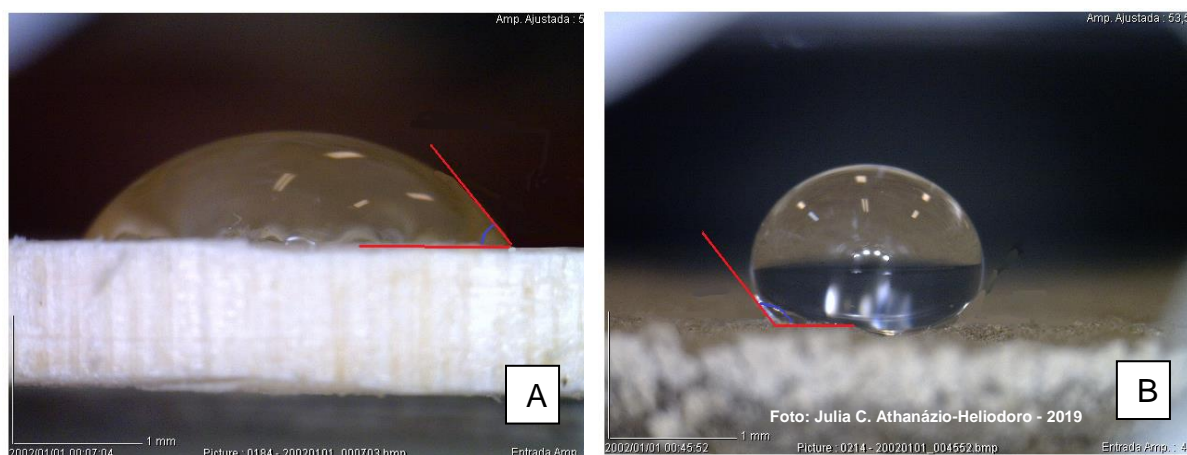
As lâminas tratadas com CCA-C também tiveram um ângulo de contato entre gota e lâmina que indicaram menor molhabilidade causada pelo acúmulo dos óxidos As, Cu e Cr nas paredes celulares. A penetração de água ao longo do tempo também foi mais lenta, indicando o desenvolvimento de uma característica higroscópica pelo complexo madeira-preservativo, explicada pela deposição de óxidos na madeira e pela presença de cera em CCAs comerciais (ZHANG *et al.*, 1997; MALDAS; KAMDEM, 1998 a e b; TAŞÇIOĞLU, 2007).

Tabela 4 – Molhabilidade (média \pm desvio-padrão) de lâminas tratadas e sem tratamento

	Molhabilidade (graus)
Testemunha	87,48 \pm 14,56 b
CCA-C	118,23 \pm 6,54 a
CCB	119,86 \pm 6,61 a

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$).

Figura 5 – Exemplo de medição do ângulo de contato de gota d'água com a superfície da lâmina no ensaio de molhabilidade. A – Lâmina sem tratamento; B – lâmina tratada



2.3.2 Distribuição espacial dos princípios ativos dos preservativos

Nos mapas de espectroscopia por energia dispersiva MEV/EDS das lâminas (Figura 6), que apresentam a distribuição dos princípios ativos dos preservativos, para os componentes do CCA-C pode ser vista uma maior uniformidade na distribuição do arsênio e maior concentração em algumas regiões para o cromo. Ambos apresentam maior distribuição que o cobre – menos visível nas imagens - é o elemento com a menor distribuição e isso é condizente com os resultados de balanceamento dos ingredientes ativos normalmente obtidos em análises químicas. O cobre pode penetrar nas regiões menos regulares das cadeias de celulose das fibras sem conseguir penetrar nas regiões cristalinas (PETTYE; PRESTON *apud* WILLIAMS *et al.*, 1991) (Figura 6). Para os componentes observáveis do CCB observa-se maior concentração de cromo, com distribuição concentrada sobretudo no parênquima radial da madeira.

É possível observar que o tratamento com CCA-C e CCB (Figura 7) influenciaram visualmente na estrutura da superfície da madeira quando comparamos com a madeira sem tratamento, indicando que o sistema vácuo-pressão ou os ingredientes ativos dos

preservativos químicos afetaram a rugosidade da superfície da lâmina. Isto poderia trazer uma vantagem à produção dos painéis após o tratamento preservativo das lâminas, pois uma maior rugosidade implica uma boa adesão mecânica entre o adesivo e a madeira, quando não há queda da molhabilidade.

Ferreira (2017) não observou alteração visual da qualidade da superfície das lâminas após tratamento, no entanto, trabalhos que trataram madeira com CCA-C concluíram que estas realmente se tornam mais rugosas, ácidas e hidrofóbicas devido à deposição dos óxidos de As, Cu e Cr tanto nas paredes celulares quanto no lúmen das células e que estão física e quimicamente ligadas aos constituintes lignocelulósicos e que a combinação entre a rugosidade causada pela deposição de óxidos metálicos na superfície da madeira com a afinidade polar destes óxidos com a resina fenólica causa uma melhor umectação da madeira e conseqüentemente, uma melhor colagem (VICK; KUSTER, 1992; MALDAS; KAMDEM, 1998 a e b; ZHANG *et al.*, 1997; TAŞÇIOĞLU, 2007).

Figura 6 – Mapas EDS (200 x de aumento) – Distribuição dos princípios ativos dos preservativos na superfície das lâminas

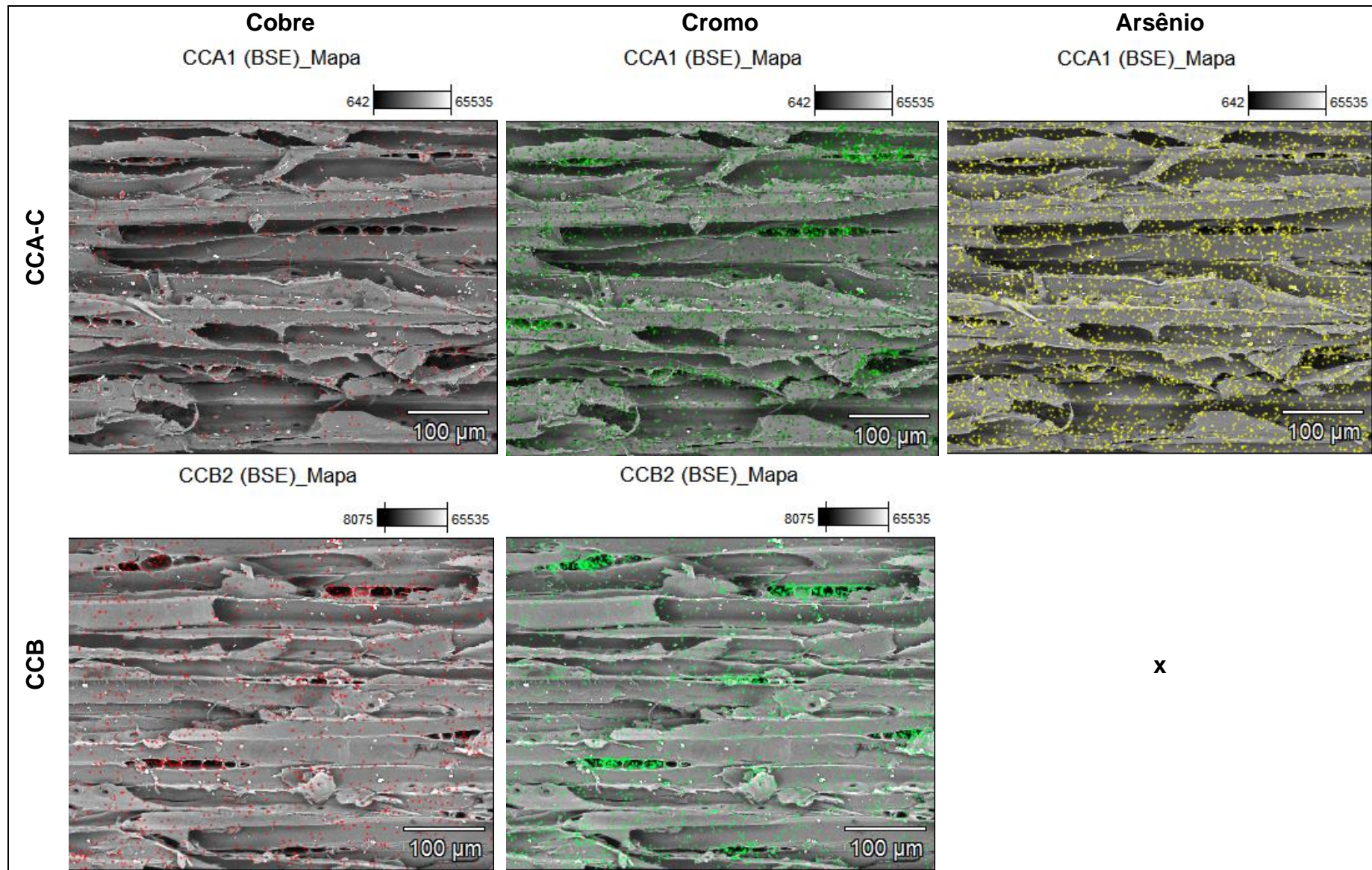
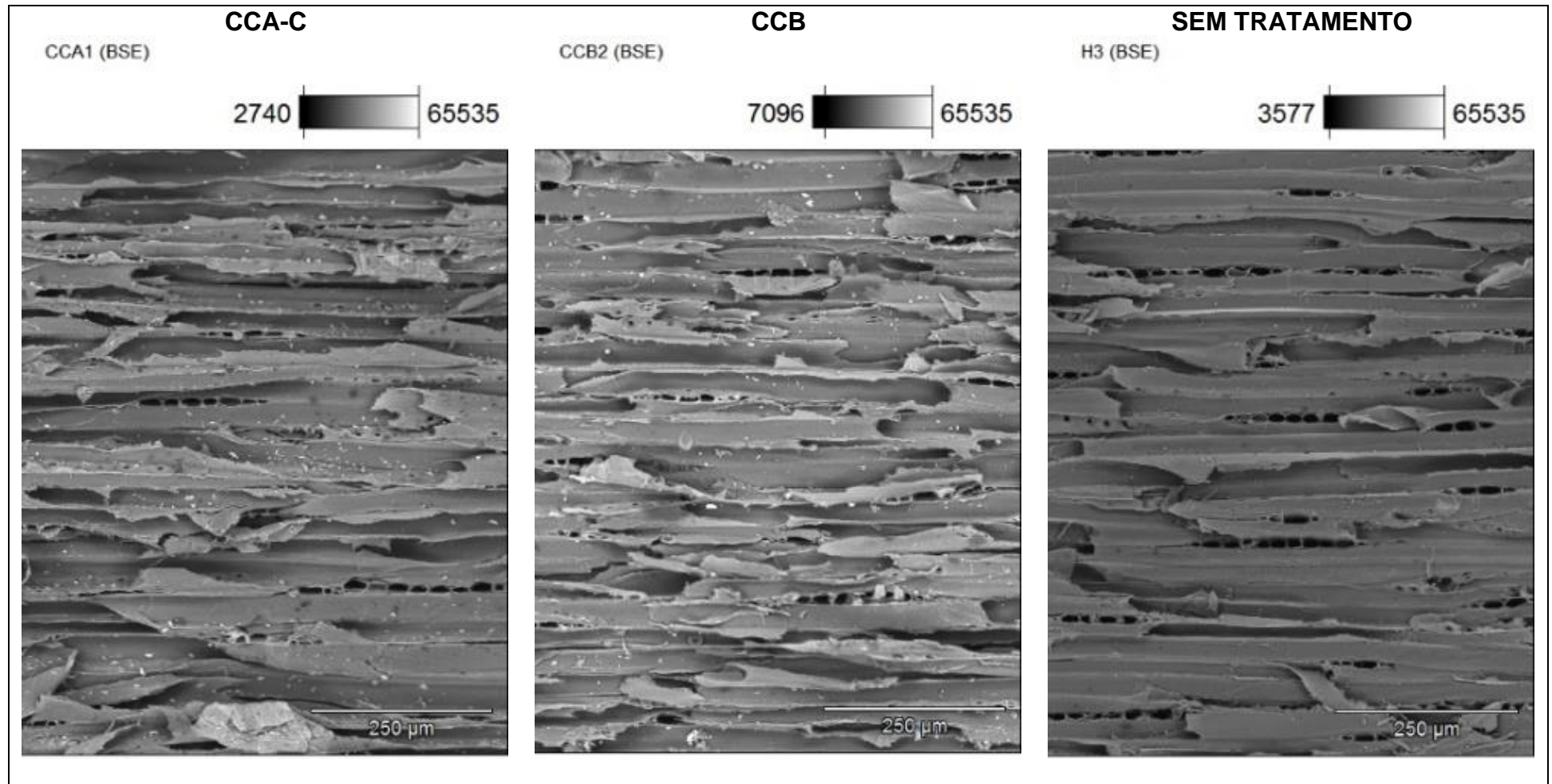


Figura 7 – Distribuição dos princípios ativos dos preservativos na superfície das lâminas por microscopia eletrônica de varredura (100 x de aumento)



2.3.3 Empenamento

Os valores apresentados na Tabela 5, indicam, que o tratamento sob pressão e o os produtos preservativos diluídos em água não influenciaram no aumento do encurvamento e do encanoamento dos painéis compensados. Para os painéis tratados o empenamento, que potencialmente ocorreria durante a secagem posterior ao tratamento sob pressão, foi provavelmente contido com o tabicamento e amarração dos painéis nessa etapa (Figura 1). O teste de empenamento, exclusivamente, foi feito com apenas cinco repetições – os painéis em dimensões comerciais – e o pequeno número de amostras pode ser responsável pelos altos valores de desvio padrão e, conseqüentemente, pela igualdade estatística encontrada, apesar dos valores médios diferentes.

Tabela 5 – Empenamento (média ± desvio-padrão) dos painéis compensados

	Encurvamento (%)	Encanoamento (%)
Testemunha	0,46 ± 0,29 a	0,78 ± 0,61 a
CCA-C	0,44 ± 0,14 a	0,92 ± 0,77 a
CCB	0,34 ± 0,31 a	0,45 ± 0,33 a

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$).

2.3.4 Umidade de equilíbrio e densidade na umidade de equilíbrio

A umidade dos painéis foi menor para aqueles que não receberam tratamento preservativo, provavelmente por não terem sido submetidos a um encharcamento em autoclave (Tabela 6). As variações de densidade observadas entre os tratamentos só podem ser atribuídas às diferentes densidades das lâminas usadas em cada tratamento, visto que as diferentes umidades de equilíbrio e as diferentes retenções seriam insuficientes para causá-las. Apesar da densidade mais baixa que as normalmente reportadas na literatura (CAMPOS *et al.*, 2009; MENDES *et al.*, 2013; FERREIRA *et al.*, 2017; MACEDO *et al.*, 2019), os valores ficaram dentro dos delimitados pelo Catálogo técnico número 1 – Compensado de Pinus (ABIMCI, 2002).

Tabela 6 – Densidade e umidade (média ± desvio-padrão)-dos painéis

	Umidade (%)	Densidade (kg m ⁻³)
Testemunha	8,18 ± 0,48 a	493,55 ± 36,66 b
CCA-C	12,41 ± 0,11 b	464,49 ± 23,88 a
CCB	13,43 ± 0,32 c	505,36 ± 23,07 b

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$).

2.3.5 Absorção e Inchamento

Os painéis tratados com CCB tiveram os menores valor de absorção de água após imersão durante 24 horas, seguido dos painéis tratados com CCA-C e depois dos painéis sem tratamento (Tabela 7).

Tabela 7 – Absorção (média ± desvio-padrão) dos painéis compensados

	Absorção (%)
Testemunha	55,54 ± 1,17 c
CCA-C	49,80 ± 1,65 b
CCB	33,84 ± 1,32 a

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$).

Comportamento semelhante foi observado para a recuperação em espessura dos painéis com menores valores para painéis tratados com CCA-C e CCB e valores, estatisticamente superiores apenas para painéis sem tratamento (Tabela 8).

Tabela 8 – Inchamento e recuperação em espessura (média ± desvio-padrão) dos painéis compensados

	Recuperação em espessura (%)	Inchamento (%)	Inchamento + Recuperação em espessura (%)
Testemunha	3,59 ± 1,22 b	6,11 ± 0,75 a	9,70 ± 1,58 a
CCA-C	0,82 ± 0,45 a	6,84 ± 0,49 a	7,66 ± 0,77 a
CCB	0,48 ± 0,13 a	6,70 ± 0,37 a	7,18 ± 0,32 a

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$).

A menor absorção dos painéis tratados (maior resistência à umidificação) está associada à menor molhabilidade das lâminas já apresentada nesses tratamentos (Tabela 4) que ocorre pela presença dos sais de CCA-C e CCB, especialmente do cromo - como foi observado na MEV (Figura 8) – depositados na superfície da lâmina

de madeira, diminuindo assim sua molhabilidade, umectação e conseqüentemente, sua capacidade de absorção de água, recuperação em espessura e inchamento. Conforme se pode observar nos itens seguintes, a maior penetração do CCB, devido à maior mobilidade do boro pode justificar a menor absorção de água observada nos painéis tratados com esse produto (KUMAR *et al.*, 1994; RAMOS *et al.*, 2006).

A recuperação em espessura é a medida da capacidade do painel em retornar à suas dimensões iniciais, depois de absorver água e inchar devido à liberação das tensões internas formadas durante a prensagem. Segundo Wellons *et al.* (1983) maiores tempos de prensagem e conseqüentemente maior compressão aplicada no painel influenciam no aumento das tensões internas e, portanto, nos valores de recuperação em espessura, assim como na quantidade de água absorvida, maior nos painéis sem a proteção do produto preservativo.

Mendes *et al.* (2013) trataram painéis compensados e obtiveram valores de inchamento entre 7,84% e 8,37% maiores que os observados em todos os tratamentos aqui estudados. Ferreira (2017) observou melhoria no inchamento em espessura de painéis tratados com CCA-C (valor médio de 7,36%) em relação aos sem tratamento. Associou a melhoria de desempenho dos painéis tratados à presença dos ingredientes ativos do CCA-C que, ao se fixarem na madeira e formarem um complexo insolúvel, diminuem a molhabilidade da sua superfície e conseqüentemente a sua capacidade de absorver água.

2.3.6 Qualidade da colagem

Não houve diferença estatística significativa entre nenhum dos três tratamentos (CCA-C, CCB e testemunha) em nenhum dos dois tipos de preparos dos corpos de prova: 24 horas em água e fervura (Tabela 9). Neste caso, não foi necessária a avaliação da porcentagem de falha na madeira, visto que todos os resultados dos ensaios de cisalhamento obtidos ficaram acima de 1 MPa (ABNT, 2012b).

Tabela 9 – Cisalhamento (média \pm desvio-padrão) dos painéis compensados

	Cisalhamento 24 horas água fria (MPa)	Cisalhamento BDB (MPa)
Testemunha	1,49 \pm 0,22 a	1,19 \pm 0,16 a
CCA-C	1,28 \pm 0,24 a	1,09 \pm 0,32 a
CCB	1,80 \pm 0,38 a	1,44 \pm 0,23 a

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$). BDB - *boiling, drying, boiling*.

Neste trabalho, o tratamento sob pressão não foi prejudicial à qualidade da colagem do painel, diferentemente do observado por Mendes *et al.* (2013) que relataram uma queda na resistência na linha de cola de até 21% entre os painéis sem tratamento (2,96 MPa) e painéis tratados com CCA (2,36 MPa) e CCB (2,33 MPa) no teste a seco; e uma queda de até 32% entre a testemunha (1,66 MPa) e os painéis tratados com água (1,23 MPa), CCA (1,12 MPa) e CCB (1,35 MPa) no teste pós-fervura.

Como os resultados reportaram as resistências após exposição dos corpos de prova à água, o ganho secundário de proteção contra a umidade (menor absorção de água) devido ao acúmulo de sais na superfície da madeira promovido pelo tratamento pode ter compensado a prejudicial exposição ao tratamento sob pressão após colagem, inerente ao tratamento preservativo desses painéis.

2.3.7 Penetração do produto preservativo

O tratamento preservativo em autoclave feito no painel compensado não foi completamente efetivo para nenhum dos produtos preservativos utilizados. Foram observadas partes dos miolos sem preservação tanto dos painéis tratados com CCA-C quanto dos painéis tratados com CCB (Figura 8) o que prejudica a preservação quando do uso em movelaria ou construção habitacional que requer corte do painel, expondo seu miolo sem penetração do produto preservativo.

Figura 8 – Penetração dos produtos preservativos. A – CCA-C e B - CCB nos painéis compensados tratados

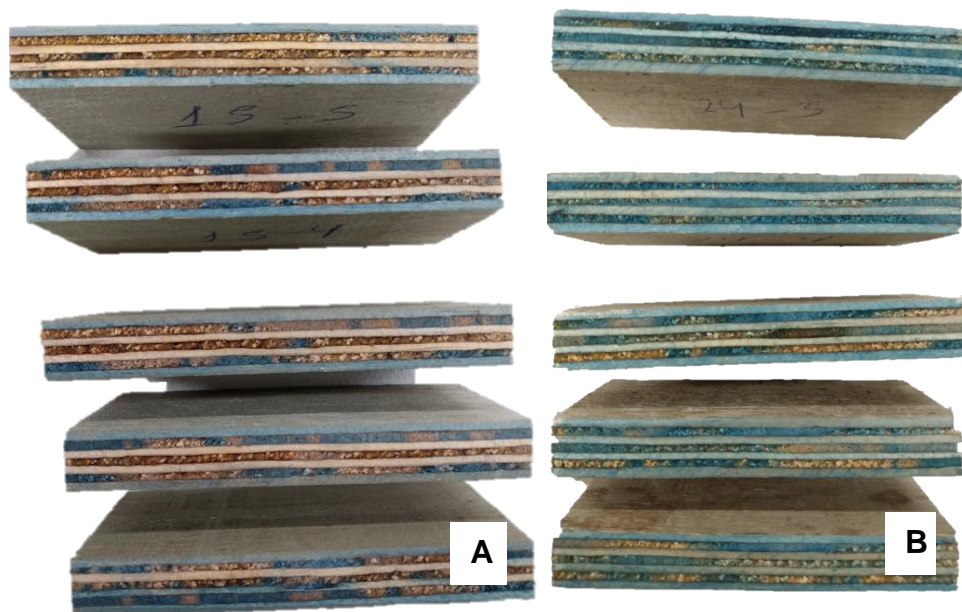


Foto: Julia C. Athanázio-Heliodoro - 2019

No entanto, há significativa vantagem no uso do CCB que mostrou penetração mais efetiva do produto preservativo no painel compensado, diferente do observado com o compensado tratado com CCA-C, provavelmente devido à maior mobilidade do boro e conseqüente facilidade de penetração desse preservativo no interior do painel (KUMAR et al., 1994; RAMOS et al., 2006).

2.3.8 Retenção do produto preservativo

Verificou-se que os tratamentos com os produtos preservativos CCA-C e CCB apresentaram retenções médias (consideradas todas as camadas do painel) de $9,52 \text{ kg m}^{-3}$ e $9,92 \text{ kg m}^{-3}$, respectivamente (Tabela 10). Como os painéis não tiveram uma penetração completa do preservativo – a linha de cola da capa e contracapa criaram uma barreira para a penetração do produto preservativo no miolo dos painéis (Figura 8) – conclui-se que a retenção nas lâminas externas foi maior que a retenção média. Os menores níveis de retenção foram $7,8$ e $9,2 \text{ kg m}^{-3}$ para CCA-C e CCB, respectivamente, atendendo ao pressuposto inicial de retenções mínimas superiores a $6,5 \text{ kg m}^{-3}$.

Segundo a NBR 16143 (ABNT, 2013b), retenções acima de $9,6 \text{ kg m}^{-3}$ permitem o uso na categoria 5, subcategoria “c” para componentes estruturais de difícil manutenção.

Tabela 10 – Retenção (média ± desvio-padrão) dos componentes dos produtos preservativos CCA-C e CCB nos painéis compensados

	Retenção CuO (kg m ⁻³)	Retenção CrO ₃ (kg m ⁻³)	Retenção As ₂ O ₅ (kg m ⁻³)	Retenção B (kg m ⁻³)	Retenção Total (kg m ⁻³)
CCA-C	1,74 ± 0,27	4,40 ± 0,51	3,38 ± 0,39	0	9,52 ± 1,16
CCB	2,44 ± 0,21	6,94 ± 0,50	0	0,54 ± 0,05	9,92 ± 0,76

O balanceamento da retenção dos ingredientes ativos nos compensados tratados com CCA-C (Tabela 11) manteve-se dentro dos limites estabelecidos pela norma NBR 16202 (ABNT, 2013c) e pelo estudo IPT 32306 (1994). Dahlgren e Hartford (1972) mencionaram que durante o mecanismo de fixação dos ingredientes ativos na madeira pode ocorrer um pequeno desbalanceamento de cobre, cromo e arsênio, que os autores atribuíram à diferença no tempo de fixação de cada um dos componentes individuais do CCA-C, mas isso não foi aqui observado.

Tabela 11 – Limites de balanceamento estabelecidos pela NBR 16202 (ABNT, 2013c) e pelo estudo IPT 32306 (IPT, 1994) para a retenção na madeira e balanceamento encontrado

	CuO (%)	CrO ₃ (%)	As ₂ O ₅ (%)
Limites IPT 32306	15,20 – 22,80	41,80 – 53,20	27,30 – 40,70
Limites ABNT NBR 16202	17,00 – 21,00	44,50 – 50,50	30,00 – 38,00
CCA-C	18,22 ± 0,87	46,26 ± 0,85	35,54 ± 0,49

Os teores dos ingredientes ativos dos painéis compensados tratados com CCB não se mantiveram dentro dos limites fixados pela NBR 16202 (ABNT, 2013c). A proporção de cromo apresentou-se acima do limite e a de boro ficou 46% abaixo do limite mínimo (Tabela 12).

Tabela 12 – Limites de balanceamento estabelecidos pela NBR 16202 (ABNT, 2013c) para a solução preservativa CCB e balanceamento encontrado nos painéis compensados (média ± desvio-padrão)

	CuO (%)	CrO ₃ (%)	B (%)
CCB	24,58 ± 0,45	69,98 ± 0,55	5,44 ± 0,23
Limites ABNT NBR 16202	24,70 – 27,30	60,30 – 66,70	10,00 – 11,00

O CCB é um produto que tende a se desbalancear facilmente, por conta da precipitação do boro, tendência essa mais comum no CCB salino do que no CCB-O (óxido) aqui empregado. O desbalanceamento é prejudicial à resistência biológica da

madeira. Uma menor retenção de boro, reduz a proteção do painel contra insetos. Esse desbalanceamento, com menor retenção do boro na madeira, implica em uma desvantagem do CCB em relação ao CCA-C, apesar de que uma reformulação do produto possa sanar essa desvantagem.

Não foi possível encontrar na literatura nacional ou internacional trabalhos que tenham estudado a retenção e balanceamento de produtos preservativos em painéis compensados. Bertolini (2011) tratou chapas de partículas com CCB e encontrou um balanceamento médio para cromo, cobre e boro de 67,7%, 26,1% e 6,3%, respectivamente, valores que, como os deste trabalho, excederam o limite superior para cromo e não atingiram o limite inferior para o boro. A manutenção dos resultados de sub-balanceamento do boro é preocupante e, se confirmada em trabalhos futuros, poderá suscitar reavaliações dos produtos pelos fabricantes.

2.4 Conclusões

Os tratamentos preservativos com CCA-C e CCB apresentaram retenções totais semelhantes. O tratamento feito com CCA apresentou um melhor desempenho, visto que o CCB se mostrou um produto instável pela tendência a precipitação do boro, com níveis de retenção desse ingrediente ativo inferiores ao proposto pelas normas, apesar de que uma reformulação do produto poderia sanar essa desvantagem.=

O uso de ambos os produtos preservativos diminuiu, igualmente, a molhabilidade das lâminas e, portanto, o inchamento e a recuperação em espessura dos painéis, porém, os compensados tratados com CCB tiveram menores índices de absorção de água que aqueles tratados com CCA, apesar de ambos apresentarem ganho na proteção contra umidade, em comparação com os painéis sem tratamento. As análises de imagens mostraram que ambos os produtos afetaram a rugosidade das lâminas o que não influenciou na resistência ao cisalhamento dos painéis.

REFERÊNCIAS

ABIMCI. Compensado de Pinus. Catálogo técnico número 1. Curitiba. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15570** - Especificações técnicas para fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16143** - Preservação de Madeiras - Sistema de categorias de uso – Requisitos. Rio de Janeiro, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16202** - Postes de eucalipto preservado para redes de distribuição. Rio de Janeiro, 2013c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6232** - Penetração e retenção de preservativos em madeira tratada sob pressão – Requisitos. Rio de Janeiro, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9484** - Compensado – determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2011a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9485** - Compensado – determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2011b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9486** - Compensado - Determinação da absorção de água – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9588** - Amostragem de compensado para ensaio – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9589** - Condicionamento de corpos-de-prova de compensados para ensaios - Procedimento. Rio de Janeiro, 2011e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9533** - Compensado – determinação da resistência à flexão estática. Rio de Janeiro, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9535** - Painéis de madeira compensada: determinação da recuperação em espessura e inchamento mais recuperação em espessura. Rio de Janeiro, 2011f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12466-1** - Madeira compensada – Qualidade de colagem Parte 1: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12466-2** - Madeira compensada – Qualidade de colagem Parte 2: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012b.

BARNES, H.M.; KHOUADJA, A.; LYON, D. E. Bending Properties of Treated **Wood Western Hemlock Plywood**. pg 2, 1996.

BERTOLINI, M.S. Emprego de resíduos de *Pinus sp* tratado com preservante CCB na produção de chapas de partículas homogêneas utilizando resina poliuretana à base de mamona. 2011. 128 f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2011.

BURMESTER, A.; BECKER, G. Investigations on the influence of wood preservatives on the strength of wood. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 21, n. 10, p. 393-409, 1963.

CUYPERS, F.; DE DOBBELAERE, C.; HARDY, A.; VAN BAEL, M. K.; HELSEN, L. Thermal behaviour of arsenic trioxide adsorbed on activated carbon. **Journal of Hazardous Materials**. 166, 2009.

CUYPERS, F.; HELSEN, L. Pyrolysis of chromated copper arsenate (CCA) treated wood waste at elevated pressure: Influence of particle size, heating rate, residence time, temperature and pressure. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 92, p. 111–122. 2011.

DAHLGREN, S.; HARTFORD, W. Kinetics and Mechanism of Fixation of Cu-Cr-As Wood Preservatives. **Holzforschung**. 26. 10.1515/hfsg.1972.26.3.105. 1972.

DAWSON B.S.W., PARKER G.F., COWAN F.J., HONG S.O. Interlaboratory determination of copper, chromium, and arsenic in timber treated with wood preservative. **Analyst**., 116:339-346, 1991.

EATON, M. L.; DRELICHARZ, J. A.; ROE JUNIOR. T The mechanical properties of preservative treated marine piles: results of limited full scale testing. **Port Hueneme: Civil Engineering Laboratory**, (Technical Note, 1535). 42 p. 1978.

FERREIRA, B. S. Avaliação do desempenho de compensados de *Pinus taeda* submetidos a tratamento térmico e químico. 2017. 106 f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

FERREIRA, B. S.; CAMPOS, C. I.; SILVA, J. V. F. Qualidade de colagem de compensados de madeira tratados com CCA. II Congresso Latinoamericano de Estructuras de madera y II Congresso Ibero-latinoamericano de la madera en la construcción. **Anais**. Junin. 2017.

FERREIRA, B.S.; SILVA, J.; DE CAMPOS, C.I. Static Bending Strength of Heat-Treated and Chromated Copper Arsenate-Treated Plywood. **BioResources**, 12(3), 6276-6282. 2017.

FREITAS, V.P. Variações na retenção de CCA-C em estacas de Pinus após 21 anos de exposição em campo de apodrecimento. Dissertação (Mestrado), Piracicaba, ESALQ-USP, 2002.

IBACH, R. E. Wood Preservation. Cap. 14. In: **Wood Handbook**. Forest Products Laboratory. 463 p. 2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. IPT 32306 - Determinação das tolerâncias de balanceamento para postes de madeira preservada: preservante CCA-C. **ABPM – Associação Brasileira de Preservadores de Madeira**. 1994.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9709:2005**. Structural timber — Visual strength grading — Basic principles. Switzerland. 2005.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. IPT 2930 – revisão 11.

KUMAR S.; SHUKLA K. S.; DEV T.; DOBRIYAL P. B. Bamboo preservation techniques: a review. International Network for Bamboo and Rattan. **Indian Council of Forestry Education**. 30p. 1994.

LEPAGE, E. S. Moq® Ox 50 (CCB-O) – preservativo sustentável com longo histórico de eficiência. Revista **Referência**. P. 80 – 83. Disponível em <<http://www.montana.com.br/Noticias/Clippings/Revista-Referencia-Segunda-Feira-20-de-Setembro-de-2010>>. Acesso em 03/10/2015. 2010.

LEPAGE, E.S.; SALIS, G.A. **Atualizações em preservação de madeiras** – curso completo. São Paulo: Editora, 64p, 2015.

MALDAS, D.C.; KAMDEM, D.P. Surface characterization of chromated copper arsenate (CCA)-treated red maple. **Journal of Adhesion Science and Technology**, 12(7), 763–772. 1998.

MALDAS, D.C.; KAMDEM, D.P. Surface tension and wettability of CCA treated red maple. **Wood and fiber Science**, 30(4), 368–373. 1998.

MENDES, R.F.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; VIDAL, J.M.; ALMEIDA, N.F.; JANKOWSKY, I.P.. Efeito do tratamento preservativo de painéis compensados sobre as suas propriedades físico-mecânica. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 41, n. 100, p. 507-513, dez. 2013.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Diretrizes SINAT 005** – Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas

delgadas (Sistemas leves tipo “Light Wood Framing”). Brasília: Ministério das Cidades. Secretaria Nacional da Habitação. Revisão 2. 2017.

PINHEIRO, R. V. Influência da preservação contra a demanda biológica em propriedades de resistência e de elasticidade da madeira. 162p. **Tese** (Doutorado em Engenharia de Estruturas) Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo. São Carlos. 2001.

RAMOS, I.E.C.; PAES, J.B.; FARIAS SOBRINHO, D.W.; SANTOS, G.J.C. Eficiência do CCB na resistência da madeira de Algaroba (*Prosopis juliflora* (Sw.) D.C.) em ensaio de apodrecimento acelerado. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.30, n.5, p.811-820, 2006.

SEGUNDINHO, P.G.D.A.; GONÇALVES, F.G.; GAVA, G.C.; TINTI, V.P.; ALVES, S.D.; E REGAZZI, A.J. Eficiência da colagem de madeira tratada com Eucalyptus cloeziana F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC) [Eficiência da linha de cola na madeira tratada Eucalyptus cloeziana F. Muell para produção de vigas laminadas coladas (glulam)]. **Revista Matéria**. 22 (2). 2017.

SILVA, G.A. A lixiviação de cobre, cromo, arsênio e boro em madeira recém tratada com preservativos hidrossolúveis, segundo parâmetros da NBR 10005:2004; 2008; Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2008.

TAŞÇIOĞLU, C. AKCAY, C.; YALCIM, M.; SALHIM, H.I. Effects of post-treatment with CA and CCA on screw withdrawal resistance of wood based composites. **Wood research**. v. 59, n. 2. p. 343-350. 2014.

TAŞÇIOĞLU, C. Effects of wood preservatives in adhesive curing and changes in surface characteristics of treated wood. **Wood Research**. 52 (4),101-108, 2007.

TSOUMIS, George et al. Science and technology of wood: structure, properties, utilization. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

TUFOLO NETTO, H. Benefícios do uso da madeira de reflorestamento tratada para a construção civil. 2010. 47 p. **Monografia** (Especialização em Gestão Empresarial) – Instituto Nacional de Pós Graduação, São Paulo, 2010.

VICK, C.B.; KUSTER, T.A. MECHANICAL INTERLOCKING OF ADHESIVE BONDS TO CCA-TREATED SOUTHERN PINE - A SCANNING ELECTRON MICROSCOPIC STUDY. **Wood and Fiber Science**. 24(1), p. 36-46, 1992.

WELLOWS, J.D. et al. Thickness loss in hot-pressed plywood. **Forest Product Journal**, Madison, V. 33, n. 1, p. 27-34, 1983.

WILKINSON J.G. Industrial timber preservation. London: **The Rentokil Library/Associated Business**, 1979.

WILLIAMS, G.R.; CORNFIELD, J.A.; ANDERSON, D.G. Waterbased fixed preservatives. In: THOMPSON, R. (Ed.) **The chemistry of wood preservation**, Cambridge: Royal Society of Chemistry, p.323, 1991.

ZHANG, H.J.; GARDNER, D.J.; WANG, J.Z.; SHI, Q. Surface tension, adhesive, wettability, and bondability of artificial weathered CCA-treated southern pine. **Forest Products Journal**. 47(10): 69-72, 1997.

CAPÍTULO 3

EFEITOS DE DIFERENTES PRÉ-TRAMENTOS DAS LÂMINAS E ADESIVOS NO DESEMPENHO MECÂNICO DE PAINÉIS COMPENSADOS

Athanázio-Heliodoro, J.C.; Lara-Palma, H.A.; Dellaqua-Santos, G.F.; Silva, G.A.;
Ballarin, A.W.

Resumo

Este trabalho, parte de um estudo mais amplo que possui o intuito de desenvolver painéis compensados de durabilidade prolongada, para uso em situações de exposição a condições adversas, compara o uso do tradicional adesivo fenólico, com o alternativo adesivo poliuretano à base de óleo de mamona que, além de hidrorrepelente, é biodegradável, não-tóxico e proveniente de fonte natural renovável e ainda dois produtos preservativos – CCA-C e CCB - aplicados nas lâminas antes da prensagem. Os dois tipos de painéis foram produzidos com madeira de *Pinus taeda* em dimensões comerciais (1220mm x 2440mm), com utilização de 360 g.m⁻² de cola em linha dupla. Os painéis colados com a resina fenólica foram pré-prensados a frio e, posteriormente, prensados a quente por 20 minutos (pressão de 1,2 MPa e temperatura de 130°C) e os painéis produzidos com resina poliuretana foram prensados diretamente por 30 minutos (pressão de 1,2 MPa e temperatura de 65°C). Os painéis prensados com a resina poliuretana tiveram os melhores resultados de absorção – 41%, seguido dos painéis tratados com CCA e CCB – 50% e 51% e dos painéis sem tratamento, prensados com a resina fenólica – 55%. A resistência ao cisalhamento foi estatisticamente igual para todos os tratamentos quando feito um pré-tratamento em água fria, variando de 1,09 MPa a 1,50 MPa e, após fervura, foi melhor para os painéis testemunha e tratados com CCA – 1,19 MPa e 1,32 MPa, seguido dos painéis tratados com CCB – 0,80 MPa. Os painéis colados com resina poliuretana não resistiram à temperatura maior que 70°C. A resistência à flexão somente variou na direção transversal, com o melhor resultado obtido para a resina poliuretana – 26,13 MPa e o pior para o tratamento com CCB 18,94. Na direção longitudinal não houve variação estatística e os resultados se mantiveram entre 34,07 MPa e 40,77 MPa.

Palavras-chave: Compensado. CCA. CCB. Propriedades físico-mecânicas. Resina fenólica. Resina poliuretana.

Abstract

This work, part of a larger study that aims to develop long-lasting plywood panels, for use in situations of exposure to adverse conditions, compares the use of the traditional phenolic adhesive, with the alternative polyurethane adhesive based on castor oil which, in addition to being water repellent, is biodegradable, non-toxic and comes from a renewable natural source. Both types of panels were produced with *Pinus taeda* wood in commercial dimensions (1220mm × 2440mm), using 360 g.m⁻² of glue in double line. The panels bonded with the phenolic resin were cold-pressed and then hot-pressed for 20 minutes (pressure of 1.2 MPa and temperature of 130 ° C) and the panels produced with polyurethane resin were directly pressed for 30 minutes. (pressure of 1.2 MPa and temperature of 65 ° C). Panels pressed with polyurethane resin had the best absorption results - 41%, followed by panels treated with CCA and CCB - 50% and 51% and untreated panels, pressed with phenolic resin - 55%. The shear strength was statistically equal for all treatments when pretreated in cold water, ranging from 1.09 MPa to 1.50 Mpa and, after boiling, it was better for the control panels and treated with CCA - 1, 19 MPa and 1.32 MPa, followed by panels treated with CCB - 0.80 MPa. The panels glued with polyurethane resin did not resist the temperature above 70oC. Flexural strength only varied in the transverse direction, with the best result obtained for polyurethane resin - 26.13 MPa and the worst for treatment with CCB 18.94. In the longitudinal direction, there was no statistical variation and the results remained between 34.07 MPa and 40.77 MPa.

Keywords: Plywood. CCA. CCB. Physical-mechanical properties. Phenolic resin. Polyurethane resin.

3.1 Introdução

Com usos reconhecidos na construção civil e indústria moveleira, o painel compensado também tem se destacado por usos específicos na indústria de ônibus, caminhões, vagões de trens e contêineres e por sua aplicação crescente como matéria-prima de construções habitacionais do tipo *Wood Frame*, sistema com mercado potencial, devido à sua qualidade, custos competitivos e rápida execução.

É essencial que painéis compensados expostos à umidade utilizem adesivo resistente e, idealmente, tenham algum tipo de proteção contra organismos xilófagos, para garantir sua maior durabilidade. A NBR ISO 12466-2 - Madeira Compensada - Qualidade de colagem (ABNT, 2012) define classes de uso em função da resistência à umidade dos painéis compensados, sendo a primeira classe aplicada em “ambientes secos”, a classe intermediária em “ambientes úmidos” e a de maior resistência para ambientes externos ou de “alta umidade”.

O adesivo utilizado nas situações de alta umidade é normalmente à base de fenol-formaldeído – FF- (FRIHART, 2013). No entanto, esse adesivo apresenta alto consumo de energia devido às altas temperaturas exigidas para a cura, pode emitir formaldeído livre (na forma de gás) durante a prensagem e nos dias seguintes a ela, o que pode causar irritações nasais, nos olhos, garganta e pele, tosse e alergias (GUPTA; ULSAMER; PREUSS, 1982; MÄKINEN; KALLIOKOSKI; KANGAS, 1999; BÖHM; SALEM; SRBA, 2012), além de ser proveniente do petróleo, uma fonte não-renovável que dificulta o descarte dos resíduos e limita o seu uso (PETERSON, 1964; SAMLAIC, 1983).

A solução convencional para proteção contra organismos xilófagos é o tratamento dos painéis compensados já prontos com produtos fungicidas e inseticidas, que após fixação na madeira, formam um composto insolúvel (WILKINSON, 1979), preservando a madeira e, indiretamente, conferindo-lhe menor absorção de água. Apesar de ser cientificamente comprovada a forte ligação desses produtos à madeira (WILKINSON, 1979; KEAR *et al.* 2008; CUYPERS *et al.*, 2009; VIDAL *et al.* 2015), diversos países, manifestando sua preocupação quanto à toxicidade, têm políticas de restrição de uso de alguns deles; além disso, o tratamento sob pressão com preservativos químicos à base de água pode causar empenamentos e redução nas propriedades mecânicas dos painéis (BURMESTER; BECKER, 1963; EATON *et al.*,

1978; TSOUMIS, 1991; VICK; KUSTER, 1992; ACKER; STEVENS, 1993; BARNES *et al.*, 1996; PINHEIRO, 2001).

Considerando-se as limitações dessas soluções convencionais de adesivos resistentes à umidade, algumas alternativas são possíveis.

O adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (*Ricinus communis*) – PU – além de ser proveniente de uma fonte natural renovável, a mamona, é biodegradável, o que facilita o descarte e não tóxico. Tem se mostrado uma alternativa viável para uso em compensados (DIAS; LAHR; ROCCO, 2004) e outros painéis de madeira (FERRO *et al.*, 2015; 2016; PEREIRA *et al.*, 2016) pois permite manuseio e prensagem à temperatura ambiente - diminuindo os custos de produção - além de ser resistente à ação dos raios ultravioleta e possuir alta resistência mecânica (JESUS, 2000; AZAMBUJA; DIAS, 2006). A resina também já foi testada em laminados usados no interior de aeronaves, com resultados superiores ao adesivo de contato tradicional (BORGES, 2015) e tem potencial para produzir painéis de alta durabilidade (resistência biológica) devido às suas propriedades antifúngicas, antimicrobianas e antibacterianas (TAKANO *et al.*, 2007; SALLES *et al.*, 2015; GAHUKAR, 2017; SUURBAAR; MOSIBIL; DONKOR, 2017; BADARO *et al.*, 2017).

Pesquisas recentes comprovaram a capacidade hidrorrepelente deste adesivo em EGP - painéis colados lateralmente (MÖLLEKEN *et al.*, 2016; MÖLLEKEN, 2017) e em painéis aglomerados (SUGAHARA, 2018; SUGAHARA *et al.*, 2019) quando comparados a painéis colados com resina fenol-formaldeído e uréia-formaldeído. Além disso, é biodegradável, não-tóxico e proveniente de fonte natural renovável (THORAT; TAYDE, 2015; DIAS; LAHR; ROCCO, 2004). Este adesivo também pode ser utilizado para outras finalidades, por apresentar boas propriedades de adesão, versatilidade química, resistência ao intemperismo e flexibilidade de formulação, além de umectar efetivamente a superfície de fibras lignocelulósicas, promovendo boa ligação entre fibras de madeira (SILVA *et al.*, 2010).

Alternativamente ao tratamento preservativo do painel compensado já pronto, tem-se o tratamento químico das lâminas usadas para produção desses compensados. Quando recebem tratamento preservativo em etapa preliminar à prensagem, as lâminas resultam com menores molhabilidade e absorção de água, provavelmente pela deposição dos ingredientes ativos que compõem os preservantes, especialmente do cromo, diminuindo a infiltração da água e inchamento em espessura

(AYDIN; COLAKOGLU, 2007; FERREIRA; CAMPOS; SILVA, 2016; FERREIRA, 2017).

Buscando produtos de alta durabilidade, neste trabalho foram avaliados o desempenho físico-mecânico e a resistência à umidade dos painéis produzidos de dois tratamentos químicos prévios das lâminas de madeira em autoclave (CCA-C e CCB) e de dois diferentes adesivos – resina fenólica – FF – e resina poliuretana – PU. O estudo apresenta como diferencial o uso de painéis de dimensões comerciais, que poderão potencializar as deformações já observadas em estudos prévios em escala laboratorial.

Busca-se, ainda, responder às seguintes questões:

- As diferentes resinas usadas influenciaram na absorção e no inchamento dos painéis?
- O uso de alguma das resinas causou delaminação ou redução do desempenho mecânico do painel?
- O tratamento feito nas lâminas, em etapa anterior à prensagem, causou delaminação ou redução do desempenho mecânico do painel?

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Produção dos compensados

A madeira utilizada para produção dos compensados foi proveniente de plantios de *Pinus taeda*. Todos os painéis compensados foram produzidos na Indústria de Compensados Caribea, na cidade de São Manuel-SP, seguindo as variáveis do processo de fabricação usuais da indústria, bem como as recomendações dos fabricantes das resinas utilizadas (Tabela 1).

Tabela 1 – Variáveis do processo de fabricação

Resina	Fabricante	Peso (g m ⁻²)	Variáveis			
			Etapa	Pressão (kgf cm ⁻²)	Temperatura (°C)	Tempo (min)
Fenólica	Hexion®	360	Pré-prensagem	6	Ambiente	10
			Prensagem	12	130	20
Poliuretana	Imperveg®	360	Prensagem	12	60	30

Os painéis foram confeccionados com sete lâminas com espessura nominal de 2,5 mm e dimensões comerciais (2440 mm de comprimento e 900 mm de largura para painéis tratados com CCB e 1200 mm de largura para os tratados com CCA-C). Foram comparadas quatro situações (Tabela 2) com cinco repetições (cinco painéis) por situação.

Tabela 2 – Situações avaliadas no programa experimental

Adesivo	Produto preservativo em autoclave aplicado na lâmina	Referência
Resina fenol-formaldeído (FF)	-	FF
	CCA- C	FF + CCA-C
	CCB-O	FF + CCB
Resina poliuretana (PU)	-	PU

Foi utilizada a resina fenol-formaldeído (FF) CASCOPHEN HL-7090 HS da marca CASCO® pertencente à Hexion® com aplicação de 360 g m⁻² (linha dupla) para colagem dos painéis produzidos com lâminas sem tratamento preservativo, bem como para colagem dos painéis produzidos com lâminas preservadas em autoclave com CCA-C e CCB. Os painéis foram pré-prensados a frio por 10 min a 6 kgf cm⁻² e prensados a quente a 12 kgf cm⁻² por 20 min a 130°C (Figura 1 e Tabela 2).

Figura 1 – Etapas do processo de fabricação: (a) aplicação de cola nas lâminas; (b) pré-prensagem a frio; (c) prensagem a quente; (d) painéis logo após a prensagem a quente



Outro lote de painéis, com lâminas sem tratamento preservativo, foi produzido com uso da resina bicomponente poliuretana (PU) à base de óleo de mamona AGT 1315 da marca IMPERVEG®. Em se tratando de um procedimento inédito para painéis com dimensões comerciais, a produção foi precedida de testes pilotos preliminares, para definição da umidade ideal das lâminas no momento da colagem e outras variáveis do processo, acompanhada pelo fabricante da resina. Por fim, os painéis foram produzidos sem pré-prensagem a frio - devido à rapidez com que o adesivo chega à sua fase de “seco ao toque”, diminuindo a capacidade de aderência entre lâminas após esse período – utilizando-se 360 g m⁻² de cola linha dupla de colagem. A prensagem foi de 30 minutos a 12 kgf cm⁻² e a uma temperatura de 60°C, menor que a usualmente empregada para resinas ureicas e fenólicas (Figura 2 e Tabela 1).

Figura 2 – Etapas do processo de fabricação de painéis compensados colados com resina poliuretana: A - Pesagem dos componentes da resina; B - Mistura dos componentes da resina; C - Aplicação manual de cola nas lâminas; D - Prensagem a quente dos painéis



3.2.2 Tratamento preservativo das lâminas

As lâminas de dois dos tratamentos foram preservadas na Usina Araucária na cidade de Cunha-SP com CCA- C e CCB-O da fabricante Montana Química.

Para se alcançar uma retenção média de 6,5 kg de i.a. m⁻³ para a madeira de Pinus, considerando-se que após o tratamento sob pressão ela absorve

aproximadamente 540 litros de água por metro cúbico, seria necessário utilizar um preservativo com concentração de ingredientes ativos de 0,012 kg por litro (1,2%). Assim, para garantir uma retenção mínima (e não média) de 6,5 kg de i.a. m⁻³, foi utilizada uma concentração maior de ingredientes ativos, de 0,018 kg por litro (1,8%).

Os tratamentos foram realizados sob pressão em autoclave pelo método de célula cheia, garantindo máxima retenção da solução. O método inclui vácuo inicial de 500 mmHg (0,066 MPa) por 30 minutos, seguido da introdução do produto preservativo diluído, pressão de 10 kgf cm⁻² (1,0 MPa) por 60 minutos e vácuo final a 500 mmHg por 15 minutos (Figura 3-A).

Figura 3 – A- Tratamento de lâminas sob pressão em autoclave na Usina Araucária; B - Umidificação das lâminas prévia ao tratamento; C - Secagem em secador industrial das lâminas preservadas



Como as lâminas apresentaram umidades entre 5% e 7% antes do tratamento sob pressão, foi necessária reumidificação prévia (Figura 3-B), aumentando a umidade para próxima do PSF – ponto de saturação das fibras – e evitando, assim, uma retenção muito elevada da solução no tratamento. Experiências anteriores já evidenciavam que uma retenção muito elevada promove a surgimento de uma camada de pó (resíduos do tratamento) sobre a lâmina, que dificulta a colagem posterior no processo de confecção do compensado, prejudicando a resistência final do produto.

Após o tratamento, as lâminas foram estabilizadas por um período de 30 dias (LEPAGE; SALIS, 2015) para fixação dos ingredientes ativos e, em seguida secadas em secador industrial (Figura 3-C) até atingirem umidade de 5% a 7%, adequada para a produção dos compensados. A secagem das lâminas é fundamental para reduzir o

teor de umidade em menor tempo e com o mínimo defeito, promovendo as condições adequadas para colagem (BALDWIN, 1995; IWAKIRI, 2005).

3.2.3 Confecção dos corpos de prova e ensaios gerais

A avaliação do desempenho dos painéis compensados foi conduzida com ensaios físicos e mecânicos, atendendo-se no geral às prescrições das normas indicadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Ensaios e normas para painéis compensados da madeira

Ensaios	Normas/metodologias	Réplicas*
Flexão estática (longitudinal e transversal - $E_{M,l}$; $E_{M,t}$; $f_{M,l}$; $f_{M,t}$)	NBR 9533 (ABNT, 2012a)	5
Qualidade da colagem / cisalhamento na linha de cola (f_v)	NBR ISO 12466-1 (ABNT, 2012b) NBR ISO 12466-2 (ABNT, 2012c)	6
Densidade aparente	NBR 9485 (ABNT, 2011c)	6
Teor de umidade	NBR 9484 (ABNT, 2011d)	6
Inchamento e absorção (estabilidade dimensional)	NBR 9535 (ABNT, 2011e) e NBR 9486 (ABNT, 2011f)	6
Empenamento	ISO 9709 (ISO, 2005)	1
Molhabilidade	(FERREIRA, 2017)	12
Penetração e Retenção	NBR 6232 (ABNT, 2013) e IPT 2930, revisão 11 (IPT, 1994)	5

Notas: $E_{M,l}$ - módulo de elasticidade à flexão longitudinal; $E_{M,t}$ - módulo de elasticidade à flexão transversal; $f_{M,l}$ - resistência à flexão longitudinal; $f_{M,t}$ - resistência à flexão transversal; f_v - tensão de ruptura. * Recomendadas por normas.

Os ensaios físicos e mecânicos foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais do Departamento de Engenharia Rural e no Laboratório de Qualidade e Painéis de Madeira do Departamento de Ciência Florestal da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP – Botucatu em corpos de prova retirados dos painéis seguindo as prescrições NBR 9488 - Amostragem de compensado para ensaio - Procedimento (ABNT, 2011) e da NBR 9489 – Condicionamento de corpos de prova de compensados para ensaios – Requisitos (ABNT, 2011), além do plano de corte apresentado no Apêndice A.

3.2.3.1 Ensaios físicos nas lâminas, corpos de prova e painéis

A densidade aparente, teor de umidade, absorção e inchamento foram avaliados em corpos de prova seguindo-se as normas apresentadas na Tabela 3. A

densidade aparente e o teor de umidade foram determinados após o condicionamento dos corpos de prova até o equilíbrio em câmara de climatização com 65% de umidade relativa e 21°C de temperatura.

O empenamento foi medido seguindo as recomendações adaptadas da norma ISO 9709 (ISO, 2005), utilizando uma linha esticada entre os extremos do painel, para medição do desvio do painel em ambas as direções, sendo considerado encurvamento o desvio na direção paralela às fibras das capas e encanoamento o desvio na direção transversal às fibras das capas (Figura 4).

Figura 4 – Ensaio de empenamento



A molhabilidade das lâminas foi avaliada no Laboratório de Árvores, Madeiras e Móveis - LAMM do CT-Floresta do Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT em amostras de lâminas tratadas com CCA-C e lâminas sem tratamento. Foram avaliadas quatro lâminas por tratamento e em cada uma delas, foram feitas três repetições.

A avaliação foi feita adaptando-se o procedimento analógico usado por Ferreira (2017) para um processo digital, com medição do ângulo entre gota e lâmina para comparação dos resultados com os reportados na literatura.

Foi gotejada água destilada sobre a superfície da lâmina e foi feita uma fotografia após 10 segundos de descanso usando o equipamento “*Dino-lite*” *Digital Microscopio Pro*. A leitura do ângulo entre a lâmina e a gota foi feita com processamento da foto digital no *software Dino Capture 3.3.0.0* na escala de

aproximação 43 (Figura 5). A medida do ângulo foi usada para comparação com os valores reportados na literatura internacional.

Figura 5 – Molhabilidade das lâminas: A - Gotejamento da água destilada sobre a lâmina; B - Fotografia digital; C - Medição dos ângulos laterais



3.2.3.2 Ensaios mecânicos nos corpos de prova

A resistência à flexão estática e módulo de elasticidade dos painéis foram avaliados tanto na direção longitudinal quanto na direção transversal e realizados na Máquina Universal de Ensaios DL 30000 MF, eletromecânica e computadorizada, fabricada pela EMIC-Equipamentos e Sistemas de Ensaio Ltda. Os corpos de prova ensaiados tiveram suas umidades medidas e os resultados de resistência à flexão estática e módulo de elasticidade corrigidos para a umidade referencial de 12%, de acordo com a NBR 7190 – Projetos de Estruturas de Madeira (ABNT, 1997).

A qualidade da colagem foi avaliada por meio do ensaio de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento, realizado em máquina MCIS, eletromecânica, com capacidade 5 kN (509,86 kgf), fabricada pela EMIC-Equipamentos e Sistemas de Ensaio Ltda. Foi tomada como referência à classe 3 da norma NBR ISO 12466-2 (ABNT, 2012), visando o uso desses painéis de madeira em ambientes externos ou de “alta umidade”. Nessa situação, o teste de cisalhamento deve ser realizado em corpos de prova que recebem dois diferentes pré-tratamentos distintos: básico e adicional. O tratamento básico utilizado foi a imersão prévia dos corpos de prova em água fria durante 24 horas para posterior ensaio. O tratamento adicional foi o BDB – *boiling, drying, boiling* – no qual os corpos de prova passam por imersão em água em ebulição por 4 horas (*boiling*), seguido por secagem em estufa ventilada por 16 a 20 horas à temperatura de 60 ± 3 °C (*drying*), nova imersão por 4 horas em água em

ebulição (*boiling*) e, por último, um resfriamento em água por 1 hora à temperatura inferior a 30 °C - NBR ISO 12466-1 (ABNT, 2012).

3.2.3.3 Penetração e retenção dos produtos preservativos

Os ensaios químicos foram realizados no Laboratório de Árvores, Madeiras e Móveis - LAMM do CT-Floresta do Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT em São Paulo-SP. Para ambos os testes foram feitas seis repetições por painel em cinco painéis por tratamento.

O ensaio de penetração do produto preservativo seguiu as recomendações da norma NBR 6232 - Penetração e retenção de preservativos em madeira tratada sob pressão (ABNT, 2013), que tem como princípio a ocorrência de reações colorimétricas na presença do produto preservativo. A leitura visual, tanto para CCA-C quanto para CCB foi feita após aplicação manual de solução de cromoazurol-S, que evidencia a penetração do cobre no compensado (Figura 6 - A, B).

Figura 6 – Sequência de operações nos ensaios de penetração e retenção do produto preservativo: Análise de penetração (A, B); Retirada de disco para cálculo da densidade aparente (C); Moagem do material (D); Extração a quente (E); Leitura e espectrofotômetro de chamas (F)

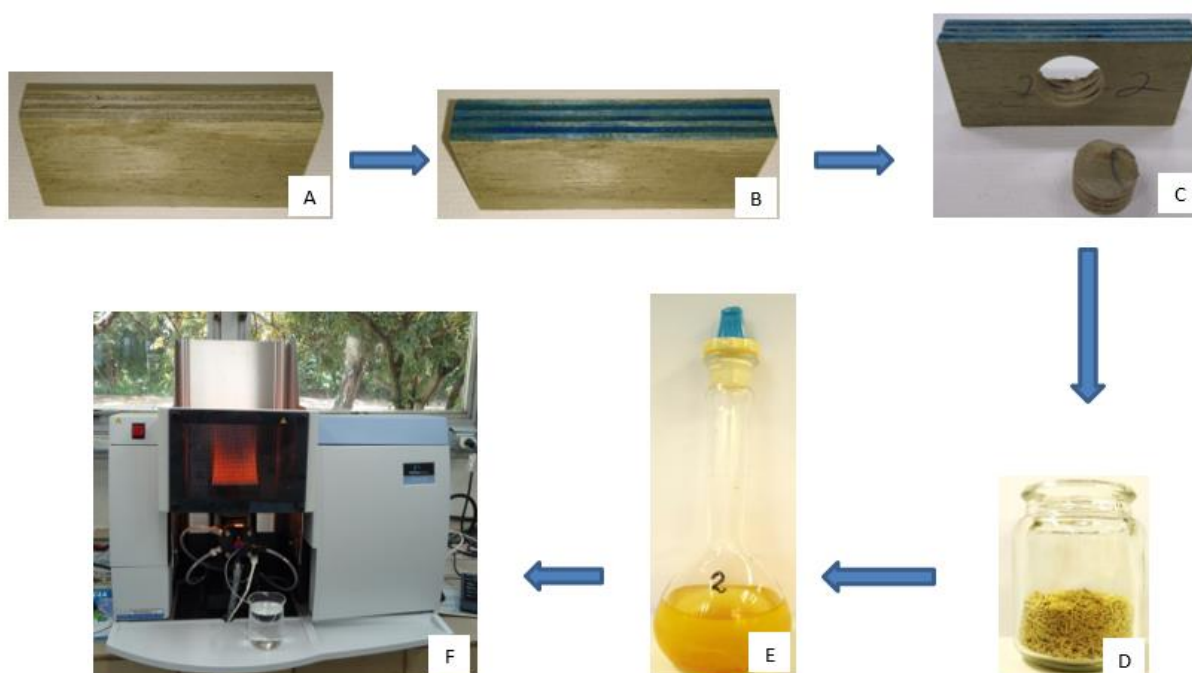


Foto: Julia C. Athanázio-Heliodoro - 2019

Os mesmos corpos de prova foram utilizados para análise da retenção do produto preservativo. Um disco de 2,5 cm de diâmetro foi retirado de cada corpo de prova para cálculo da densidade aparente após serem secos em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até atingir peso constante (Figura 6-C). O material foi climatizado e moído em moinho do tipo Willey à granulometria de 30 *mesh* (Figura 6-D) para extração a quente em banho maria com mistura de peróxido de hidrogênio e ácido sulfúrico (Figura 6-E). As concentrações dos elementos cobre, cromo e arsênio foram realizadas por espectrofotometria de absorção atômica, (Figura 6-F) segundo procedimento interno IPT 2930, revisão 11, que é baseado na norma NBR 6232 (ABNT, 2013).

3.2.4 Análise estatística

Os resultados dos ensaios nos corpos de prova, agrupados por painel – considerada aqui a unidade amostral - foram analisados no *Exstat* em gráficos do tipo *Box-plot*, para eliminação de possíveis *outliers*, ou seja, resultados discrepantes dos demais. A média dos resultados obtidos para cada painel após eliminação de *outliers* foi usada na análise estatística. A comparação entre as situações estudadas (Tabela 1) foi feita pelo método de *Bonferroni* ($p < 0,05$).

3.3 Resultados e discussão

3.3.1 Ensaios físicos

Os diferentes pré-tratamentos feitos nas lâminas antes da produção dos compensados – aqui considerados tanto os tratamentos químicos com o CCA-C e CCB quanto o uso do adesivo alternativo PU - não influenciaram de forma estatisticamente significativa na densidade e na umidade dos painéis (Tabela 4).

Todos os valores de densidade encontrados ficaram abaixo dos normalmente reportados na literatura para painéis compensados de *Pinus* spp, entre 566 e 723 kg m^{-3} (CAMPOS *et al.*, 2009; MENDES *et al.*, 2013; FERREIRA *et al.*, 2017; MACEDO *et al.*, 2019).

Apesar da densidade mais baixa que as normalmente reportadas na literatura (CAMPOS *et al.*, 2009; MENDES *et al.*, 2013; FERREIRA *et al.*, 2017; MACEDO *et al.*, 2019), os valores ficaram dentro dos delimitados pelo Catálogo técnico número 1 – Compensado de *Pinus* (ABIMCI, 2002).

Tabela 4 – Densidade e umidade (média ± desvio-padrão) dos painéis compensados

Referência	Densidade (kg m ⁻³)	Umidade (%)
FF	493,55 ± 36,66 a	8,19 ± 0,48 a
FF + CCA-C	496,27 ± 29,27 a	8,12 ± 0,52 a
FF + CCB	496,80 ± 18,01 a	8,00 ± 0,53 a
PU	499,93 ± 37,10 a	8,03 ± 0,09 a

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente (p > 0.05).

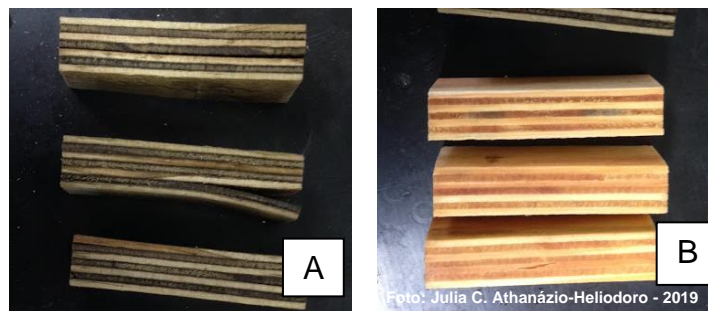
No geral, os melhores resultados nos testes de absorção de água após 24 horas de imersão em água foram obtidos nos corpos de prova dos painéis colados com resina poliuretana – PU - e os piores foram daqueles colados com resina fenólica sem tratamento químico – FF – mostrando a eficiência do adesivo alternativo para proteção do painel contra umidade (Tabela 5 e Figura 3). Alguns corpos de prova, retirados dos painéis tratados com CCA-C e CCB, sofreram delaminação após imersão em água, provavelmente devido à interação de ingredientes ativos, principalmente cobre, localizados na superfície das lâminas, diminuindo a umectação e conseqüentemente a colagem. Esses corpos de prova foram descartados. Painéis que não sofreram tratamento preservativo, não apresentaram delaminação.

Tabela 5 – Absorção, recuperação em espessura e inchamento (média ± desvio-padrão) dos painéis compensados

Referência	Absorção (%)	Recuperação em espessura (%)	Inchamento (%)	Inchamento + Recuperação espessura (%)
FF	55,54 ± 1,17 b	3,59 ± 1,22 b	6,11 ± 0,75 b	9,70 ± 1,58 b
FF + CCA-C	50,00 ± 4,03 ab	1,13 ± 0,67 a	6,02 ± 0,79 b	7,15 ± 0,73 ab
FF + CCB	51,85 ± 3,26 b	1,76 ± 0,54 ab	5,29 ± 0,50 ab	7,05 ± 0,68 a
PU	41,75 ± 5,17 a	2,47 ± 1,08 ab	3,70 ± 1,08 a	6,17 ± 0,88 a

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente (p > 0.05).

Figura 7 – Corpos de prova FF+CCA-C (A) e corpos de prova PU (B) após submissão a 24 horas em água fria para ensaio de absorção de água



Os resultados menores de absorção dos painéis colados com PU estão associados à mais forte característica hidrorrepelente desse adesivo, igualmente observada em outras pesquisas. Sugahara (2018), estudando aglomerados e Mölleken (2017) estudando painéis colados lateralmente (EGP) também obtiveram melhores resultados de absorção e inchamento com o uso da resina poliuretana. Todos os resultados de absorção encontrados neste trabalho foram menores que os reportados por Macedo *et al.* (2019) e Campos *et al.* (2009) – absorção de, respectivamente, 65% e 68% - que utilizaram resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona para prensagem dos painéis.

Os resultados de inchamento (Tabela 5) também foram melhores que os de Macedo *et al.* (2019) - 14,75% - que utilizou resina poliuretana. Também são melhores que os obtidos por Mendes *et al.* (2013) para painéis tratados com CCA-C e CCB e uso de resina fenólica – 7,84% a 8,37%. Ferreira (2017), usando tratamento prévio de lâminas com CCA-C para posterior prensagem de painéis compensados em tamanhos reduzidos, obteve inchamento de 6,87%.

Como comentado em capítulos anteriores, a recuperação em espessura é a medida da capacidade do painel em retornar à suas dimensões iniciais, depois de absorver água e inchar devido à liberação das tensões internas formadas durante a prensagem. Segundo Wellons *et al.* (1983) maiores tempos de prensagem e consequentemente maior compressão aplicada no painel influenciam no aumento das tensões internas e, portanto, nos valores de recuperação em espessura, assim como na quantidade de água absorvida, maior nos painéis sem proteção do produto preservativo ou da resina poliuretana (Tabela 5).

Apesar da pouca diferença estatística constatada para as distorções dos painéis compensados (Tabela 6), fica evidente a vantagem do uso da resina poliuretana, já que os painéis com elas produzidos tiveram as menores distorções e não manifestaram nenhuma distorção na direção transversal às fibras da capa do painel (encanoamento). O número baixo de amostras – cinco - pode ter sido responsável pelos altos valores de desvio padrão e, conseqüentemente, pela igualdade estatística encontrada, apesar dos valores médios diferentes.

Tabela 6 – Empenamento (média ± desvio-padrão)

Referência	Encurvamento (%)	Encanoamento (%)
FF	0,46 ± 0,29 a	0,78 ± 0,61 b
FF + CCA-C	0,58 ± 0,28 a	0,23 ± 0,30 ab
FF + CCB	0,66 ± 0,52 a	0,31 ± 0,33 ab
PU	0,18 ± 0,22 a	0,00 ± 0,00 a

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$).

3.3.2 Molhabilidade das lâminas

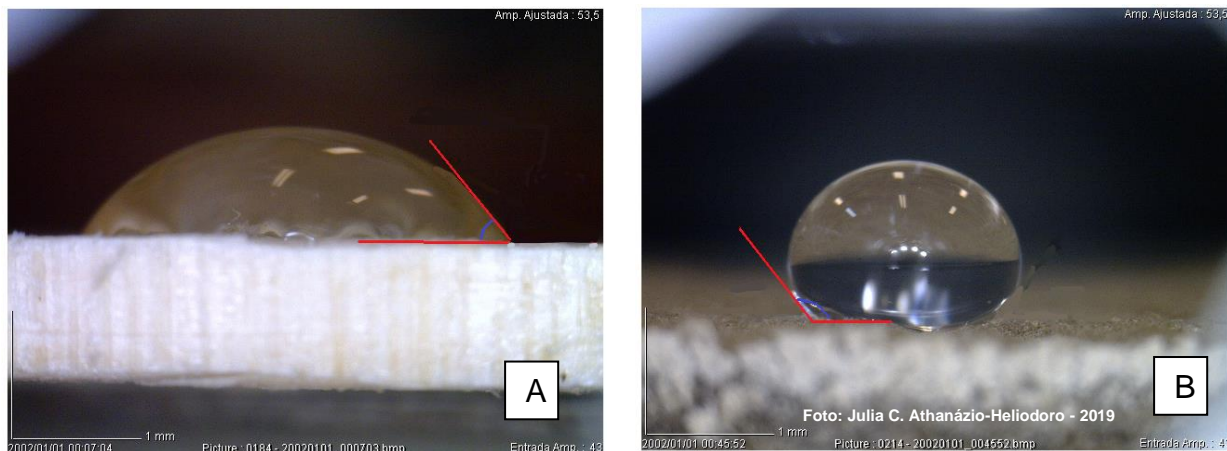
O tratamento sob pressão com os preservativos CCA-C e CCB diminuiu o acesso de água ao interior da lâmina de madeira (Tabela 7 e Figura 8).

Tabela 7 – Ensaio de molhabilidade – ângulo de contato (média ± desvio-padrão) entre gota d'água e superfície de lâminas sem tratamento, tratadas com preservativos

Referência	Ângulo (graus)
FF	87,48 ± 14,56 b
FF + CCA-C	118,23 ± 6,54 a
FF + CCB	119,86 ± 6,61 a

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$).

Figura 8 – Medição do ângulo de contato de gota d'água com a superfície da lâmina no ensaio de molhabilidade. A – Lâmina sem tratamento; B – lâmina tratada



Os resultados deste trabalho foram semelhantes aos observados por Ferreira, Campos e Silva (2016) e Ferreira (2017) que obtiveram ângulo de $113,12^\circ$ para lâminas tratadas com CCA-C. Li *et al.* (2017) obtiveram ângulos de contato entre gota d'água e lâmina com aplicação do adesivo poliuretano à base de mamona variando entre 97° e 106° . Se comparados com os valores mensurados nesta pesquisa, estariam em faixa intermediária de molhabilidade, entre os resultados FF (maior molhabilidade) e os resultados FF+CCA-O e FF+CCB (menor).

Ferreira, Campos e Silva (2016) e Ferreira (2017) atribuem a diminuição da molhabilidade das lâminas tratadas à presença do cromo, que se distribui na superfície da lâmina, impedindo uma boa interação entre a água e madeira.

Outros autores relataram que lâminas tratadas com CCA-C tiveram menor molhabilidade devido ao acúmulo dos ingredientes ativos As, Cu e Cr nas paredes celulares. A penetração de água ao longo do tempo também foi mais lenta, indicando o desenvolvimento de uma característica higroscópica pelo complexo madeira-preservativo, explicada pela deposição de óxidos na madeira e pela presença de cera em CCAs comerciais (ZHANG *et al.*, 1997; MALDAS; KAMDEM, 1998 a e b; TAŞÇIOĞLU, 2007).

3.3.3 Ensaio mecânicos

O uso de diferentes métodos de tratamentos nas lâminas - aqui considerados tanto o tratamento químico com o CCA-C e CCB quanto o uso do adesivo alternativo PU - com o intuito de conferir maior durabilidade e resistência à umidade - não foi prejudicial à resistência ao cisalhamento na linha de cola dos painéis, quando submetidos à imersão em água fria por 24 horas antes do ensaio (Tabela 8).

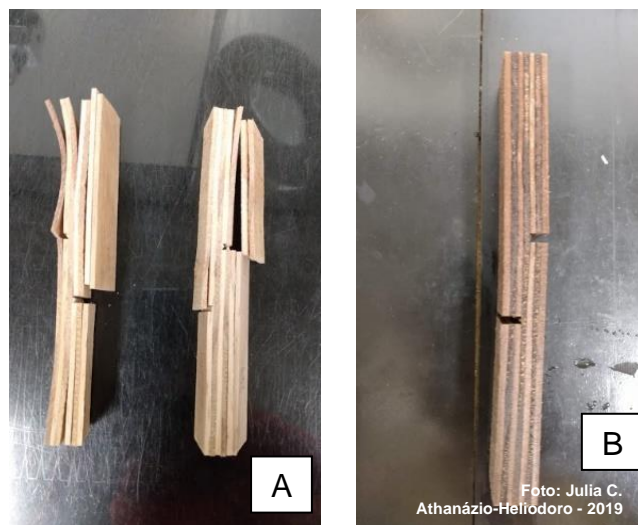
Tabela 8 – Cisalhamento na linha de cola (média ± desvio-padrão) dos painéis compensados

Referência	Cisalhamento na linha de cola (MPa)	
	Pré-tratamento em água fria – 24 horas	Pré-tratamento BDB
FF	1,49 ± 0,22 a	1,19 ± 0,16 a
FF + CCA-C	1,50 ± 0,36 a	1,32 ± 0,21 a
FF + CCB	1,09 ± 0,23 a	0,80 ± 0,16 b
PU	1,36 ± 0,26 a	----

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$). BDB - *boiling, drying, boiling*.

Quando submetidos ao pré-tratamento BDB – ciclos sucessivos de fervura, secagem e fervura - os corpos de prova de painéis FF (colados com resina fenólica e sem tratamento químico) e de painéis FF + CCA-C mantiveram aproximadamente suas resistências. Contudo, os painéis com lâminas tratadas com CCB (FF + CCB) apresentaram queda estatisticamente significativa na resistência. Esse comportamento justifica-se pelo desbalanceamento dos ingredientes ativos deste preservativo, aumentando a proporção de cromo, que se deposita na superfície da lâmina impedindo a ligação adesivo-madeira e prejudicando a qualidade da colagem. Os painéis colados com a resina poliuretana PU nem puderam ser avaliados no pré-tratamento BDB, pois a alta temperatura promoveu separação das lâminas por descolamento após o primeiro ciclo de fervura e a secagem a 60 °C em estufa (Figura 9). Segundo o fabricante, a temperatura de transição vítrea do polímero (passagem de um estado vítreo para outro “borrachoso”) é de cerca de 70°C, que caracteriza também a perda de seu efeito como adesivo.

Figura 9 –Corpos de prova produzidos com A - resina PU e B – resina fenólica e tratamento com CCA-C, após submissão a quatro horas de fervura e secagem em estufa



Segundo a norma NBR ISO 12466-1 (ABNT, 2012) é necessária a avaliação da porcentagem de falha na madeira quando os resultados dos ensaios de cisalhamento obtidos ficam abaixo de 1 MPa, como no caso dos painéis colados com resina fenólica, tratados com CCB e que receberam o pré-tratamento BDB. Neste caso, a porcentagem de falhas na madeira foi de 15%, considerada baixa. Isso pode ter ocorrido devido ao desbalanceamento na retenção do produto CCB, que aumenta a proporção de cromo, produto que se deposita em maior proporção na superfície das lâminas de madeira, e que, em níveis elevados, poderia prejudicar a penetração do adesivo na madeira e diminuir a qualidade da colagem.

O pré-tratamento das lâminas com preservativos químicos e o uso de distintos adesivos (FF e PU) no geral não promoveu alterações estatisticamente significativas na resistência e rigidez à flexão dos painéis compensados (Tabela 9). A exceção ficou na resistência à flexão na direção transversal, quando comparados os tratamentos PU (superior) e FF+CCB (inferior). Wilczak (2014) comparou painéis compensados produzidos com os tradicionais adesivos ureia formaldeído e fenol-formaldeído com painéis colados com adesivo poliuretano de mamona e os últimos apresentaram, como neste trabalho os melhores resultados nos testes de flexão estática e cisalhamento. Os resultados de resistência à flexão longitudinal deste trabalho foram superiores aos relatados por Macedo *et al.* (2019) em compensados prensados com

resina poliuretana – 32,86 MPa – e inferiores aos relatados por Ferreira (2017) e Ferreira *et al.* (2017) para compensados tratados e colados com resina fenólica – 54,61 MPa.

Os valores aqui obtidos são inferiores aos especificados como mínimos pela norma DIN 68792:2016 - Painéis destinados à formas de concreto - de 45 MPa para a resistência à flexão longitudinal e de 5000 MPa para o módulo de elasticidade.

Tabela 9 – Resistência à flexão e MOE (média ± desvio-padrão)

	Resistência (MPa)	100×MOR/ρ	MOE (MPa)
Longitudinal			
FF	40,77 ± 2,31 a	8,21 ± 0,28 a	4.541 ± 419 a
FF + CCA-C	34,07 ± 5,61 a	6,94 ± 1,10 a	4.475 ± 733 a
FF + CCB	34,98 ± 1,93 a	7,74 ± 0,52 a	4.561 ± 536 a
PU	37,61 ± 5,18 a	7,45 ± 1,02 a	4.192 ± 624 a
Transversal			
FF	24,01 ± 2,97 ab	4,85 ± 0,74 a	2.241 ± 524 a
FF + CCA-C	21,00 ± 3,24 ab	4,28 ± 0,69 a	2.200 ± 149 a
FF + CCB	18,94 ± 2,38 b	4,18 ± 0,46 a	2.053 ± 255 a
PU	26,13 ± 2,46 a	5,18 ± 0,48 a	1.942 ± 490 a

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$). 100×MOR/ρ: resistência relativa.

3.3.4 Ensaios químicos

O tratamento preservativo em autoclave feito nas lâminas antes da prensagem do painel mostrou-se efetivo para uma completa penetração dos produtos preservativos. Não foram observados gradientes de retenções entre as lâminas do miolo e das capas dos painéis. Além disso, constatou-se coloração azul mais intensa nos painéis tratados com CCB. Isso pode ter ocorrido pela maior mobilidade que o boro tem em relação ao arsênio conferindo, conseqüentemente, maior facilidade de penetração do produto no interior do painel (KUMAR *et al.*, 1994; RAMOS *et al.*, 2006).

Figura 10 – Penetração dos produtos preservativos A – CCA-C, e B - CCB nos painéis compensados tratados antes da prensagem

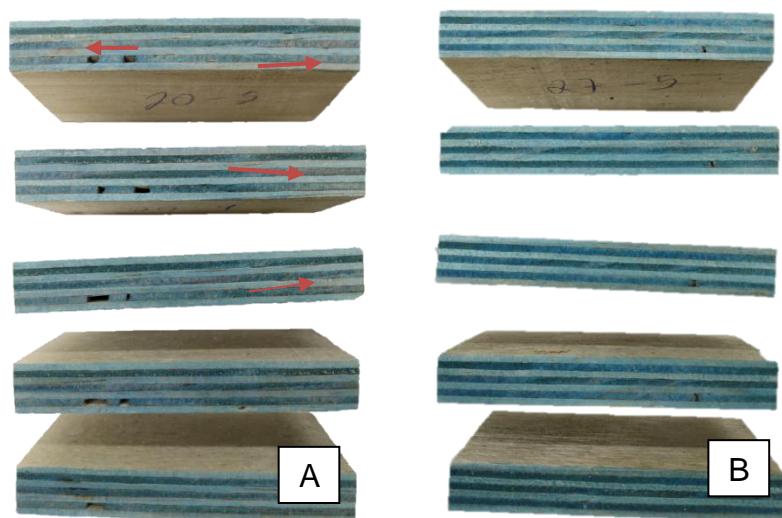


Foto: Julia C. Athanázio-Heliodoro - 2019

Os painéis foram tratados para reter no mínimo $6,5 \text{ kg m}^{-3}$ de produto preservativo, segundo a norma brasileira NBR 16143 - Preservação de madeiras — Sistema de categorias de uso (ABNT, 2013), os painéis poderiam ser usados no interior ou exterior, fora de contato com o solo, e seriam resistentes às intempéries e aos organismos xilófagos como cupins e fungos. No entanto, as análises dos painéis compensados mostraram retenções superiores às esperadas para ambos os produtos preservativos testados, motivadas pela maior concentração utilizada no momento da diluição dos preservativos antes do tratamento sob pressão (Tabela 10).

Tabela 10 – Retenção dos componentes dos produtos preservativos CCA-C e CCB feitos nas lâminas (média \pm desvio-padrão)

	Retenção CuO (kg m^{-3})	Retenção CrO ₃ (kg m^{-3})	Retenção As ₂ O ₅ (kg m^{-3})	Retenção B (kg m^{-3})	Retenção Total (kg m^{-3})
CCA-C	$2,10 \pm 0,32 \text{ b}$	$6,18 \pm 0,68 \text{ b}$	$4,50 \pm 0,58$	-	$12,78 \pm 1,58 \text{ a}$
CCB	$3,22 \pm 0,13 \text{ a}$	$8,62 \pm 0,51 \text{ a}$	-	$0,60 \pm 0,14$	$12,44 \pm 0,76 \text{ a}$

Nota: Em uma mesma coluna, médias seguidas de ao menos uma letra igual não diferem significativamente ($p > 0.05$).

Segundo a norma brasileira NBR 16143 (ABNT, 2013), retenções como as encontradas neste trabalho, próximas de $12,80 \text{ kg m}^{-3}$, permitem o uso dos compensados na categoria 5, subcategoria “c” - para componentes estruturais de

difícil manutenção - e subcategoria “e” - para componentes enterrados no solo ou em contato com água doce sujeitas à deterioração por organismos xilófagos.

O balanceamento da retenção dos ingredientes ativos nos compensados tratados com CCA-C manteve-se estatisticamente dentro dos limites estabelecidos tanto pela NBR 16202 - Postes de eucalipto preservado para redes de distribuição elétrica — Requisitos (ABNT, 2013), para a solução CCA-C quanto dos limites estabelecidos pelo estudo feito pelo IPT (1994) para a retenção na madeira (Tabela 11).

Tabela 11 – Limites de balanceamento estabelecidos pela norma NBR 16202 (ABNT, 2013) para a solução preservativa CCA-C, limites estabelecidos pelo estudo IPT 32306 (1994) para a retenção na madeira e balanceamento encontrado nos painéis compensados (média ± desvio-padrão)

	CuO (%)	CrO ₃ (%)	As ₂ O ₅ (%)
Limites IPT 32306	15,20 – 22,80	41,80 – 53,20	27,30 – 40,70
Limites ABNT NBR 16202	17,00 – 21,00	44,50 – 50,50	30,00 – 38,00
CCA-C	16,36 ± 0,55	48,42 ± 0,78	35,20 ± 0,46

Não foi encontrado estudo referencial de balanceamento de retenções de ingredientes ativos para o CCB na madeira ou seus produtos, sendo, portanto, utilizados exclusivamente os limites propostos pela NBR 16202 (ABNT, 2013) para a solução. As retenções para cada um dos sais que compõem esse produto preservativo não se mantiveram dentro dos limites fixados pela norma brasileira, para o Cr e B. A proporção de retenção de cromo foi cerca de 4% acima do limite máximo e a de Boro 52% abaixo do limite mínimo (Tabela 12).

Devido à maior mobilidade do boro e sua tendência à precipitação, o CCB é um produto que tende a desbalancear facilmente (KUMAR *et al.*, 1994; RAMOS *et al.*, 2006). O desbalanceamento é prejudicial à resistência biológica da madeira. Uma menor retenção de boro reduz a proteção do painel contra fungos e insetos.

Tabela 12 – Limites de balanceamento estabelecidos pela norma NBR 16202 (ABNT, 2013) e balanceamento encontrado nos painéis (média ± desvio-padrão)

	CuO (%)	CrO₃ (%)	B (%)
Limites ABNT NBR 16202	24,70 – 27,30	60,30 – 66,70	10,00 – 11,00
CCB	25,90 ± 0,71	69,32 ± 0,51	4,78 ± 0,89

Bertolini (2011), em estudo com chapas de partículas tratadas com CCB, obteve um balanceamento médio para cromo, cobre e boro de 67,7%, 26,1% e 6,3%, respectivamente, valores que como os deste trabalho, não respeitaram o limite superior para cromo e o inferior para o boro.

Esse desbalanceamento, com menor retenção do boro na madeira, implica em uma menor qualidade do produto CCB em relação ao CCA-C.

3.4 Conclusão

A resistência contra umidade melhorou com o tratamento preservativo das lâminas com CCA ou com CCB, mas destacaram-se os baixos índices de absorção e inchamento observados nos painéis sem tratamento algum, porém prensados com a resina poliuretana.

Os painéis colados com resina poliuretana tiveram um ótimo desempenho na estabilidade dimensional e resistência à flexão, estatisticamente iguais aos painéis prensados com a resina fenólica. Apesar desses resultados positivos, o adesivo mostrou-se instável quando submetido aos ciclos de fervura e secagem (BDB) exigidos no ensaio de resistência na linha de cola, perdendo completamente sua capacidade adesiva. O tratamento com CCB nas lâminas apresentou os piores resultados nos ensaios mecânicos, comportamento atribuído ao desbalanceamento do boro e à deposição de ingredientes ativos na superfície da lâmina, que prejudicaram a colagem. O tratamento feito nas lâminas, em etapa anterior à prensagem, não foi responsável por delaminações ou queda no desempenho mecânico no painel, e sim o pré-tratamento utilizado e o tipo de adesivo, visto que não houve diferença estatística significativa no ensaio de cisalhamento entre os quatro tratamentos quando os corpos-de-prova foram imersos em água fria, nem no ensaio de flexão longitudinal.

REFERÊNCIAS

ABIMCI. Compensado de Pinus. Catálogo técnico número 1. Curitiba. 2002.

ACKER, J. V.; STEVENS, M. Effects of various preservative treatments on the mechanical and physical properties of plywood. **Conference:** 93-05-16/21 Orlando, Florida, USA. 1993.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D-2017**. Standard method for accelerated laboratory test of natural decay resistance of woods. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v.0410, p.5, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15570** - Especificações técnicas para fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16143** - Preservação de Madeiras - Sistema de categorias de uso – Requisitos. Rio de Janeiro, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16202** - Postes de eucalipto preservado para redes de distribuição. Rio de Janeiro, 2013c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6232** - Penetração e retenção de preservativos em madeira tratada sob pressão – Requisitos. Rio de Janeiro, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190** -: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 107 p. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9484** - Compensado – determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2011a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9485** - Compensado – determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2011b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9486** - Compensado - Determinação da absorção de água – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9588** - Amostragem de compensado para ensaio – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9589** - Condicionamento de corpos-de-prova de compensados para ensaios - Procedimento. Rio de Janeiro, 2011e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9533** - Compensado – determinação da resistência à flexão estática. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9535** - Painéis de madeira compensada: determinação da recuperação em espessura e inchamento mais recuperação em espessura. Rio de Janeiro, 2011f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12466-1** - Madeira compensada – Qualidade de colagem Parte 1: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12466-2** - Madeira compensada – Qualidade de colagem Parte 2: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012b.

AYDIN, I.; COLAKOGLU, G. Variation in surface roughness, wettability and some plywood properties after preservative treatment with boron compounds. **Building and Environment**, West Lafayette, v. 42, n. 11, p. 3837-3840, 2007.

AZAMBUJA, M. A.; DIAS, A. A. Use of castor oil-based polyurethane adhesive in the production of glued laminated timber beams. **Mat. Res.**, São Carlos, v. 9, n. 3, p. 287-291, 2006.

BADARO, M.M.; SALLES, M.M.; LEITE, V.M.F.; ARRUDA, C.N.F.; OLIVEIRA, V.C.; NASCIMENTO, C.; SOUZA, R.F.; PARANHOS, H.F.O.; SILVA-LOVATO, C.H. Clinical trial for evaluation of *Ricinus communis* and sodium hypochlorite as denture cleanser. **J. Appl. Oral Sci.**, Bauru, v. 25, n. 3, p. 324-334, 2017.

BALDWIN, R. F. Plywood and veneerbased products: manufacturing practices. San Francisco: **Miller Freeman**, 388p. 1995.

BARNES, H.M.; KHOUADJA, A.; LYON, D. E. Bending Properties of Treated **Wood Western Hemlock Plywood**. pg 2, 1996.

BERTOLINI, M.S. Emprego de resíduos de *Pinus sp* tratado com preservante CCB na produção de chapas de partículas homogêneasutilizando resina poliuretana à basa de mamona. 2011. 128 f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2011.

BÖHM, M.; SALEM, M.Z.M.; SRBA, J. Formaldehyde emission monitoring from a variety of solid wood, plywood, blockboard and flooring products manufactured for building and furnishing materials. **Journal of Hazardous Materials**, 221–222, 68–79, 2012.

BORGES, A.T. Avaliação Preliminar da Aplicação de Adesivo de Poliuretano a Base de Mamona no Interior de uma Aeronave. **Tese** (Engenharia Aeronáutica Espacial). ITA. 2015.

BURMESTER, A.; BECKER, G. Investigations on the influence of wood preservatives on the strength of wood. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 21, n. 10, p. 393-409, 1963.

CAMPOS, C.I.; MORAIS, R.D.V; NASCIMENTO, M.F. Caracterização físico-mecânica de painéis de madeira compensada produzida com Pinus spp. e resina poliuretana bicomponente. **Revista Madeira arquitetura & engenharia**. N. 24. 10. 2009

CUYPERS, F.; DE DOBBELAERE, C.; HARDY, A.; VAN BAEL, M. K.; HELSEN, L. Thermal behaviour of arsenic trioxide adsorbed on activated carbon. **Journal of Hazardous Materials**. 166, 2009.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. ROCCO. Alternative castor oil-based polyurethane adhesive used in the production of plywood. **Mat. Res.**, São Carlos , v. 7, n. 3, p. 413-420, 2004.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 68792: Large area shuttering panels of veneer plywood for concrete and reinforced concrete. Berlin, 2016.

EATON, M. L.; DRELICHARZ, J. A.; ROE JUNIOR. T The mechanical properties of preservative treated marine piles: results of limited full scale testing. **Port Hueneme: Civil Engineering Laboratory**, (Technical Note, 1535). 42 p. 1978.

FERREIRA, B. S. Avaliação do desempenho de compensados de Pinus taeda submetidos a tratamento térmico e químico. 2017. 106 f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

FERREIRA, B. S.; CAMPOS, C. I.; SILVA, J. V. F. Influência do tratamento preservativo com CCA na flexão estática de compensados. **Anais**. XV EBRAMEM. Curitiba. 2016.

FERREIRA, B. S.; CAMPOS, C. I.; SILVA, J. V. F. Qualidade de colagem de compensados de madeira tratados com CCA. II Congresso Latinoamericano de Estructuras de madera y II Congresso Ibero-latinoamericano de la madera en la construcción. **Anais**. Junin. 2017.

FERREIRA, B.; SILVA, J.; DE CAMPOS, C. Static Bending Strength of Heat-Treated and Chromated Copper Arsenate-Treated Plywood. **BioResources**, 12(3), 6276-6282. 2017.

FERRO, F. S.; ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. Physical Properties of OSB Panels Manufactured with CCA and CCB Treated *Schizolobium amazonicum* and Bonded with Castor Oil Based Polyurethane Resin. **International Journal of Materials Engineering**. 6(5): 151-154. 2016.

FERRO, F. S.; ICIMOTO, F. H.; SOUZA, A. M.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. Produção de painéis de partículas orientadas (OSB) com *Schizolobium amazonicum* e resina poliuretana à base de óleo de mamona. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 106, p. 313-320, 2015.

FRIHART, R. C. **Wood Adhesion and Adhesives**. In: ROWELL, M. R. Handbook of wood chemistry and wood composites. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, Cap. 9. 2013.

GAHUKAR, R.T. A review of castor-derived products used in crop and seed protection, **Phytoparasitica**, 45: 655. 2017.

GUPTA, K.C.; ULSAMER, A.G.; PREUSS, P.W. Formaldehyde in indoor air: Sources and toxicity, **Environment International**, 8, 1–6, 349-358, 1982.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 9709:2005**. Structural timber — Visual strength grading — Basic principles. Switzerland. 2005.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. IPT 32306 - Determinação das tolerâncias de balanceamento para postes de madeira preservada: preservante CCA-C. **ABPM – Associação Brasileira de Preservadores de Madeira**. 1994.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 247 p. 2005.

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

KEAR, G., WÚ, H.-Z. E JONES, M.S. Corrosão de materiais ferrosos e à base de zinco em soluções aquosas de conservantes de madeira CCA, ACQ e CuAz, **Mater . Struct.** 41 (8), 1405-1417. 2008. doi: 10.1617 / s11527-007-9338-6

KUMAR S.; SHUKLA K. S.; DEV T.; DOBRIYAL P. B. Bamboo preservation techniques: a review. International Network for Bamboo and Rattan. **Indian Council of Forestry Education**. 30p. 1994.

LEPAGE, E.S.; SALIS, G.A. **Atualizações em preservação de madeiras** – curso completo. São Paulo: Editora, 64p, 2015.

LI, S.; XU, C.; YANG, W.; TANG, Q. Thermoplastic Polyurethanes Stemming from Castor Oil: Green Synthesis and Their Application in Wood Bonding. **Coatings**. 7(10), 159, 2017. doi:10.3390/coatings7100159.

MACEDO, L. B. DE; AQUINO, V. B. DE M.; WOLENSKI, A. R. V.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Painéis híbridos de lâminas e partículas de madeira para uso estrutural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 15-23. 2019.

- MÄKINEN, M.; KALLIOKOSKI, P.; KANGAS, J. Assessment of total exposure to phenol-formaldehyde resin glue in plywood manufacturing. **Int Arch Occup Environ Health**, 72: 309. 1999.
- MALDAS, D.C.; KAMDEM, D.P. Surface characterization of chromated copper arsenate (CCA)-treated red maple. **Journal of Adhesion Science and Technology**, 12(7), 763–772. 1998.
- MALDAS, D.C.; KAMDEM, D.P. Surface tension and wettability of CCA treated red maple. **Wood and fiber Science**, 30(4), 368–373. 1998.
- MENDES, R.F.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; VIDAL, J.M.; ALMEIDA, N.F.; JANKOWSKY, I.P.. Efeito do tratamento preservativo de painéis compensados sobre as suas propriedades físico-mecânica. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 41, n. 100, p. 507-513, dez. 2013.
- MÖLLEKEN, R E. Aplicação do adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona na obtenção de painéis de madeira colados lateralmente. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2017.
- MÖLLEKEN, R.E.; TRIANOSKI, R.; NETO, S.C.; PEREIRA, C.R.; IWAKIRI S.; AZEVEDO, E.C. Evaluation of pressing time in the production of edge glued panel with adhesive polyurethane derived from castor oil. **Appl Adhes Sci**. 4:9. 2016.
- PEREIRA, C. R.; MÖLLEKEN, R. E.; SOUZA, F. H.; CAPELLARI, G. S.; CLARO NETO, S.; AZEVEDO, E. C. Evaluation of MDF bonding with polyurethane of castor oil. **Applied Adhesion Science**. 4:13, 2016.
- PETERSON, R.W. Wood adhesives, **Forest Products Research Branch**. Ottawa, n. 1055. 1964.
- PINHEIRO, R. V. Influência da preservação contra a demanda biológica em propriedades de resistência e de elasticidade da madeira. 162p. **Tese** (Doutorado em Engenharia de Estruturas) Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo. São Carlos. 2001.
- RAMOS, I.E.C.; PAES, J.B.; FARIAS SOBRINHO, D.W.; SANTOS, G.J.C. Eficiência do CCB na resistência da madeira de Algaroba (*Prosopis juliflora* (Sw.) D.C.) em ensaio de apodrecimento acelerado. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.30, n.5, p.811-820, 2006.
- SALLES, M.M.; BADARÓ, M.M.; ARRUDA, C.N.F.; LEITE, V.M.F.; SILVA, C.H.L., WATANABE, E.; OLIVEIRA, V.C.; PARANHOS, H.F.O. Antimicrobial activity of complete denture cleanser solutions based on sodium hypochlorite and *Ricinus communis* – a randomized clinical study. **Journal of Applied Oral Science**, 23(6), 637-642. 2015.

SAMLAIC, J. Os atuais problemas e as possibilidades dos adesivos para madeira, **Revista da Madeira**, n. 374, p. 7-10. 1983.

SILVA, B. B. R.; SANTANA, R. M. C.; FORTE, M. M. C. A Solventless Castor Oil based PU adhesive for wood and foam substrates. **International Journal of adhesion and adhesives**. Porto Alegre/RS, Brazil, p. 559-565. 15 May. 2010.

SUGAHARA, E. S. Painéis aglomerados produzidos com partículas de eucalipto e bagaço de cana, com adesivos ureia formaldeído e poliuretano à base de mamona. **Tese de doutorado**. 2018.

SUGAHARA, S.E.; DA SILVA, A.M.S.; BUZO, S.C.A.; DE CAMPOS, I.C.; MORALES, M.E.; FERREIRA, S.B.; AZAMBUJA, A.M.; ROCCO LAHR, F.; CHRISTOFORO, A. High-density Particleboard Made from Agro-industrial Waste and Different Adhesives. **BioResources**, 14(3), 5162-5170. 2019.

SUURBAAR, J.; MOSOBIL, R.; DONKOR, A. Antibacterial and antifungal activities and phytochemical profile of leaf extract from different extractants of *Ricinus communis* against selected pathogens. **BMC Research Notes**, 10:660. 2017.

TAKANO, E.H.; BUSSO, C.; GOLÇALVES, E.A.L.; CHIERICE, E.O.; CATANZARO-GUIMARÃES, S.A.; CATRO-PRADO, M.A.A. Inibição do desenvolvimento de fungos fitopatogênicos por detergente derivado de óleo da mamona (*Ricinus communis*). **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 5, p. 1235-1240, 2007.

TAŞÇIOĞLU, C. Effects of wood preservatives in adhesive curing and changes in surface characteristics of treated wood. **Wood Research**. 52 (4),101-108, 2007.

THORAT, P. V.; TAYDE, S. S. A Review on Castor Oil based Polyurethane Adhesive. **International Journal of Emerging Trend in Engineering and Basic Sciences**. 2, 2, 97-102, 2015.

TSOUMIS, George et al. Science and technology of wood: structure, properties, utilization. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

VICK, C.B.; KUSTER, T.A. MECHANICAL INTERLOCKING OF ADHESIVE BONDS TO CCA-TREATED SOUTHERN PINE - A SCANNING ELECTRON MICROSCOPIC STUDY. **Wood and Fiber Science**. 24(1), p. 36-46, 1992.

VIDAL, J.M.; EVANGELISTA, W.V.; SILVA, J. D. C. E.; JANKOWSKY, I.P. Preservação de madeiras no Brasil: histórico, cenário atual e tendências [Preservação de madeira no Brasil: história, cenário atual e tendências. **Ciênc. Florest**. 25 (1), 257-271. 2015. doi: 10.1590 / 1980-509820152505257

WELLOWS, J.D. et al. Thickness loss in hot-pressed plywood. **Forest Product Journal**, Madison, V. 33, n. 1, p. 27-34, 1983.

WILCZAK, L. Avaliação do comportamento mecânico do adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado na produção de painéis compensados. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 78 f. 2014.

WILKINSON J.G. Industrial timber preservation. London: **The Rentokil Library/Associated Business**, 1979.

ZHANG, H.J.; GARDNER, D.J.; WANG, J.Z.; SHI, Q. Surface tension, adhesive, wettability, and bondability of artificial weathered CCA-treated southern pine. **Forest Products Journal**. 47(10): 69-72, 1997.

CONCLUSÕES FINAIS

Os painéis testemunha - sem tratamento e colados com a resina fenólica – tiveram, no geral, os piores resultados especialmente para propriedades físicas, mostrando a baixa proteção contra umidade que os painéis mais comuns no mercado, têm. Os painéis colados com a resina poliuretana, também sem tratamento sob pressão, no entanto, tiveram ótimos resultados para as propriedades físicas, sem prejuízo às propriedades mecânicas.

Quanto um tratamento sob pressão é feito, ficou evidente que a queda nas propriedades mecânicas da madeira se deu, não pelo tratamento sob pressão – visto que os painéis tratados com água tiveram bons resultados – mas pela interação entre madeira e ingredientes ativos, no caso do uso do CCA-C ou então, têm colagem prejudicada pelo tratamento prévio das lâminas com CCB. A escolha do produto preservativo – CCA-C ou CCB – a ser usado, depende do processo escolhido. O CCA-A teve desempenho ligeiramente melhor em painéis prensados com lâminas já tratadas enquanto que o uso do CCB pode ser prejudicial para o desempenho mecânico quando essa técnica é utilizada, devido ao seu desbalanceamento e deposição excessiva de ingredientes ativos na superfície das lâminas, fator que pode ser corrigido com uma reformulação do produto.

No entanto, o desempenho do CCB em painéis já prontos foi superior que os outros tratamentos. Além disso, ficou evidente que os painéis tratados previamente, nas lâminas, tiveram melhor retenção dos produtos preservativos com penetração mais uniforme e, para o tratamento com CCA-C, não houve prejuízo às propriedades mecânicas.

A comparação entre os processos, no capítulo 1, mostrou que o tratamento preservativo feito diretamente em painéis já prontos, além de reter uma quantidade menor de ingredientes ativos, também teve penetração desigual, evidenciando a vantagem do tratamento feito em lâminas. Além disso, esse tratamento prévio com CCA-C das lâminas não prejudicou a colagem dos painéis como esperado, apesar de aumentar a proteção do painel contra umidade, visto que apresentou menores níveis de molhabilidade, absorção e recuperação em espessura, nem houve redução no desempenho mecânico, apesar de que, em ambas as situações, a resistência dos painéis foi prejudicada pela interação química entre madeira e produto preservativo.

No capítulo 2, o tratamento feito com CCA apresentou um melhor desempenho, visto que o CCB se mostrou um produto instável pela tendência a precipitação do boro, com níveis de retenção desse ingrediente ativo inferiores ao proposto pelas normas. O uso de ambos os produtos preservativos diminuiu, igualmente, a molhabilidade das lâminas e, portanto, o inchamento e a recuperação em espessura dos painéis, porém, os compensados tratados com CCA tiveram menores índices de absorção de água que aqueles tratados com CCB, apesar de ambos apresentarem ganho na proteção contra umidade, em comparação com os painéis sem tratamento. As análises de imagens mostraram que ambos os produtos afetaram a rugosidade das lâminas o que não influenciou na resistência ao cisalhamento dos painéis.

No capítulo 3, a resistência contra umidade melhorou com o tratamento preservativo das lâminas com CCA ou com CCB, mas os menores índices de absorção e inchamento foram observados nos painéis sem tratamento algum, porém prensados com a resina poliuretana que também tiveram um melhor desempenho na estabilidade dimensional e resistência à flexão. Apesar desses resultados positivos, o adesivo mostrou-se instável quando submetido aos ciclos de fervura e secagem (BDB). O tratamento com CCB nas lâminas apresentou os piores resultados nos ensaios mecânicos, comportamento atribuído ao desbalanceamento do boro e à deposição de ingredientes ativos na superfície da lâmina, que prejudicaram a colagem. O tratamento feito nas lâminas, em etapa anterior à prensagem, não foi responsável por delaminações ou queda no desempenho mecânico no painel, e sim o pré-tratamento utilizado e o tipo de adesivo, visto que não houve diferença estatística significativa no ensaio de cisalhamento entre os quatro tratamentos quando os corpos-de-prova foram imersos em água fria, nem no ensaio de flexão longitudinal.

REFERÊNCIAS

- ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de madeira processada mecanicamente. **Compensado de Pinus. Catálogo técnico nº 1**. 2002.
- ABIMCI- Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. **Estudo setorial**. 2016
- ACKER, J. V.; STEVENS, M. Effects of various preservative treatments on the mechanical and physical properties of plywood. **Conference**: 93-05-16/21 Orlando, Florida, USA. 1993.
- AGÊNCIA CAIXA DE NOTÍCIAS. Governo autoriza expansão de construção de casas com Wood Frame. Brasil, **Sustentabilidade**. Mar de 2014. Disponível em <<http://www20.caixa.gov.br/Paginas/Noticias/Noticia/Default.aspx?newsID=428>> Acesso em 11/04/2016.
- ALMEIDA, N.F.; BORTOLLETO JUNIOR, G.; MENDES, R.F.; SUARDI, P.G. Avaliação da madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* para produção de compensados. **Scientia Forestalis**, v. 40, n.96, p. 435-443. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **CB-31: projeto de normas 31.000.05.001/1: chapas de madeira compensada**. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15570** - Especificações técnicas para fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros. Rio de Janeiro, 2009.
- AYDIN, I.; COLAKOGLU, G. Variation in surface roughness, wettability and some plywood properties after preservative treatment with boron compounds. **Building and Environment**, West Lafayette, v. 42, n. 11, p. 3837-3840, 2007.
- AYDIN, I.; COLAKOGLU, G.; COLAK, S.; DEMIRKIR, C. Effects of moisture content on formaldehyde emission and mechanical properties of plywood. **Building and Environment**. 41. 1311-1316. 2006.
- AZAMBUJA, M. A.; DIAS, A. A. Use of castor oil-based polyurethane adhesive in the production of glued laminated timber beams. **Mat. Res.**, São Carlos, v. 9, n. 3, p. 287-291, 2006.
- BADARO, M.M.; SALLES, M.M.; LEITE, V.M.F.; ARRUDA, C.N.F.; OLIVEIRA, V.C.; NASCIMENTO, C.; SOUZA, R.F.; PARANHOS, H.F.O.; SILVA-LOVATO, C.H. Clinical trial for evaluation of *Ricinus communis* and sodium hypochlorite as denture cleanser. **J. Appl. Oral Sci.**, Bauru , v. 25, n. 3, p. 324-334, 2017.
- BALLARIN, A.W.; NOGUEIRA, M. Caracterização elástica da madeira de *E. citriodora*. **Cerne**, v.9, n.1, p.66-80, 2003.

BARILLARI, C. T. Durabilidade da Madeira do Gênero Pinus Tratada com Preservativos: Avaliação em Campo de Apodrecimento. 68p. – **Dissertação** (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo. 2002.

BARNES, H.M.; KHOUADJA, A.; LYON, D. E. Bending Properties of Treated **Wood Western Hemlock Plywood**. pg 2, 1996.

BNDS. VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. Panorama de mercado: painéis de madeira. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n.40 , p. 323-384, set. 2014.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: V. N. Reinhold, 712 p. 1982.

BÖHM, M.; SALEM, M.Z.M.; SRBA, J. Formaldehyde emission monitoring from a variety of solid wood, plywood, blockboard and flooring products manufactured for building and furnishing materials. **Journal of Hazardous Materials**, 221–222, 68–79, 2012.

BORGES, A.T. Avaliação Preliminar da Aplicação de Adesivo de Poliuretano a Base de Mamona no Interior de uma Aeronave. **Tese** (Engenharia Aeronáutica Espacial). ITA. 2015.

BURMESTER, A.; BECKER, G. Investigations on the influence of wood preservatives on the strength of wood. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 21, n. 10, p. 393-409, 1963.

BURROWS, J. Canadian Wood-Frame House Construction - Rev. ed. 1948. “Third Combined Imperial/Metric Edition”. Updated to conform to the 2010 **National Building Code of Canada and enhanced by John Burrows**. 2014.

CHONG, S. Effect of moisture content on preservative retention in sawn timber. New Zealand, **Journal of Forestry Science**. V. 7, 258-261, 1977.

CUYPERS, F.; DE DOBBELAERE, C.; HARDY, A.; VAN BAEL, M. K.; HELSEN, L. Thermal behaviour of arsenic trioxide adsorbed on activated carbon. **Journal of Hazardous Materials**. 166, 2009.

CUYPERS, F.; HELSEN, L. Pyrolysis of chromated copper arsenate (CCA) treated wood waste at elevated pressure: Influence of particle size, heating rate, residence time, temperature and pressure. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 92, p. 111–122. 2011.

DAWSON B.S.W., PARKER G.F., COWAN F.J., HONG S.O. Interlaboratory determination of copper, chromium, and arsenic in timber treated with wood preservative. **Analyst**., 116:339-346, 1991.

DEN BULCKE, J. V.; DE WINDT, I.; DEFOIRDT, N.; DE SMET, J.; VAN ACKER, J. Moisture dynamics and fungal susceptibility of plywood. **International Biodeterioration & Biodegradation**, 65, 708-716. 2011.

DIAS, F.M. Aplicação de resina poliuretana à base de manona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada. **Tese** (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo. São Carlos. 116 p. 2005.

DIAS, F.M.; FIORELLI, J.; LAHR, F.A.R.; DIAS, A.A. A utilização de fibra de vidro como reforço em Madeira Compensada. **MADEIRA: arquitetura e engenharia**, n. 10, 5, 2003.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. ROCCO. Alternative castor oil-based polyurethane adhesive used in the production of plywood. **Mat. Res.**, São Carlos , v. 7, n. 3, p. 413-420, 2004.

DO MARCO, J. T.; BALLARIN, A. W.; LARA PALMA, H. A. Compensado de *Pinus taeda* L. com lâminas tratadas com CCA – Estudo preliminar. XV EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. **Anais**. Curitiba, PR, Brasil. 2015.

EATON, M. L.; DRELICHARZ, J. A.; ROE JUNIOR. T The mechanical properties of preservative treated marine piles: results of limited full scale testing. **Port Hueneme: Civil Engineering Laboratory**, (Technical Note, 1535). 42 p. 1978.

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Forestry Production and Trade**. 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Acesso em 03 de janeiro de 2020.

FERNÁNDEZ, F.G.; PALACIOS, P.; ESTEBAN, L.G.; GARCIA-IRUELA, A.; RODRIGO, B.G.; MENASALVAS, E. Prediction of MOR and MOE of structural plywood board using an artificial neural network and comparison with a multivariate regression model. **Composites Part B: Engineering**. V 43, 8, P. 3528-3533. 2012.

FERRARINI, S. F.; SANTOS, H. S.; MIRANDA, L. G.; PIRES, M. J. R.; MAIA, S. M.; AZEVEDO, C. M. N. Identificação e tratamento de resíduos provenientes de madeira tratada com arseniato de cobre cromatado. **CIDEL**. Argentina. 2010.

FERRAZ, D.B. Caracterização física e mecânica de compensado produzido com dois diferentes adesivos e duas variações de pressão de prensagem. **TCC** (Bacharelado em Engenharia industrial madeireira), Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 71 p., 2013.

FERREIRA, B. S.; CAMPOS, C. I.; SILVA, J. V. F. Influência do tratamento preservativo com CCA na flexão estática de compensados. **Anais**. XV EBRAMEM. Curitiba. 2016.

- FERREIRA, B. S.; CAMPOS, C. I.; SILVA, J. V. F. Qualidade de colagem de compensados de madeira tratados com CCA. II Congresso Latinoamericano de Estructuras de madera y II Congreso Ibero-latinoamericano de la madera en la construcción. **Anais**. Junin. 2017.
- FERREIRA, B.; SILVA, J.; DE CAMPOS, C. Static Bending Strength of Heat-Treated and Chromated Copper Arsenate-Treated Plywood. **BioResources**, 12(3), 6276-6282. 2017.
- FERRO, F. S.; ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. Physical Properties of OSB Panels Manufactured with CCA and CCB Treated *Schizolobium amazonicum* and Bonded with Castor Oil Based Polyurethane Resin. **International Journal of Materials Engineering**. 6(5): 151-154. 2016.
- FERRO, F. S.; ICIMOTO, F. H.; SOUZA, A. M.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. Produção de painéis de partículas orientadas (OSB) com *Schizolobium amazonicum* e resina poliuretana à base de óleo de mamona. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 106, p. 313-320, 2015.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY - FPL. Wood handbook—Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p. 2010.
- FRIHART, R. C. **Wood Adhesion and Adhesives**. In: ROWELL, M. R. Handbook of wood chemistry and wood composites. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, Cap. 9. 2013.
- GAHUKAR, R.T. A review of castor-derived products used in crop and seed protection, **Phytoparasitica**, 45: 655. 2017.
- GUO, A.L; COOPER, P.A. Effect of post Treatment temperature and humidity conditions on fixation performance of CCA-C treated red pine and southern pine [J]. **Journal of forestry research**, 10(3): 141–146. 1999.
- GUPTA, K.C.; ULSAMER, A.G.; PREUSS, P.W. Formaldehyde in indoor air: Sources and toxicity, **Environment International**, 8, 1–6, 349-358, 1982.
- IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Anuário Estatístico**. Ano base 2014. 64 p. 2015.
- IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório 2019**. Brasília, DF, 80 p. 2019. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 03/02/2020.
- IBACH, R. E. Wood Preservation. Cap. 14. In: **Wood Handbook**. Forest Products Laboratory. 463 p. 2010.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 247 p. 2005.

IWAKIRI, S. Painéis de madeira. Curitiba: FUPEF/Série didática no1/98, 128p. 1998.

INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION – ITTO. **Base de dados**. 2020.

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

KAKITANI, T.; HATA, T.; KAJIMOTO, T.; IMAMURA, Y. Two possible pathways for the release of arsenic during pyrolysis of chromated copper arsenate (CCA)-treated wood. *Journal of Hazardous Materials*. 113, 1–3, p. 247-252. 2004.

KEAR, G., WÚ, H.-Z. E JONES, M.S. Corrosão de materiais ferrosos e à base de zinco em soluções aquosas de conservantes de madeira CCA, ACQ e CuAz, **Mater . Struct.** 41 (8), 1405-1417. 2008. doi: 10.1617 / s11527-007-9338-6

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. Principles of wood science and technology. Berlin:Springer, 1975, 2v., 703p. 1975.

KRAL, P.; KLÍMEK, P. Plywood: Novel solutions for sustainable industrial production. **InWood: Innovations in wood materials and processes**, Czech Republic, 2015.

LARA PALMA, H. A.; DO MARCO, J. T.; BALLARIN, A. W. Propriedades físicas e mecânicas de compensados com lâminas de *Pinus taeda* L. tratadas com CCA. II Congresso Latinoamericano de Estructuras de madera y II Congresso Ibero-latinoamericano de la madera en la construcción. **Anais**. Junin. 2017.

LARA-PALMA, H.A. Tanino-formaldeído como adesivo na manufatura de painéis compensados de *Pinus elliottii engelm*. **Dissertação**. Curitiba. 94 p. 1986.

LEPAGE, E. S. Moq® Ox 50 (CCB-O) – preservativo sustentável com longo histórico de eficiência. Revista **Referência**. P. 80 – 83. Disponível em <<http://www.montana.com.br/Noticias/Clippings/Revista-Referencia-Segunda-Feira-20-de-Setembro-de-2010>>. Acesso em 03/10/2015. 2010.

LI, S.; XU, C.; YANG, W.; TANG, Q. Thermoplastic Polyurethanes Stemming from Castor Oil: Green Synthesis and Their Application in Wood Bonding. **Coatings**. 7(10), 159, 2017. doi:10.3390/coatings7100159.

LIMA, N.N.; PIO, N.S. Avaliação da gramatura de cola na propriedade de flexão estática em painéis compensados de *Copaifera duckei Dwyer* e *Eperua oleifera Ducke*. **Acta Amazonica**. v. 37(3) p. 347 – 352. 2007.

LOPES, D.J.V.; PAES, J.B.; JANKOWSKY, I.P.; SEGUNDINHO, P.G.A.; VIDAURRE, G.B. Influências do diâmetro da madeira na qualidade do tratamento preservativo. **Floresta e Ambiente**. 24, 2017.

MÄKINEN, M.; KALLIOKOSKI, P.; KANGAS, J. Assessment of total exposure to phenol-formaldehyde resin glue in plywood manufacturing. **Int Arch Occup Environ Health**, 72: 309. 1999.

MARRA, Alan A. Technology of wood bonding. Van Nostrand Reinhold, 1992.

MENDES, R. F.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; GARLET, A.; VIDAL, J. M.; ALMEIDA, N. F.; JANKOWSKY, I. P. Resistência de painéis compensados de Pinus taeda tratados com preservantes ao ataque de fungos xilófagos. **Cerne**, Lavras, 20, 1, p. 105-112. 2014.

MENDES, R.F.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; VIDAL, J.M.; ALMEIDA, N.F.; JANKOWSKY, I.P.. Efeito do tratamento preservativo de painéis compensados sobre as suas propriedades físico-mecânica. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 41, n. 100, p. 507-513, dez. 2013.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Diretrizes SINAT 005** – Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “Light Wood Framing”). Brasília: Ministério das Cidades. Secretaria Nacional da Habitação. Revisão 2. 2017.

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Sistema construtivo em Wood Frame para casas de madeira. São Paulo, SP. 2010. **Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 31, n. 2, p. 143-156, jul/dez. 2010.

MUHAMMAD-FITRI, S.; SUFFIAN, M.; WAN-MOHD-NAZRI, W.A.R.; NOR-YUZIAH, Y. Mechanical properties of plywood from Batai (*Paraserianthes falcataria*), Eucalyptus (*Eucalyptus pellita*) and Kelempayan (*Neolamarckia cadamba*) with different layer and species arrangement. **Journal of Tropical Forest Science**, Vol. 30, No. 1, pp. 58-66, 2018.

PEREIRA, C. R.; MÖLLEKEN, R. E.; SOUZA, F. H.; CAPELLARI, G. S.; CLARO NETO, S.; AZEVEDO, E. C. Evaluation of MDF bonding with polyurethane of castor oil. **Applied Adhesion Science**. 4:13, 2016.

PINHEIRO, R. V. Influência da preservação contra a demanda biológica em propriedades de resistência e de elasticidade da madeira. 162p. **Tese** (Doutorado em Engenharia de Estruturas) Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo. São Carlos. 2001.

PIZZI, A., MITTAL, K.L. **Handbook of adhesive technology**. New York: Marcell Dekker, 680p, 1994.

PORTAL BRASIL ENGENHARIA. **Wood Frame Recebe Concessão da Caixa Econômica Federal Visando o Estímulo a Novas Tecnologias**. Disponível em: <<http://www.brasilengenharia.com/portal/construcao/5666-wood-frame-recebe-concessao-dacaixa-economica-federal-visando-o-estimulo-a-novas-tecnologias>>. Acesso em 10/04/2016.

REINPRECHT, L. Fungicides for Wood Protection - World Viewpoint and Evaluation/Testing in Slovakia, **Fungicides**, Odile Carisse, InTech, 2010.

REINPRECHT, L.; KMET'OVA, L. Fungal resistance and physical–mechanical properties of beech plywood having durable veneers or fungicides in surfaces. **Eur. J. Wood Prod**, 72:433–443, 2014

REINPRECHT, L.; KMEŤOVÁ, L.; IŽDINSKÝ, J. Fungal decay and bending properties of beech plywood overlaid with tropical veneers. **Journal of Tropical Forest Science**. 24(4): 490-497, 2012.

REMADE. **Madeira preservada – Os impactos ambientais**. Disponível em <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=985&subject=Preserva%C3%A7%C3%A3o&title=Madeira%20preservada%20E2%80%93%20Os%20impactos%20ambientais> Visitado em 22/09/2015. 2006.

SALLES, M.M.; BADARÓ, M.M.; ARRUDA, C.N.F.; LEITE, V.M.F.; SILVA, C.H.L., WATANABE, E.; OLIVEIRA, V.C.; PARANHOS, H.F.O. Antimicrobial activity of complete denture cleanser solutions based on sodium hypochlorite and *Ricinus communis* – a randomized clinical study. **Journal of Applied Oral Science**, 23(6), 637-642. 2015.

SANQUETTA, C. R.; SANTANA, G. M.; SANQUETTA, M. N. I. OLIVEIRA, T. W. G.; CORTE, A. P. D. Production, import, export and apparent consumption of wood-based panels in Brazil during 1961-2016. **BIOFIX Scientific Journal**. v.5, n. 1, p. 44-49, 2020.

SEGUNDINHO, P.G.D.A.; GONÇALVES, F.G.; GAVA, G.C.; TINTI, V.P.; ALVES, S.D.; E REGAZZI, A.J. Eficiência da colagem de madeira tratada com *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC) [Eficiência da linha de cola na madeira tratada *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de vigas laminadas coladas (glulam)]. **Revista Matéria**. 22 (2). 2017.

SILVA, B.C.; VIEIRA, M.C.; OLIVEIRA, G.L.; GONÇALVES, F.C.; RODRIGUES, N.D.; LELIS, R.C.C.; IWAKIRI, S. Qualidade de Compensados Fabricados com Adesivos à Base de Tanino-formaldeído de *Pinus oocarpa* e Fenol-formaldeído. **Floresta e Ambiente**, 19(4):511-519, 2012.

SPOSTO, Quantificação e qualificação dos resíduos da construção civil, 2005.

STAMATO, G. C.; CALIL JUNIOR, C. Resistência ao Embutimento da Madeira Compensada. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 18, p. 49-76, 2002.

SUURBAAR, J.; MOSOBIL, R.; DONKOR, A. Antibacterial and antifungal activities and phytochemical profile of leaf extract from different extractants of *Ricinus communis* against selected pathogens. **BMC Research Notes**, 10:660. 2017.

TAKANO, E.H.; BUSSO, C.; GOLÇALVES, E.A.L.; CHIERICE, E.O.; CATANZAROGUIMARÃES, S.A.; CATRO-PRADO, M.A.A. Inibição do desenvolvimento de fungos fitopatogênicos por detergente derivado de óleo da mamona (*Ricinus communis*). **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 5, p. 1235-1240, 2007.

TAŞÇIOĞLU C., TSUNODA, K. Biological performance of copper azole-treated wood and wood-based composites. **Holzforschung**. v. 64, n. 3, p. 399-406. 2010.

TAŞÇIOĞLU, C. AKCAY, C.; YALCIM, M.; SALHIM, H.I. Effects of post-treatment with CA and CCA on screw withdrawal resistance of wood based composites. **Wood research**. v. 59, n. 2. p. 343-350. 2014.

TASCIOGLU, C.; TSUNODA, K. Retention of copper azole and alkaline copper quat in wood-based composites post-treated by vacuum impregnation, **Wood Research**, 57, 101-110. 2012.

TECVERDE. **A Tecverde tem a solução de modelo de negócio ideal para sua realidade**. Disponível em < <http://www.tecverde.com.br/para-construtores/>> Acesso em 22/09/2015. 2015.

THORAT, P. V.; TAYDE, S. S. A Review on Castor Oil based Polyurethane Adhesive. **International Journal of Emerging Trend in Engineering and Basic Sciences**. 2, 2, 97-102, 2015.

TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S. Pure and decorative plywood panels from *Cordia trichotoma* and *Grevillea robusta*. **Floresta e Ambiente**. 25 (3), 2018.

TSOUMIS, George et al. Science and technology of wood: structure, properties, utilization. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

TUFOLO NETTO, H. A indústria da madeira preservada sob pressão no Brasil. **Revista Referência**, 88 ed., fev., 6 p, 2009.

TUFOLO NETTO, H. Benefícios do uso da madeira de reflorestamento tratada para a construção civil. 2010. 47 p. **Monografia** (Especialização em Gestão Empresarial) – Instituto Nacional de Pós Graduação, São Paulo, 2010.

TUFOLO NETTO, H.; GAIANE, J. H.; CARLOS, V. J. Uso de compensados de madeira tratada a pressão, no Brasil. **Anais**. II Encontro Brasileiro em preservação de madeiras. 1986.

USTA, I. The effect of moisture content and wood density on the preservative uptake of Caucasian fir (*Abies nordmanniana* (Link.) Spach.) treated with CCA. **Turk J Agric For**. 28, 1-7, 2004.

VASQUES, C.; PIZZO, L. M. B. F. **Comparativo de sistemas construtivos, convencional e Wood Frame em residências unifamiliares**. Lins-SP, Brasil. 2014.

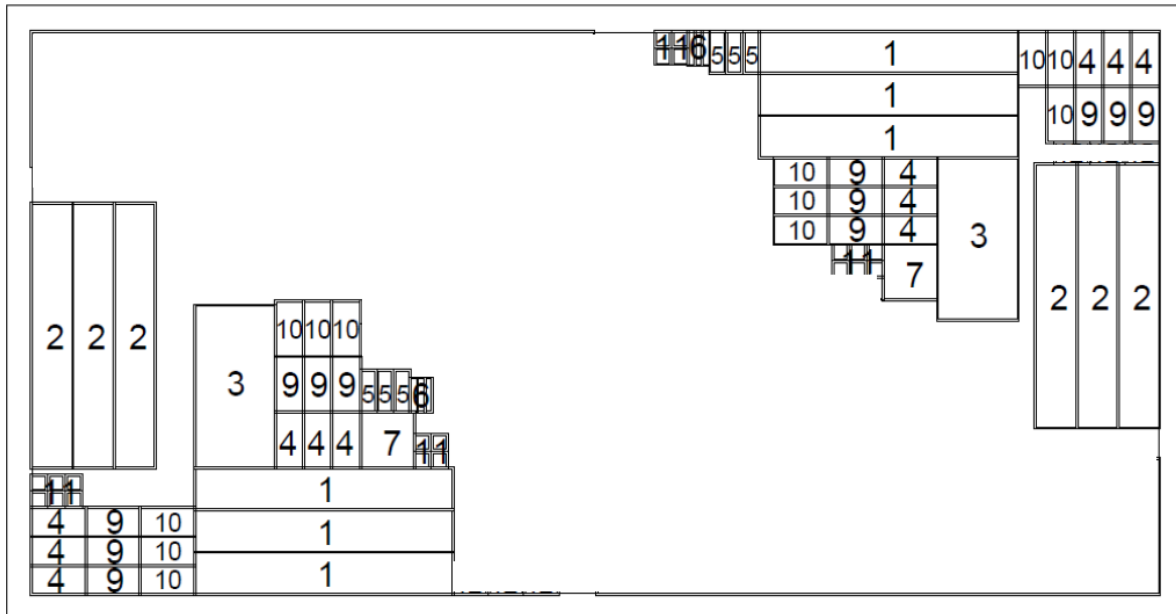
VICK, C.B.; KUSTER, T.A. MECHANICAL INTERLOCKING OF ADHESIVE BONDS TO CCA-TREATED SOUTHERN PINE - A SCANNING ELECTRON MICROSCOPIC STUDY. **Wood and Fiber Science**. 24(1), p. 36-46, 1992.

VIDAL, J.M.; EVANGELISTA, W.V.; SILVA, J. D. C. E.; JANKOWSKY, I.P. Preservação de madeiras no Brasil: histórico, cenário atual e tendências [Preservação de madeira no Brasil: história, cenário atual e tendências. Ciênc. Florest. 25 (1), 257-271. 2015. doi: 10.1590 / 1980-509820152505257
















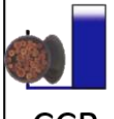



WERNER, F.; RICHTER, K. Wooden building products in comparative LCA: A literature review. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 12(7): 470-479. 2007.

WILKINSON J.G. Industrial timber preservation. London: **The Rentokil Library/Associated Business**, 1979.

APÊNDICE A - Plano de corte para confecção dos corpos de prova dos painéis compensados (1) flexão estática longitudinal; (2) flexão estática transversal; (3) qualidade da colagem; (4) densidade aparente e teor de umidade; (5) absorção; (6) inchamento; (7) Microscopia eletrônica; (9) Retenção; (10) Penetração; (11) Apodrecimento



ANEXO A – Fluxograma de produção e tratamento dos compensados

Tratamento	Lâminas de pinus	Adesivo	Prensagem	Reumidificação das lâminas	Tratamento em autoclave	Secagem das lâminas	Adesivo	Prensagem	Fixação e estabilização
Testemunha (Sem tratamento) com FF				-	-	-	-	-	
Tratamento no painel (Pós-tratamento) com CCA				-	 CCA	-	-	-	
Tratamento no painel (Pós-tratamento) com CCB				-	 CCB	-	-	-	
Tratamento no painel (Pós-tratamento) com água				-	 Água	-	-	-	
Tratamento na lâmina (Pré-tratamento) com CCA		-	-		 CCA				
Tratamento na lâmina (Pré-tratamento) com CCB		-	-		 CCB				
Sem tratamento com Poliuretana				-	-	-	-	-	

ANEXO B – Compilação dos resultados dos ensaios físicos, mecânicos e de preservação da madeira

	FF	Painel CCA	Painel CCB	Lâmina CCA	Lâmina CCB	PU	Água
Propriedades físicas							
Encurvamento (%)	0,46±0,29	0,44±0,14	0,34±0,31	0,58±0,28	0,66±0,52	0,18±0,22	*
Encanoamento (%)	0,78±0,61	0,92±0,77	0,45±0,33	0,23±0,30	0,31±0,33	0,00±0,00	*
Umidade (%)	8,18±0,48	12,41±0,11	13,43±0,32	8,11±0,51	8,00±0,53	8,03±0,09	*
Densidade (kgf cm ⁻³)	493±36	464±23	505±23	496±13	496±18	499±37	*
Absorção (%)	55,54±1,17	49,80±1,65	33,84±1,32	50,00±4,03	51,85±3,26	41,75±5,17	*
Rec. em espessura (%)	3,59±1,22	0,82±0,45	0,48±0,13	1,13±0,67	1,76±0,54	2,47±1,08	*
Inchamento (%)	6,11±0,75	6,84±0,49	6,70±0,37	6,02±0,79	5,29±0,50	3,70±1,08	*
Molhabilidade (graus)	87,48±14,56	*	*	118,23±6,54	119,86±6,61	*	*
Propriedades mecânicas							
Cisalhamento 24 (MPa)	1,49±0,22	1,28±0,24	1,80±0,38	1,50±0,36	1,09±0,23	1,36±0,26	1,43±0,47
Cisalhamento BDB (MPa)	1,19±0,16	1,09±0,32	1,44±0,23	1,32±0,21	0,80±0,16	**	1,03±0,14
Res. longitudinal (MPa)	40,77±2,31	36,96±4,91	48,93±4,52	34,07±5,61	34,98±1,93	37,61±5,18	44,49±1,22
100×MOR/ρ	8,21±0,28	7,97±0,99	9,99±0,87	6,94±1,10	7,74±0,52	7,45±1,02	9,09±0,28
MOE longitudinal (MPa)	4541±419	3955±1126	5334±688	4475±733	4561±536	4192±624	5141±512
Res. transversal (MPa)	24,01±2,97	23,98±4,24	22,97±1,21	21,00±3,24	18,94±2,38	26,13±2,46	26,29±3,90
100×MOR/ρ	4,85±0,74	5,18±0,96	4,69±0,25	4,28±0,69	4,18±0,46	5,18±0,48	5,37±0,79
MOE transversal (MPa)	2241±524	1861±339	1664±171	2201±149	2053±255	1.942±490	2016±366
Preservação							
Retenção (kg m ⁻³)	*	9,52±1,16	9,92±0,76	12,78±1,58	12,44±0,76	*	*

*Ensaio não aplicável para o tratamento. **Não foi possível realizar o ensaio. 100×MOR/ρ: resistência relativa. BDB - *boiling, drying, boiling*.