**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Alternativas de uso para resíduos de madeira tratada através da extração de
metais e manufatura de painéis MDP**

Luana Candaten

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em:
Tecnologia de Produtos Florestais

**Piracicaba
2021**

Luana Candaten
Engenheira Florestal

**Alternativas de uso para resíduos de madeira tratada através da extração de metais e
manufatura de painéis MDP**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **IVALDO PONTES JANKOWSKY**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em:
Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Candaten, Luana

Alternativas de uso para resíduos de madeira tratada através da extração de metais e manufatura de painéis MDP/ Luana Candaten. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2021.

71 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Eletroremoção 2. Painéis MDP 3. Resíduos sólidos 4. Madeira tratada I.
Título

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais, por tornar possível o meu ingresso no mesmo e a partir disso poder realizar o sonho de estudar, pesquisar e cursar o mestrado numa das melhores universidades da América Latina.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa disponibilizada durante os meus 24 meses de mestrado, sem essa, não seria possível o meu ingresso, execução e conclusão da pós-graduação e pesquisa realizadas.

Agradeço à Rizel Instalações Elétricas, Eucatex e CRIOS, pela colaboração nos materiais necessários para o desenvolvimento da minha pesquisa, sem a parceria de vocês não seria possível o desenvolvimento e conclusão da mesma.

Agradeço à Montana Química, especialmente ao químico, Jackson Vidal, e ao diretor técnico e industrial, Walter Nakagawa, pela colaboração e execução das análises químicas.

Agradeço ao meu orientador, o professor Ivaldo Pontes Jankowsky, que apesar das dificuldades, pudemos concluir esse trabalho com sucesso, e com a certeza que fizemos o melhor que pudemos dentro das limitações em que passamos durante esse período.

Agradeço aos professores, funcionários e técnicos de laboratório do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, especialmente ao Alex, Biro e Aparecido, por não terem medido esforços nos momentos em que precisei de ajuda. Obrigada pelas conversas e risadas, Alex.

Agradeço à Giovana, secretária do PPGRF, tua ajuda foi fundamental na minha caminhada dentro do Programa, obrigada por todas as conversas, conselhos e auxílio com as burocracias, espero que nossos caminhos se cruzem novamente.

Agradeço aos meus colegas de laboratório, que se tornaram grandes amigos, em especial ao Diego, Luisa, Annie, Elias, Debora e Gabriel, poder contar com vocês, seja para as atividades práticas ao longo do mestrado, como para tomar uma cervejinha, foi muito importante pra mim, já sinto muita saudade de todos.

Agradeço ao pessoal do LTPF da UFSM, por sempre estarem presentes de uma forma ou de outra na minha trajetória acadêmica e que apesar da distância vivida nesses últimos 2 anos, nunca deixamos de trabalhar juntos, e espero que isso perdure por muito tempo. Agradecimento especial ao professor Rômulo, por todo incentivo, conversas e puxões de orelha, sempre necessários.

E por último, e com certeza, não menos importante, e sim, para encerrar com chave de ouro, agradeço aos amigos e familiares que me apoiaram e acreditaram em mim e que foram ouvido nos dias difíceis, ouvindo meus longos áudios no Whatsapp. Agradecimento mais do que especial, ao meu noivo, Roni, obrigada por desde a graduação sempre estar ao meu lado, mesmo que longe,

por sempre apoiar as minhas decisões, por me ajudar de todas as formas possíveis, e principalmente, nunca me limitar, prometo que nossa recompensa virá, amo você.

Obrigada também, aos que duvidam e duvidaram, vocês são a alavanca que me impulsiona a sempre correr mais e mais atrás dos meus objetivos.

EPÍGRAFE

“No fim da tudo certo e se ainda não deu certo é porque ainda não chegou ao fim...”

Gabriel – O pensador.

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	11
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. Objetivo geral.....	15
2.2. Objetivos específicos.....	15
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	17
3.1. Importância e histórico da madeira tratada.....	17
3.2. Preservativos utilizados e métodos de tratamento.....	19
3.3. Resíduos de madeira tratada.....	22
3.4. Técnicas de reaproveitamento dos resíduos.....	23
3.5. Painéis à base de madeira.....	23
3.6. Eletrorremoção e processos similares.....	27
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
4.1. Obtenção do material.....	31
4.2. Preparo do material.....	32
4.3. Caracterização física da madeira: Densidade básica e Massa Específica.....	33
4.4. Processo de eletrorremoção.....	36
4.5. Extração ácida das partículas e madeira sólida.....	38
4.6. Análise de espectrometria.....	39
4.7. Análises por fluorescência de raios-x.....	40
4.8 Manufatura dos painéis à base de madeira de partículas.....	40
4.9 Ensaio físicos e mecânicos dos painéis.....	46
4.10 Delineamento estatístico.....	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
6. CONCLUSÃO.....	63
REFERÊNCIAS.....	65

RESUMO

Alternativas de uso para resíduos de madeira tratada através da extração de metais e manufatura de painéis MDP

A madeira em seu estado natural está susceptível ao ataque de organismos xilófagos e por isso são necessários tratamentos que melhorem o seu desempenho e ampliem as possibilidades de uso desse material, bem como os locais em que pode ser aplicado. Os preservativos de madeira mais utilizados são os de origem química e, dentre eles o Arseniato de Cobre Cromatado (CCA) tem vasta utilização no Brasil e no mundo. Esse preservativo atende aos requisitos de atuar como inseticida, fungicida e fixador, porém, com relação as questões ambientais como um todo, esse produto traz certa insegurança, por ser composto de metais pesados que são prejudiciais ao ambiente, saúde humana e animal, dificultando as formas de descarte e reciclagem quando sai de serviço. Com isso, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a possibilidade de reciclagem da madeira tratada com CCA retirada de serviço, a partir da fabricação de painéis aglomerados e aplicar técnicas que promovam a remoção dos metais da madeira a fim de ampliar e facilitar as formas de destinação final. Para isso, foram coletados 4 postes (*Eucalyptus* spp.) tratados com CCA e já retirados de serviço, seccionando, de cada poste, dois toretes com 1 m de comprimento, sendo um acima e outro abaixo da zona de afloramento. Foram realizadas análises de massa específica da madeira, quantificação dos metais do CCA do material, e confeccionados painéis aglomerados de média densidade com misturas de *Pinus caribaea* entre os tratamentos. Também, testes de eletrorremoção em diferentes condições, em escala de bancada e extração ácida foram aplicados no material. Os resultados indicaram que a técnica de eletrorremoção foi eficaz, removendo taxas próximas a 100% dos metais de cobre, cromo e arsênio do material tratado, bem como, a extração ácida, sem a aplicação do campo elétrico, trouxe resultados satisfatórios. Com relação aos dados obtidos sobre a qualidade dos painéis MDP, os tratamentos envolvendo madeira tratada com CCA com misturas de *Pinus caribaea* apresentaram excelentes resultados de propriedades físicas e mecânicas. Contudo, para os produtos envolvendo o material tratado e submetido à extração ácida, os painéis não alcançaram resultados aceitáveis, onde o envolvimento de ácidos no processo de extração ácida pode ter afetado na colagem das partículas dos painéis, reduzindo a resistência mecânica dos mesmos. De maneira geral, a técnica de eletrorremoção e extração ácida é viável, removendo os metais presentes no material, ampliando as formas e locais de uso desse resíduo, e recomenda-se mais estudos acerca da aplicação da metodologia em maior escala. O mesmo é indicado para os produtos gerados dos painéis MDP, onde incentiva-se o uso da madeira tratada na condição de resíduo na fabricação dos mesmos, sendo uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável.

Palavras-chave: Eletrorremoção, Painéis MDP, Resíduos sólidos, Madeira tratada com CCA

ABSTRACT

Alternatives to use from wastes treated through the extraction of metals and manufacturing of MDP

Wood in its natural state is susceptible to the attack of xylophagous organisms and for this reason treatments are necessary to improve its performance and expand the possibilities of using this material, as well as the places where it can be applied. The most used wood preservatives are of chemical origin and, among them, the Chromated Copper Arsenate (CCA) is widely used in Brazil and in the world. This preservative meets the requirements as insecticide, fungicide, and fixative; however, in relation to environmental issues, this product brings some insecurity, due to the heavy metals that are harmful to the environment, human and animal health. This characteristic difficult to discard and recycle the treated lumber when out of service. Thus, the objective of this work was to evaluate the possibility of recycling wood treated with CCA removed from service, as manufacturing particleboard as well applying techniques to remove the metals from wood in order to expand and facilitate the forms of final disposal. For this purpose, 4 posts (*Eucalyptus* spp.) treated with CCA and already removed from service were collected, removing from each post two pieces 1 m long, one above and one below the outcropping zone. Analyses of the wood specific weight, quantification of the CCA metals in the material were performed, and medium density particleboard were made with mixtures of *Pinus caribaea* among the treatments. Also, electroremoval tests under different conditions, on bench scale and acid extraction were applied on the material. The results indicated that the electroremoval technique was effective, removing rates close to 100% of copper, chromium, and arsenic metals from the treated material, and acid extraction, without the application of the electric field, brought satisfactory results. Regarding the MDP quality, the treatments involving wood treated with CCA and *Pinus caribaea* mixtures showed excellent results in terms of physical and mechanical properties. However, for the products involving the treated material previously submitted to acid extraction, the panels did not achieve acceptable results. Probably the acids action in the acid extraction process affected the particles, reducing the panel mechanical resistance. In general, the electroremoval and acid extraction technique are viable, removing the metals present in the material, expanding the ways and places of use of this residue, and further studies are recommended about the application of the methodology on a larger scale. The same is indicated for the MDP, where the addition of treated wood residue in the manufacture is encouraged, being a technically feasible and environmentally sustainable alternative.

Keywords: Electroremoval, MDP panels, Solid waste, CCA treated wood

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Postes de madeira tratados retirados de serviço estocados no pátio da empresa.....	31
Figura 2. Placas de metal dos postes, indicando o ano e o tipo de tratamento utilizado.....	32
Figura 3. Ilustração do torete contendo a região do afloramento (descartado) e os toretes localizados acima e abaixo do afloramento.....	32
Figura 4. Medições dos diâmetros de cerne e alburno dos toretes.....	33
Figura 5. Cunhas retiradas dos discos de cada poste coletado.....	34
Figura 6. Material proveniente do cerne e alburno dos postes para aferição da massa específica e densidade básica de ambos.....	34
Figura 7. Aparato utilizado na obtenção da massa específica aparente pelo método do mercúrio.	35
Figura 8. Processo de eletrorremoção sendo aplicado em escala de bancada. À esquerda é possível observar o recipiente de vidro utilizado na remoção, os eletrodos e o agitador magnético, e à direita visualiza-se a fonte de tensão.....	37
Figura 9. Montagem do aparato para extração ácida as partículas (A). Agitação em andamento para o procedimento de remoção ácida (B).	38
Figura 10. Espectrômetro de energia dispersiva de raios-x.	39
Figura 11. Recipientes de plástico onde o material analisado foi alocado, vedado com papel seda e filme.	40
Figura 12. Material proveniente dos postes de madeira tratada na forma de cavacos e de partículas.	41
Figura 13. À esquerda: partículas pré-classificação. À direita: peneiras de diferentes aberturas onde o material foi classificado de acordo com a espessura das partículas.....	41
Figura 14. Estufa de circulação de ar forçada utilizada na secagem das partículas e medição do teor de umidade.....	42
Figura 15. À esquerda: Pesagem do adesivo, parafina e catalisador. À direita: Encoladeira para mistura das partículas com os materiais utilizados na confecção dos painéis.....	44
Figura 16. Processo de formação do colchão (A); prensagem a frio (B) e prensagem a quente (C).	44
Figura 17. Esquema de corte obtido a partir do software CutList Optimizer dos painéis para retirada dos corpos de prova para ensaios físicos e mecânicos.	45
Figura 18. Processo de corte dos painéis para retirada dos corpos de prova destinados aos ensaios físicos e mecânicos.	45
Figura 19. Ensaio de inchamento em espessura.....	46
Figura 20. Ensaio mecânico de flexão estática.....	46
Figura 21. Corpos de prova preparados para os ensaios de tração perpendicular.	47
Figura 22. Taxas de remoção dos metais da madeira em diferentes tamanhos e sem aplicação do campo elétrico.....	54
Figura 23. Perfis de densidade obtidos nos diferentes tratamentos estudados.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição detalhada da composição do preservativo CCA do tipo C.....	20
Tabela 2. Informações de categoria de uso e aplicações do Arseniato de Cobre Cromatado e a retenção indicada para cada situação, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Preservação de madeiras: Sistema de categorias de uso – NBR 16143 (2013).....	21
Tabela 3. Valores de resistência mecânica (em Mpa) e de propriedades físicas (em %) relatados na literatura para painéis aglomerados utilizando madeira tratada (T) e não tratada (NT) na manufatura.....	27
Tabela 4. Descrição dos tratamentos aplicados na técnica de eletrorremoção.....	37
Tabela 5. Delineamento experimental utilizado na confecção dos painéis aglomerados.....	43
Tabela 6. Densidade básica e massa específica aparente seco ao ar da madeira do cerne e do alburno de <i>Eucalyptus</i> spp. tratada retirada de serviço.....	49
Tabela 7. Concentração média, em ppm, dos metais nos postes de madeira retirados de serviço.	50
Tabela 8. Concentração média dos metais em amostras de madeira tratada com CCA e submetida à técnica de eletrorremoção.	51
Tabela 9. Porcentagem média de remoção dos metais após extração ácida.....	55
Tabela 10. Classificação granulométrica das partículas utilizadas na manufatura dos painéis MDP.	55
Tabela 11. Informações das propriedades físicas de massa específica planejada e real e razão de compactação dos painéis aglomerados.....	56
Tabela 12. Médias das propriedades físicas dos painéis aglomerados.....	57
Tabela 13. Propriedade mecânica de flexão estática dos painéis aglomerados.....	58
Tabela 14. Propriedade mecânica de tração perpendicular dos painéis aglomerados.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABPM	Associação Brasileira de Preservadores da Madeira
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
AWPA	American Wood Protection Association
CCA	Arseniato de cobre cromatado
CCB	Borato de cobre cromatado
cm	Centímetro
EPA	Environmental Protection Agency
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
MDP	Medium density particleboard (chapa de partículas de densidade média)
Mpa	Megapascal
MOE	Módulo de elasticidade
MOR	Módulo de ruptura
m	Metro
m ³	Metro cúbico
m ²	Metro quadrado
m/m	Massa/massa
ppm	Partes por milhão
TLP	Tensão do limite proporcional
V	Volt

1. INTRODUÇÃO

A madeira por suas características físicas e mecânicas variáveis e versáteis, tem uma vasta utilização, substituindo, em algumas situações, materiais não renováveis como o aço e o cimento. Devido a esses parâmetros, pode ser aplicada em múltiplos ambientes, sendo adaptável e maleável, apresentando excelentes propriedades tecnológicas no geral.

Apesar dessas características desejáveis, quando a madeira é colocada em ambientes em contato com o solo, umidade e calor, por se tratar de um material orgânico, passa por um intemperismo natural e também por possível deterioração biológica, sendo tal fator dependente dos parâmetros de durabilidade natural da espécie com a qual se está trabalhando. A durabilidade natural ou resistência biológica trata-se da vida útil em serviço quando o material é exposto a fatores abióticos (temperatura, umidade, luminosidade, acidez, entre outros) e organismos xilófagos (JANKOWSKY, 1990; JESUS et al., 1998; SILVA, 2012). Espécies que apresentam alta durabilidade natural estão escassas no mercado (VIDAL et al., 2015).

Diante disso, torna-se necessário a impregnação de produtos na madeira, a fim de preservá-la, aumentando sua resistência ao ataque de organismos biodeterioradores, tais como fungos, insetos e brocas marinhas. Os tratamentos preservativos da madeira em escala industrial são conduzidos em grandes cilindros de aço, onde com vácuo e pressão ocorre a impregnação dos produtos químicos no interior da madeira (GALVÃO, MAGALHÃES e MATOS, 2004).

Os preservativos mais utilizados são os do tipo hidrossolúvel, sendo o CCA (Arseniato de Cobre Cromatado) e o CCB (Borato de Cobre Cromatado) os mais aplicados (RAVASI, 2015). Comparado a outros países como os Estados Unidos e Inglaterra, o Brasil tem um baixo volume de madeira tratada (VIDAL et al., 2015), embora a Associação Brasileira de Preservadores de Madeira (ABPM) informe que o setor tem apresentado uma curva linear crescente, e no ano de 2015, por exemplo, 2,5 milhões de metros cúbicos de madeira tratada foram comercializados no país (ABPM, 2015).

Com a aplicação dos tratamentos preservativos na madeira, a vida útil do material é prolongada, podendo ficar em campo de 20 até 50 anos, ou mais. Os tratamentos preservativos são excelentes em sua função de fungicida e inseticida, conferindo a madeira as propriedades de resistência biológica desejadas; porém, quando se trata das questões ambientais como um todo, existem preocupações e restrições. Tais reflexões ocorrem acerca dos metais presentes na solução de CCA, sendo que dentre eles, o arsênio é considerado altamente tóxico.

O resíduo gerado após a vida útil desse material, que com o passar do tempo precisa ser retirado pelo apodrecimento que se desenvolve na zona de afloramento, precisa ser reciclado de

maneira correta, recebendo à devida atenção. A região de afloramento é considerada 20 cm acima e 50 cm abaixo da superfície do solo (VIDOR, 2011).

Diante disso, em algum momento todo o material tratado que foi empregado nos mais variados ambientes, precisa ser substituído, e diferente de outros materiais, são escassas as formas de reciclagem aplicáveis em escala industrial, que não venham atingir o ambiente e a saúde humana. Devido a essa problemática, a necessidade de pesquisas nesse ramo tem recebido destaque nos últimos tempos.

Existem estudos (BERGER et al., 2020) abordando a utilização dos resíduos de madeira tratada na manufatura de outros produtos de origem madeireira, como os painéis à base de madeira, principalmente os do tipo chapas de partículas aglomeradas.

A reciclagem da madeira tratada retirada de serviço a partir da confecção de produtos como as chapas de partículas pode ser uma alternativa interessante, onde alguns estudos já desenvolvidos nesse âmbito mostram que as exigências normativas mínimas de qualidade do produto são atingidas, e são recomendadas mais pesquisas que possam aprimorar essa prática (LEPAGE, 2010; HOERLLE, 2015; DOS SANTOS et al., 2017).

Outra alternativa para os resíduos de madeira tratada é a remoção dos metais pesados que compõem a solução do tratamento preservativo, através de diferentes técnicas. As pesquisas nesse âmbito são escassas, mas os estudos já concluídos trazem que essa metodologia pode ser viável tecnicamente (RIBEIRO et al., 2006; JANIN et al., 2009ab; FERRARINI et al., 2015), porém, têm sua aplicação principalmente em escala de bancada, sendo pouco aplicada em escala piloto.

Dentre os resultados já obtidos a respeito da descontaminação da madeira tratada, visando ampliar o seu uso, estão as técnicas chamadas de eletrorremoção. Alguns estudos aplicados mostraram que é possível remover altas taxas dos metais de cobre, cromo e arsênio da madeira, podendo atingir níveis próximos de 100% de remoção dos metais através de procedimentos que envolvem extração ácida, eletricidade, dentro outros parâmetros, ampliando as maneiras de reciclagem do material (FERRARINI et al., 2015; MOHAJERANI et al., 2018; FERNÁNDEZ-COSTAS et al., 2018).

Algumas abordagens acerca do resíduo líquido gerado após a aplicação do processo de eletrorremoção e extração ácida da madeira tratada, bem como, recuperação dos metais da solução, já ocorreram em pesquisas anteriores e mostraram a possibilidade de aplicação e finalização desse ciclo de gestão de resíduos; também, estudos com a viabilidade econômica do processo mostraram que a técnica pode ser economicamente viável, dependendo do local e material em que é aplicada (VELIZAROVA et al., 2002; JAMBECK et al., 2007; JANIN et al., 2012; FERRARINI, et al., 2016).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho teve como objetivo estudar a reciclagem da madeira tratada com Arseniato de Cobre Cromatado, na condição de resíduo, através da extração dos metais do material e manufatura de painéis MDP (painel aglomerado de média densidade) com partículas do material tratado, submetidas ou não à extração ácida.

2.2 Objetivos específicos

- Quantificar os metais presentes na madeira tratada retirada de serviço;
- Aplicar a técnica de eletrorremoção e verificar as taxas de remoção na madeira tratada retirada de serviço;
- Aplicar à extração ácida nas partículas de madeira tratada e verificar a remoção dos metais;
- Produzir painéis MDP com o material tratado e submetido à extração ácida;
- Qualificar os produtos obtidos e avaliar a viabilidade da produção de aglomerado incorporando partículas de madeira tratada com e sem remoção do tratamento.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Importância e histórico da madeira tratada

O amplo emprego da madeira está ligado as suas qualidades e possibilidades de utilização. Dentre essas, a construção civil é um dos nichos em que a mesma é amplamente aplicada, principalmente, pela baixa demanda de energia nos processos de desdobro, por suas propriedades mecânicas de MOE e MOR e por se tratar de um produto que pode ser reutilizado (VIDAL et al., 2015; FERRARINI et al., 2012; VIDOR et al., 2010).

A resposta para as diferenças benéficas da madeira, encontra-se na sua constituição, em função da presença da matriz relativamente hidrofóbica e de fibras hidrofílicas (FERRARINI et al., 2012); porém, a grande desvantagem associada a esse fato é a propensão à deterioração (CLAUSEN, 1996; KIN et al., 2000).

Com relação a vantagem de ser um produto reutilizável, para essa reciclagem ser bem-sucedida, quando se fala de madeira que foi tratada, cuidados precisam ser tomados em razão da elevada toxicidade dos produtos utilizados no tratamento preservativo. Com isso, o estudo e investigação de técnicas que promovam uma redução dos teores de metais do material para que esse possa ser reciclado sem prejudicar o ambiente e a saúde humana, é fundamental.

No Brasil, o uso de madeira oriunda de floresta plantada tem se destacado nos mais variados setores que utilizam desta matéria prima. Dentre as espécies plantadas, os gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* se sobressaem. Contudo, quando se trata das características biológicas, esses gêneros deixam a desejar em função de sua susceptibilidade a organismos xilófagos, principalmente quando o emprego do material se dá em contato com o solo ou água (VALLE et al., 2013).

Quando a madeira é submetida a essas condições adversas, torna-se necessário o uso de espécies de alta durabilidade natural ou, no caso do uso de *Pinus* e *Eucalipto*, submetê-las ao tratamento preservativo, por meio da adição de produtos químicos, tornando-as mais resistentes, principalmente ao ataque biológico por fungos, insetos, brocas marinhas, que são os principais deterioradores da madeira em curto prazo (BARILLARI e FREITAS, 2002).

Entre os preservativos químicos, o Arseniato de Cobre Cromatado (CCA) tem sido empregado para tratar a madeira, principalmente em postes de energia elétrica e telefonia, dormentes, construção civil, estacas, decks e cercas (JANIN et al., 2012; FERRARINI, 2012). Comercialmente, a associação de óxidos presentes no CCA é uma excelente alternativa para aumentar a durabilidade da madeira, mas no que diz respeito ao meio ambiente e à saúde pública seu uso é polêmico, devido ao alto índice de toxicidade apresentada (BERTOLINI et al., 2014; FERRARINI et al., 2012; NASCIMENTO et al., 2018).

Desde a década de 30 até os dias atuais, o CCA tem sido aplicado, onde seu uso vem crescendo cada vez mais na indústria de preservação de madeira, sendo que, desde os anos 70 a sua composição foi estudada visando compreender seus mecanismos e fixação na madeira, e a partir disso, passou por alterações nos últimos 60 anos (LEPAGE, 2010). Essas modificações tiveram o objetivo de melhorar a eficiência do produto, bem como reduzir as taxas de lixiviação do mesmo, garantindo mais segurança ao ambiente como um todo.

Na América Latina, o Brasil é o maior consumidor de madeira tratada. Nos anos de 2010 e 2012 haviam instalados em campo, aproximadamente, 400 e 700 milhões de m³ de madeira preservada, respectivamente; tais volumes foram provenientes de florestas plantadas, preservando as madeiras nativas, principalmente nas regiões Sul e Sudeste, locais com ampla produção de material tratado devido à presença de usinas de tratamento (LEPAGE, 2010; FERRARINI, 2012).

O relatório da Indústria Brasileira de Árvores, apontou que até 2018, o setor da madeira tratada no Brasil ocupava 4% o uso total do material proveniente de florestal plantadas, representando 1,4 milhões de metros cúbicos naquele ano, apesar da porcentagem baixa comparada com setores de celulose e energia, por exemplo, o mercado tem apresentando crescente desenvolvimento anual (IBÁ, 2018).

No cenário nacional, a madeira tratada desempenha papel importante, atuando nos quesitos ambientais positivos, pois substitui o uso de espécies nativas que são de difícil reposição. Nos EUA, a Environmental Protection Agency (EPA), em 2003, declarou que as indústrias não empregariam mais esse tipo de preservativo para materiais de uso residencial, devido aos altos índices de compostos tóxicos; porém não havendo restrições para a utilização no meio rural e industrial (JANKOWSKY et al., 2002). Enquanto na Europa, a aplicação de preservativos químicos na madeira foi proibida em 2004 para algumas finalidades, assim como na Suécia e Dinamarca, para empregos como, por exemplo, domiciliar (FERRARINI, 2012). Porém, para ambos os locais, é necessário ressaltar sobre a mídia sensacionalista acerca do uso da madeira tratada com CCA, onde não há estudos que comprovem contaminações em nenhum âmbito, e tal produto continuou sendo amplamente aplicado, pois os fabricantes garantem a fixação do mesmo.

Apesar do uso como preservativo da madeira ter diminuído em função da nova legislação em alguns países, esse continua em grande emprego em função da vida útil do material tratado, de 20 a 50 anos (CHRISTENSEN et al., 2006). Murphy et al., (2004) estimaram que existirá no Reino Unido, em 2061, 870.000 m³ de madeira tratada em serviço que poderá ser descartada como resíduo. Já, nos Estados Unidos, 16 milhões de metros cúbicos por ano têm sido empregados, e espera-se que o resíduo seja de 20 mil toneladas em 2030 (JONES et al., 2019).

Até 2020, eram esperados que 16 milhões de metros cúbicos de madeira tratada estejam saindo de serviço nos EUA, ou seja, gerando esse volume em resíduo (HUMAR et al., 2004; KIM, OH e PARK, 2020).

Os postes utilizados na distribuição da energia elétrica e telefonia são a maior fonte desse tipo de resíduo. Voltando ao cenário nacional, no Rio Grande do Sul, em 2009, eram quase 3 milhões de postes em serviço. Dentre estes, 79% feitos com madeira tratada com CCA. De maneira geral, espera-se que os resíduos resultantes de materiais tratados com CCA sejam processados da seguinte forma: minimização ou eliminação; reutilização; reciclagem; tratamento ou destruição e ainda, disposição final (FERRARINI, 2012). Com isso, a importância de manejar esses rejeitos é uma questão séria, pois o descarte incorreto desse material representa grande risco ao ambiente (MERCER e FROSTICK, 2012).

No Brasil, as normativas existentes não definem a madeira como um resíduo perigoso, dessa forma, a madeira tratada é regularmente descartada em aterros. Contudo, o problema acerca da sua disposição final é recorrente. Na Europa, os resíduos costumam ser incinerados, e na América do Norte são enviados para aterros sanitários (HELSEN e BULCK, 2005; VIDOR, 2010). Tais soluções não são interessantes do ponto de vista ambiental, e também do econômico quando se fala do processo de queima a alta temperatura, pois trata-se de um procedimento caro, de difícil implementação nos países em desenvolvimento.

3.2 Preservativos utilizados e métodos de tratamento

A introdução de produtos químicos na madeira, a fim de aumentar a sua durabilidade, é um dos meios de maior viabilidade e com mais tecnologias disponíveis. O tempo de vida útil da madeira que foi tratada dependerá do produto utilizado, características intrínsecas do material e local em que foi instalado (SILVA, 2006). Existe uma dificuldade em reunir num mesmo produto todas as características desejáveis para um bom preservativo de madeira.

Os do tipo hidrossolúveis são os mais utilizados, em sua formulação possuem metais e várias substâncias químicas, como arsênio, cobre, cromo, flúor, boro e zinco, sendo que, cada uma dessas tem finalidades diferentes no preservativo em si, tais como: fixação, redução da corrosão e proteção a agentes xilófagos (SILVA, 2006).

Dentre esses, o Arseniato de Cobre Cromatado (CCA), é o mais utilizado no Brasil e no mundo. Esse preservativo é aplicado na madeira sob pressão, fixando o produto de forma rápida, precipitando os metais de cobre e arsênio e reagindo com o material onde os agentes ficam insolúveis; o cromo atua como fixador, o arsênio como inseticida, e o cobre como fungicida, sendo

os três metais altamente aderidos a estrutura celular do material lenhoso (SILVA, 2006; FERRARINI, 2012).

O CCA é um produto regulamentado, e pode ser comercializado em três diferentes formulações denominadas do tipo A, B e C, nas quais variam as concentrações de cobre, cromo e arsênio. A formulação do CCA tipo C é a mais comumente aplicada, conforme a American Wood Protection Association (AWPA, 2014). A proporção entre os metais, expressos em base óxida, é representada por 19% de óxido de cobre (CuO_2), 50% de trióxido de cromo (CrO_3) e 31% de pentóxido de arsênio (As_2O_5). A associação desses metais é uma alternativa eficaz para aumentar a resistência da madeira à deterioração por organismos xilófagos, sendo vasta a literatura que comprova sua eficiência (ARAÚJO et al., 2012; VALLE et al., 2013).

O CCA é indicado contra cupins e fungos causadores de apodrecimento no material, sua aplicação é feita com auxílio de autoclave com pressão e uso exclusivamente industrial. As especificações publicadas na portaria 292 do Ibama, sobre o CCA-C (base salina) podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição detalhada da composição do preservativo CCA do tipo C.

CCA TIPO C	
Grupo Químico dos Ingredientes Ativos	Óxidos Metálicos Inorgânicos
Classe	Fungicida e Inseticida
Tipo de Formulação	Líquido viscoso, coloração marrom escuro
Classe Toxicológica – ANVISA	Extremamente Tóxico – Classe I
Classe de Risco Ambiental – IBAMA	Alto Risco – Classe I
Composição Quali-Quantitativa (m/m)	Trióxido de Cromo: 28,70%
	Óxido Cúprico: 11,17%
	Pentóxido de Arsênio: 20,54%
	Outros ingredientes: 40%

Fonte: Herney (2015)

O CCA é mais comumente aplicado em madeiras que ficarão expostas em locais abertos e em contato com o solo, sendo eventualmente utilizado para preservar madeiras que serão usadas em ambientes internos. Para a madeira receber o tratamento, precisa ser descascada, seca e já dimensionada de acordo com o tamanho das peças que serão necessárias no uso final (SILVA, 2006). Ainda, esse produto não altera a condutividade elétrica da madeira, por isso o elevado uso em postes de iluminação elétrica, por exemplo, também não modifica as condições ignífugas, não aumenta a corrosividade e trata-se de um produto inodoro.

De acordo com a Tabela 2, que apresenta as retenções mínimas recomendadas de acordo com o emprego da madeira tratada, a categoria de uso em que a maior retenção é recomendada engloba postes, moirões e outros produtos que ficam em contato direto com o solo ou passíveis de umidificação. Assim, esses são os produtos de madeira tratada com a maior concentração dos metais presentes no CCA.

Tabela 2. Informações de categoria de uso e aplicações do Arseniato de Cobre Cromatado e a retenção indicada para cada situação, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Preservação de madeiras: Sistema de categorias de uso – NBR 16143 (2013).

Categoria de Uso (NBR 16143)	Exemplos de Aplicação	Retenção mínima (kg/m ³)
Interior de construções, fora de contato com o solo, fundações ou alvenaria, protegidos das intempéries, das fontes internas de umidade. Locais livres do acesso de cupins subterrâneos ou arborícolas	Móveis internos, embalagens, portas e janelas, Carretéis para fiação	4 a 6,5
Interior de construções, em contato com a alvenaria, sem contato com o solo ou fundações, protegidos das intempéries e das fontes internas de umidade	Forros, subcoberturas de telhado, assoalhos, batentes, montantes, guarda-corpos, escadas, corrimões e guarnições	4 a 6,5
Interior de construções, fora de contato com o solo e continuamente protegidos das intempéries, que podem ocasionalmente, ser expostos a fontes de umidade	Colunas e vigas internas, lambris, corrimãos, soleiras e montantes Cruzetas, cercas, tabeiras, telhas shingles, batentes, cumeeiras, caibros, terças, tesouras, fechamentos e móveis externos	4 a 6,5
Uso exterior, fora de contato com o solo e sujeito a intempéries		4 a 6,5
Contato com o solo, água doce e outras situações favoráveis à deterioração, como engastes em concreto e alvenaria	Postes, moirões, dormentes, Fundações, Pérgolas, Playgrounds, Estacas, Escadas e Torres de Resfriamento	6,5 a 9,6
Exposição à água salobra ou salgada	Colunas, ancoradouros, pontes, passarelas e defensas	4,5 a 7,5

ABNT-NBR 16143 (2013).

3.3 Resíduos de madeira tratada

Toda madeira tratada tem um ciclo de vida em serviço, e ao fim desse período existem as seguintes opções: a reutilização ou destinação final. A primeira gera um impacto na conservação de florestas, diminuição do uso de aterros sanitários e amplia as oportunidades no ramo da reciclagem (LEPAGE, 2010). Tanto a reutilização quanto a reciclagem do material tratado que está depositado em pátios, são promissoras.

Dentre as formas de destinação final comumente aplicadas aos resíduos de madeira tratada, estão os aterros industriais e as tecnologias de tratamento térmico, sendo que essa segunda apresenta estudos muito incipientes. No Brasil, os resíduos de madeira tratada são classificados como perigosos Classe I, conforme a norma ABNT-NBR 10.004 (2004), por isso, é necessária atenção no momento de descartar esse material. A respeito dos aterros industriais, esses seguem a normatização determinada pela ABNT-NBR 10157 (ABNT, 1987), que trata da disposição de resíduos considerados perigosos no Brasil. Essa forma de descarte do material é adequada a curto prazo (LEPAGE, 2010), visto que, estudos que apresentem outras maneiras de depositar o material contaminado de metais pesados ainda são poucos.

Com relação às tecnologias de tratamento térmico, ou seja, a incineração da madeira tratada com CCA, aparece como uma opção e descarte para esse tipo de material, porém, a legislação deve ser observada, principalmente devido a emissão dos gases tóxicos provenientes da volatilização dos metais pesados que compõem o CCA, sendo que no Brasil, existem poucos incineradores que possuem o licenciamento adequado para essa prática (LEPAGE, 2010).

De maneira geral, os resíduos de madeira tratada atualmente seguem os seguintes destinos: disposição em aterros, reutilização em decks e demais produtos de menor dimensão, geração de outros produtos particulados, aplicação de tratamento curativo visando aumentar a vida útil da madeira em campo e pirólise, ou seja, o processo “Chartherm”. Mesmo que haja uma lixiviação dos metais do material ao longo do tempo em serviço, uma quantidade considerável de Cobre, Cromo e Arsênio ficam no produto até o final de sua vida útil (JONES et al., 2019).

Um estudo realizado recentemente nos EUA com o objetivo de estimar a quantidade de resíduos de madeira existente nos próximos anos, concluiu que o arsênio é o metal mais preocupante e que, anualmente, são gerados centenas de milhares de metros cúbicos de resíduos de madeira tratada com esse metal na composição (JONES et al., 2019). Os mesmos autores abordaram que os aterros sanitários existentes não darão conta de depositar essa madeira e que maneiras de reciclagem desse resíduo precisam ser apontadas com urgência. Mesmo que a legislação tenha reduzido o uso do CCA nos EUA e Europa a alguns anos, existe um volume considerável

de madeira tratada ainda em serviço, e que necessitará ser substituído ao chegar ao final de sua vida útil no futuro.

3.4 Técnicas de reaproveitamento dos resíduos

Atualmente, postes, moirões e outras peças de madeiras tratadas com CCA quando retiradas de serviço, são descartadas em aterros sanitários; de acordo com a legislação da ABNT-NBR 10.004 (2004). Já, a reciclagem desse material pode se dar pela fabricação de painéis a base de madeira, chapas de madeira-cimento e, fora do país, pelo processo Chartherm, que consiste na queima do material descartado a altas temperaturas, transformando-o em carbono (HOERLLE et al., 2015). Os processos de remoção dos constituintes químicos do material tratado ainda estão em fase experimental e a aplicação das técnicas depende de características específicas da madeira e da forma como a mesma foi preservada (COUDERT et al., 2014; JANIN et al., 2012). Ainda, a aplicação dessas técnicas em escala comercial depende de fatores socioeconômicos (DOS SANTOS et al., 2017).

O processo “Chartherm” já foi testado em escala semi-industrial na França, que consiste em triturar, aplicar temperatura e separar o material. O estudo patenteado foi aplicado em 10 mil toneladas de madeira tratada por ano, sendo que passou por testes durante 2 anos e posteriormente foi construído oficialmente em escala industrial, também na França (LEPAGE, 2010).

Estudos utilizando o resíduo da madeira tratada na produção de biochar e bio-óleo tem sido divulgados, onde esses componentes atuam na redução de concentração de metais pesados do material, através da adsorção. Os autores concluíram que se trata de uma técnica promissora, mas que necessita de mais investigações (KIM, OH e PARK 2020).

3.5 Painéis à base de madeira

Dentre as maneiras de reciclar a madeira tratada que foi retirada de serviço, o informativo técnico de uma das maiores fornecedoras do CCA no Brasil, a Montana Química, abordou que a fabricação de chapas de fibras, chapas de partículas, madeira laminada e compósitos de madeira-cimento e de madeira-plástico são possibilidades variáveis (LEPAGE, 2010).

O mercado dos painéis à base de madeira vem crescendo e recebendo destaque, junto com a busca por produtos sustentáveis (BERTOLINI, 2011). A manufatura de painéis à base de madeira a partir do material tratado com CCA é uma opção viável e uma das alternativas de

reciclagem mais sustentável, para aplicações que visam reduzir o risco ambiental que esses resíduos podem vir a causar (MUNSON e KANDEM, 1998; KARTAL e CLAUSEN, 2001).

Os painéis “Medium Density Particleboard” originando a sigla popularmente conhecida como “MDP” são compostos por adesivos e partículas de madeira, compactados por calor e pressão, originando o painel (SILVA, 2012).

Dentre os resíduos madeireiros com potencialidades para produção de painéis, esse grupo se destaca, pois, além da abundância, apresentam um problema ambiental quando descartados inadequadamente, que são os rejeitos e resíduos de madeira tratada, gerados demasiadamente no Brasil (NASCIMENTO et al., 2018). A reciclagem desse material produzido pela atividade industrial se apresenta como uma alternativa viável para evitar que essa valiosa matéria-prima tenha como destino final os aterros sanitários, podendo causar graves consequências ambientais (TEIXEIRA et al., 2000).

Entre os múltiplos produtos do setor de processamento de madeira, os painéis têm apresentado uma crescente demanda e produção diversificada, com um grau satisfatório de incorporação de tecnologia. Além disso, os painéis aumentam a superfície útil, ou seja, um maior aproveitamento do material, em relação à madeira serrada, aliada à sua versatilidade de usos, a partir da variação dos seus elementos constituintes, tem contribuído para evoluir a participação desses materiais no mercado (BRITO, 2018).

As chapas aglomeradas são exemplos dos painéis à base de madeira que podem ser confeccionados com material proveniente dos mais variados tipos de resíduo. Esse painel é definido comercialmente como “aglomerado” (BERTOLINI, 2011) e de acordo com Iwakiri (2002), são produzidos a partir de partículas de madeira, misturadas com resinas sintéticas ou outros adesivos, concluindo o processo através da prensagem com temperatura e pressão pré-definidas.

Esse tipo de painel teve seu desenvolvimento inicial nos Estados Unidos no ano de 1920, porém, em escala industrial, a produção só alavancou sua manufatura em 1940 na Alemanha, a partir da manufatura de chapas com resinas fenólicas (MOSLEMI, 1987). Segundo Iwakiri (2002) o principal motivo do crescimento do uso de painéis aglomerados, foi em função da escassez de madeira de qualidade para laminação e produção de compensados, levando ao uso de partículas menores, provenientes de resíduos madeireiros.

Dentre os produtos à base de madeira, os painéis aglomerados tem apresentado crescimento de produção e consumo que se destacam, tanto a nível nacional, quanto mundial, em função da quantidade de produtos disponíveis para sua fabricação (resíduos, etc), quanto pela sua aplicação (BERTOLINI, 2011).

O crescimento do mercado dos painéis aglomerados se deve a algumas vantagens desse produto quando comparado a outros à base de madeira, sendo alguns desses aspectos positivos: a eliminação de efeitos da anisotropia; resistência da chapa no sentido da largura e do comprimento é similar; eliminação de fatores redutores da resistência, como nós, inclinação da grã, lenho juvenil e adulto; controle das propriedades físicas e mecânicas através das variáveis do processo; menor exigência da qualidade da matéria-prima; menos custo de produção e mão de obra (IWAKIRI, 2002).

Diante disso, para a fabricação dos painéis aglomerados alguns fatores são importantes, tais como, tipos de partículas que definem a estrutura do painel, tipo de resina e aditivos, equipamentos e metodologia empregada na manufatura. A qualidade das chapas de madeira aglomerada pode ser influenciada pela densidade, espécie, acidez, extrativos referentes a madeira utilizada na produção, e também pelos fatores inerentes as características do processo, como geometria, tamanho e distribuição das partículas, umidade, adesivo utilizado (BERTOLINI, 2011).

Dos parâmetros que definem e interferem na qualidade dos painéis, inerentes a madeira, as propriedades químicas, físicas e anatômicas da espécie em que se está trabalhando, e principalmente, a densidade dessas, são de fundamental importância no resultado final do produto manufaturado (IWAKIRI et al., 2012), pois esses influenciam positivo ou negativamente, refletindo na colagem, taxa de compressão, granulometria das partículas, entre outras características.

Dentre esses parâmetros, os painéis podem ser classificados de acordo com a massa específica, tipo de partícula e sua distribuição na chapa (BRITO et al., 2020), na faixa de massa específica entre 0,59 a 0,80 g/cm³, os painéis são considerados de média densidade (IWAKIRI, 2005).

No estudo de Clausen et al., (2000), utilizando resíduo de madeira de conífera tratada com CCA, para produção de painéis aglomerados de alta densidade (0,80 g/cm³) e 10% de adesivo uréia-formaldeído, quando comparados com os dados do mesmo material, porém sem tratamento de CCA, os valores de MOE aumentaram em até 75%, enquanto o MOR e TLP foram semelhantes, o inchamento e absorção de água também tiveram valores com melhor desempenho do que com a madeira de resíduo não tratada. Os autores discutiram que o tratamento conferiu alguma propriedade a madeira que melhorou esses parâmetros mecânicos, concluindo que a reciclagem desses resíduos de madeira tratada se mostrou uma alternativa interessante. Contudo, Morales et al. (2008), ao estudarem o resíduo de madeira tratada e não com CCA de *Pinus taeda* para produção de painéis de partículas aglomeradas de alta densidade colados com melamina-formaldeído, observaram que os dados dos ensaios mecânicos obtidos para as chapas de madeira tratada tiveram resultados inferiores do que as de madeira sem tratamento.

Munson e Kamdem (1998) utilizaram resíduos de madeira de *Pinus* tratada e não tratada com CCA para a fabricação de painéis de partículas aglomeradas em diferentes proporções, produzidas com a resina fenol-formaldeído. Os resultados não foram tão positivos utilizando essas misturas, sendo que as propriedades mecânicas de flexão estática (módulo de elasticidade e de ruptura) só não foram reduzidas na proporção 50% madeira sem tratamento + 50% madeira tratada com CCA de resíduo, com relação a propriedade física de inchamento em espessura e absorção de água, os resultados não diferiram estatisticamente para a madeira in natura e material tratado.

Kartal e Clausen (2001), procuraram remover os componentes químicos de cobre, cromo e arsênio da madeira tratada através das técnicas de extração ácida e biorremediação, utilizando fungos fermentadores. Esses autores observaram que o envolvimento de ácido na técnica resultou em características desejáveis nas chapas do painel aglomerado com relação as propriedades físicas de absorção e inchamento, ainda assim, os resultados obtidos não atingiram aos requisitos dispostos na NBR 14810-2 (2018). Os mesmos autores, fabricando os painéis aglomerados apenas com a madeira tratada sem aplicar técnicas de remoção dos componentes químicos provenientes do CCA, observaram lixiviação desse produto, verificada através de um teste E11-97 (AWPA, 1999) trazendo consequências negativas ao uso.

O trabalho de Shirosaki (2019), estudou painéis reconstituídos do tipo aglomerado com madeira tratada com CCB (Borato de Cobre Cromatado) e, nos resultados, pode verificar a melhoria das propriedades físicas e mecânicas das chapas, gerando painéis resistentes mecanicamente e à absorção de umidade. Vale ressaltar que o autor usou resina poliuretana mista bicomponente, proveniente de mistura de óleos vegetais. Da mesma forma, Bertolini et al., (2014) observaram viabilidade na aplicação de painéis de *Pinus* sp. tratados com CCA provenientes de resíduos de serraria, utilizando como cola, a resina pluriuretana à base de mamona, salientando que esses painéis aglomerados podem receber destaque no mercado.

Os painéis aglomerados produzidos a partir de partículas de madeira tratada com soluções preservativas podem ser uma solução adequada para a destinação final dos resíduos, sendo interessante observar o tipo de cola utilizada para o melhor desempenho das características tecnológicas do produto final.

Os resultados experimentais de algumas das pesquisas citadas no texto podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de resistência mecânica (em Mpa) e de propriedades físicas (em %) relatados na literatura para painéis aglomerados utilizando madeira tratada (T) e não tratada (NT) na manufatura.

Autores	Flexão Estática		Ensaio de Ligação Interna	Inchamento (%)		Absorção (%)	
	MOE	MOR	Tração perpendicular	2h	24 h	2h	24h
Bertolini, 2011	2304 (T)	25 (T)	1,22 (T)	4,27 (T)	11,1 (T)	6,66 (T)	20,93 (T)
Munson e Kandem, 1998	2000,2 (T)	13,8 (T)	-	24 (T)	27,7 (T)	54,4 (T)	65,7 (T)
	2735,8 (NT)	18,5 (NT)		20,1 (NT)	23,6 (NT)	45,8 (NT)	57,8 (NT)
Kartal e Clausen, 2001	-	-	-	11,8 (T)	25,7 (T)	19,1 (T)	42,5 (T)
				28,1 (NT)	33,5 (NT)	53,6 (NT)	65,6 (NT)
Bertolini et al., 2014	2148 (T)	22,46 (T)	-	4,09 (T)	9,17 (T)	-	-
	2109 (NT)	19,95 (NT)		8,65 (NT)	14,5 (NT)		

3.6 Eletrorremoção e processos similares

Nos últimos anos, as técnicas de remediação da madeira tratada receberam considerável atenção devido a consciência da liberação do cobre, cromo e arsênio do material tratado com CCA. Esses métodos podem diminuir a potencial contaminação nos solos e lençóis subterrâneos, visto que o material tratado vem sendo descartado em aterros, sem nenhuma restrição, na maior parte do mundo (KARTAL, KATSUMATA & IMAMURA, 2006; JONES et al., 2019; KALLEN et al., 2020; SAFA et al., 2020; JANIN et al., 2021).

Os processos de remoção dos constituintes químicos do material tratado ainda estão em fase experimental e a aplicação das técnicas depende de características específicas da madeira e da forma como a mesma foi preservada (JANIN et al., 2012; COUDERT et al., 2014). Mais ainda, a introdução dessas técnicas em escala comercial depende de fatores socioeconômicos (DOS SANTOS et al., 2017).

A técnica de eletrorremoção tem alcançado destaque recentemente (DOS SANTOS et al., 2017), sendo que esse procedimento utiliza ácidos orgânicos (cítrico, acético, fórmico, oxálico, fumárico, tartárico, glucônico e maleico) e minerais (sulfúrico, clorídrico, nítrico e fosfórico) (FERRARINI, 2012). O ácido oxálico é um dos mais utilizados no procedimento e quando associado com os ácidos sulfúrico, fosfórico ou com o oxalato de sódio, consegue remover, em amostras fracionadas de madeira tratadas com CCA, algo entre 98% e 100% de arsênio e 88 a 100% do cromo e do cobre, (KAKITANI et al., 2006a; KAKITANI et al., 2006b).

A remoção dos metais do material tratado, quando este é submetido ao processo de eletrorremoção, ocorre em razão de uma corrente elétrica que transporta os íons solúveis presentes na madeira, entre eles o cobre, cromo e o arsênio (CRISTENSEN et al., 2006; PEDERSEN et al., 2005). A aplicação dessa técnica foi estudada por diversos pesquisadores (STEPHAN et al. 1996; DE GROOT e WOODWARD, 1998; MCMAHON et al., 2009; KIM et al., 2009; SIERRA-ALVAREZ, 2009; CHOI et al., 2013), e após esse processo, os níveis de toxicidade do material reduziram e o mesmo poderia ser reutilizado de diversas formas. Pesquisas apontaram que, de maneira geral, a técnica da eletrorremoção é capaz de remover até 87% de cobre, 81% de cromo e 95% do arsênio presente em madeira tratadas, em estudos com madeira fracionada (CRISTENSEN et al., 2006; PEDERSEN et al., 2005; RIBEIRO et al., 2000; OTTOSEN et al., 1997).

Os metais contidos na solução aquosa lixiviada do processo podem passar por uma descontaminação antes de ser liberada ao ambiente (JANIN et al., 2009b). Quando uma extração química apropriada é realizada sob certas condições, o agente tóxico pode ser removido e, idealmente, recuperado para reutilização; ao mesmo tempo, a madeira limpa após a remediação poderia ser reutilizada (GEZER e COOPER, 2015).

O processo eletrodialítico foi aplicado por Castro et al., (2015) a fim de atuar como agente de limpeza na madeira tratada retirada de serviço, utilizando uma corrente contínua com baixa voltagem. O estudo foi conduzido em escala piloto, e os resultados mostraram que o processo eletrodializador para a remoção de metais pesados da madeira se mostrou eficiente, e pode oferecer novas possibilidades de remediação. Esse, aumentou as formas de reutilização desse resíduo, e indicou que outras condições experimentais, tais como distanciamento entre os eletrodos, voltagem elétrica, tamanho das partículas e concentração ácida, podem aumentar as taxas de remoção, as quais chegaram perto de 100%, porém, essa técnica demanda bastante tempo, sendo que os experimentos foram aplicados durante 30 e 86 dias.

Ferrarini (2012), estudou o estabelecimento de uma metodologia para remoção do cobre, cromo e arsênio da madeira tratada com CCA, trabalhando com ciclos de extração, utilizando concentração ácida e aplicação de temperatura. A autora considerou os seus resultados promissores, onde teve altas taxas de remoção, e indicou que o material estaria livre dos metais pesados, podendo ser aplicado nos mais variados âmbitos. Os resultados de fato apresentam taxas de remoção interessantes, porém, trata-se de um experimento que utilizou amostras menores de 10 mm de área superficial na remoção, comprometendo as aplicações do material.

No trabalho de Giannetti et al., (2003), os autores estudaram tecnologias que visaram melhorar o meio ambiente, desenvolvidas em laboratório, e que podem se tornar eco-tecnologias de base industrial. Na revisão bibliográfica realizada na época, já haviam conclusões a respeito da

remoção de metais pesados em solos, efluentes, e outros materiais, porém, não abordando a madeira. Os autores ressaltaram a importância da ligação da pesquisa desenvolvida com o setor industrial, para que a possibilidade de geração de uma tecnologia voltada ao termo de ecologia industrial seja possível.

Para fornecer a diferença de potencial elétrico, é necessária uma fonte de tensão que forneça as voltagens necessárias. Quanto maior o recipiente utilizado, menor será a resistividade elétrica presente, e ainda, a resistência do fio depende da espessura, fios grossos tem essa característica menor que do que os finos, a resistência elétrica também depende da temperatura, que, para a maioria dos condutores, aumentando a temperatura reflete no aumento dessa, e, quanto maior a resistência, menor a corrente (GREF, 2006).

A respeito do líquido utilizado na solução, apesar da água destilada ser um bom isolante, os íons existentes na água comum reduzem muito a resistência elétrica, que recebem a contribuição de substâncias dissolvidas na água, especialmente sais (GREF, 2006). A partir disso, mostra-se a importância de utilizar a água ultra-pura, a qual passa por um purificador laboratorial após sair do destilador.

Ao inserir ácido na água, a intensidade da corrente aumenta, atingindo valores consideráveis, sendo que, a condutividade da solução se dá quase exclusivamente pelas substâncias inseridas na solução. Os líquidos se tornam condutores com a adição de substâncias dissolvidas, formando um eletrólito, conduzindo eletricidade através de líquidos, chamados de eletrólises. A partir de correntes elétricas de soluções com ácidos, como o sulfúrico, por exemplo, gases são liberados nos eletrodos. Ao aplicar uma tensão nos eletrodos submersos na solução eletrolítica, forma-se um campo elétrico, os íons positivos se movimentam em direção ao campo e os negativos na direção contrária, sendo esses os cátions e ânions (WESTPHAL, 1964).

As dimensões e formas geométricas do recipiente e quantidade do líquido utilizado influenciam na corrente, assim como, a temperatura. O uso da técnica de eletrólise, que promove a separação eletrolítica de corpos, tem aplicações numerosas e importantes do ponto de vista econômico (WESTPHAL, 1964).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Obtenção do material

Os postes de madeira tratados com Arseniato de Cobre Cromatado retirados de serviço (Figura 1) foram cedidos pela empresa Rizel Instalações Elétricas, situada no município de Piracicaba – SP; a qual presta serviço terceirizado de substituição de postes para concessionárias de energia elétrica.

Figura 1. Postes de madeira tratados retirados de serviço estocados no pátio da empresa.

Do material disponível no pátio da empresa (Figura 1), foram coletados aleatoriamente 4 postes tratados e retirados de serviço, (tratados em 2000, 1989 (2 postes) e 1987), originalmente fornecidos por diferentes usinas de tratamento, conforme informações disponíveis nas etiquetas de identificação (Figura 2). Os quatro postes eram de *Eucalyptus* sp. ou *Corymbia* sp., mas considerando que o foco da pesquisa é o aproveitamento de resíduos, não foi feita a identificação botânica do material coletado, o qual será simplesmente denominado de Eucalipto.

De cada poste foram cortados dois toretes com 1,0 m de comprimento cada, devidamente identificados e localizados acima e abaixo da zona de afloramento (Figura 3), sendo que a região de afloramento em si foi descartada. Esse descarte foi decidido em função da presença de acentuada deterioração na região do afloramento. Com isso, totalizaram 8 amostras, correspondentes aos 4 postes e 2 regiões de cada.

Figura 2. Placas de metal dos postes, indicando o ano e o tipo de tratamento utilizado.

Figura 3. Ilustração do torete contendo a região do afloramento (descartado) e os toretes localizados acima e abaixo do afloramento.

Os toretes foram transportados ao Departamento de Ciências Florestais da Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, para os demais procedimentos experimentais.

4.2 Preparo do material

Inicialmente foram medidos os diâmetros do cerne e do albúrne, nas duas extremidades de todos os toretes (Figura 4). Esse procedimento permitiu calcular o volume total do torete e o volume de madeira efetivamente tratada; visto que no tratamento preservativo da madeira de Eucalipto é impregnado apenas o albúrne. Adicionalmente, o procedimento também foi fundamental para as atividades que foram desenvolvidas sequencialmente, no momento de seleção do material para confecção dos painéis de partículas. Posteriormente, foram retirados discos com 10,0 cm de espessura em ambas as pontas de cada um dos toretes para a obtenção dos corpos de prova usados nas determinações das propriedades físicas e experimentos iniciais de eletrorremoção e extração ácida. Finalizando o experimento, o restante do material foi moído e transformado em partículas, destinadas aos processos de remoção química dos metais e manufatura dos painéis MDP.

Figura 4. Medições dos diâmetros de cerne e alburno dos toretes.

4.3 Caracterização física da madeira: Densidade básica e Massa Específica

De cada um dos discos foram retiradas duas cunhas diametralmente opostas, destinadas à determinação da densidade básica. As cunhas foram então cortadas no sentido transversal às fibras, reduzindo-se a espessura para 2,5 cm; mantendo uma das cunhas íntegra (contendo cerne e alburno) e individualizando o material de cerne e de alburno da cunha oposta (Figuras 5 e 6, respectivamente).

O restante do disco foi cortado em cavacos, com dimensões aproximadas de 25 x 15 x 4 mm (comprimento, largura e espessura), separando-se o material de cerne e de alburno. Esses cavacos foram destinados à determinação da massa específica aparente (seca ao ar).

O método usado foi o deslocamento de líquidos, no qual o volume da amostra é calculado pela diferença de massa da amostra ao ar e imersa no líquido, em relação à densidade relativa do líquido. Para a determinação da densidade básica o fluido utilizado foi a água, e para a massa específica aparente foi o mercúrio.

Figura 5. Cunhas retiradas dos discos de cada poste coletado.

Figura 6. Material proveniente do cerne e alburno dos postes para aferição da massa específica e densidade básica de ambos.

O material na forma de cunhas, tanto as mantidas íntegras como as com separação de cerne e alburno, foi submetido a saturação com auxílio de uma autoclave laboratorial, e uma vez saturado determinou-se a massa de cada amostra nas condições ao ar e imersa em água.

Os cavacos não foram submetidos à saturação, visto que estavam na condição seca ao ar, ou seja, em equilíbrio higroscópico com as condições do ambiente. A massa individual de cada cavaco foi determinada nas condições ao ar e imersa em mercúrio (Figura 7).

Obteve-se a massa seca, tanto do material proveniente das cunhas como dos cavacos, colocando-se as amostras em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até massa constante. A densidade básica foi obtida pela Equação (1) e massa específica aparente aplicando-se a Equação (2).

Equação 1. Densidade básica.

$$DB = \frac{m_s}{V_v}$$

Onde: DB= densidade básica;

m_s = massa seca a 0%;

V_v = volume saturado.

Equação 2. Massa específica aparente

$$ME = \frac{m_{ar}}{(m_{arim}/\rho_{Hg})}$$

Onde: ME= massa específica aparente;

m_{ar} = massa seca ao ar;

m_{arim} = massa seca ao ar imersa no mercúrio;

ρ_{Hg} = densidade do mercúrio.

Figura 7. Aparato utilizado na obtenção da massa específica aparente pelo método do mercúrio.

Durante a experimentação, tomou-se o cuidado de se registrar a temperatura ambiente no local, para posterior correção da densidade relativa do mercúrio em relação à temperatura.

A necessidade de se obter essa variável está atrelada a manufatura dos painéis MDP, onde que, para todo o planejamento e execução, se faz necessário o conhecimento da massa específica e densidade básica da madeira em que se está estudando, empregadas tanto no volume e massa de partículas para cada painel, como para os cálculos finais da razão de compactação.

4.4 Processo de eletrorremoção

O esquema para a aplicação da eletrorremoção pode ser observado na Figura 8. Utilizou-se um dessecador vazio onde foram colocados os ácidos oxálico e sulfúrico (orgânico+inorgânico) diluídos em água ultra-pura. Essa solução foi mantida em movimento por um agitador magnético e submetida a um campo elétrico através de eletrodos de grafite que são ligados a uma fonte de tensão. A corrente elétrica é conduzida através da solução eletrolítica, e os metais retirados da madeira são atraídos para um dos eletrodos (ânodo ou cátodo) de acordo com sua polaridade; ocorrendo a eletrorremoção através do processo denominado eletrólise. Ao final do processo de eletrorremoção as amostras foram lavadas com água destilada.

Partículas de madeira previamente moídas (peneira de 4 mm) foram submetidas a esse processo, selecionadas aleatoriamente dentre o material disponível, tais frações haviam partes do cerne e alburno dos toretes misturadas, essas foram alocadas em um recipiente de plástico semelhante a uma pequena peneira, para que fosse possível a passagem de líquido entre as mesmas, conforme pode ser observado na parte central inferior da Figura 8.

A aplicação da técnica de eletrorremoção foi de acordo com os tratamentos apresentados na Tabela 4. As variáveis do ensaio foram a corrente elétrica, concentração dos ácidos e tempo do processo, tais parâmetros foram testados a partir da revisão de literatura indicar que poderia haver uma variação nos resultados de acordo com essas características. No campo chamado de identificação, refere-se as amostras que foram selecionadas aleatoriamente para o processo, esse cuidado foi tomado devido à necessidade de se ter a concentração inicial dos metais, que só seria possível sabendo qual amostra foi submetida a cada um dos tratamentos de eletrorremoção.

Figura 8. Processo de eletrorremocão sendo aplicado em escala de bancada. À esquerda é possível observar o recipiente de vidro utilizado na remoção, os eletrodos e o agitador magnético, e à direita visualiza-se a fonte de tensão.

Tabela 4. Descrição dos tratamentos aplicados na técnica de eletrorremocão.

Testes	Variáveis	Identificação
1	0,6 mol/l de ácido oxálico; 0,4 mol/l de ácido sulfúrico; 1 hora; 20 volts	ACZ87
		ABZ00
		ABZ89
2	0,6 mol/l de ácido oxálico; 0,4 mol/l de ácido sulfúrico; 2 horas; 20 volts	ACZ 00-5
		ACZ 00-2
		ACZ 89-1
3	1,12 mol/l de ácido oxálico; 0,9 mol/l de ácido sulfúrico; 1 hora; 20 volts	ACZ 89A-A
		ACZ 00-1
		ABZ89-2
4	1,12 mol/l de ácido oxálico; 0,9 mol/l de ácido sulfúrico; 2 horas; 20 volts	ACZ00
		ABZ00
		ABZ89
5	0,6 mol/l de ácido oxálico; 0,4 mol/l de ácido sulfúrico; 1 hora; 40 volts	ACZ89
		ABZ00
		ABZ89

		ABZ87
6	0,6 mol/l de ácido oxálico; 0,4 mol/l de ácido sulfúrico; 2 horas; 40 volts	ABZ89 ACZ00
7	1,12 mol/l de ácido oxálico; 0,9 mol/l de ácido sulfúrico; 1 hora; 40 volts	ACZ87 ACZ00 ACZ89A
8	1,12 mol/l de ácido oxálico; 0,9 mol/l de ácido sulfúrico; 2 horas; 40 volts	ACZ89 ACZ87 ABZ89A

Onde: ABZ= abaixo da zona de afloramento; ACZ= acima da zona de afloramento; números a direita da identificação= ano em que o poste foi tratado.

4.5 Extração ácida das partículas e madeira sólida

Também foi aplicada a remoção ácida em larga escala (Figura 9), sem a aplicação de eletricidade, apenas com o material mergulhado na solução ácida e sob agitação constante durante um período de 2h. Em cada batelada foram utilizados 20 litros de água contendo ácido oxálico e ácido sulfúrico nas concentrações de 0,35 e 0,5 mol/l (31,5 e 49,0 g/l), respectivamente. Esse volume de solução era usado na extração ácida de 1,0 kg de partículas, com granulometria apropriada para a manufatura dos painéis MDP; separando-se as partículas provenientes do alburno (tratado) e do cerne (não tratado), tal procedimento foi realizado devido ao tratamento preservativo com CCA atingir apenas o alburno da madeira.

Figura 9. Montagem do aparato para extração ácida as partículas (A). Agitação em andamento para o procedimento de remoção ácida (B).

Após a finalização do processo, as partículas foram lavadas em água corrente, submetidas à secagem e, posteriormente utilizadas na manufatura dos painéis.

Adicionalmente, diferentes porções de material não particulado (madeira maciça) foram depositados em solução ácida durante um período de 3 horas, sem a aplicação de eletricidade e em constante agitação da solução. Essas peças tiveram suas concentrações de metais aferidas antes e após a exposição ao ácido. Tal experimento ocorreu no início da pesquisa, a fim de verificar a efetividade da extração ácida sem a ação do campo elétrico, resultados os quais foram fundamentais para o restante dos experimentos realizados.

4.6 Análise de espectrometria

As análises de concentração dos metais no material tratado e após a aplicação da eletrorremoção foram realizadas a partir de um espectrômetro de energia dispersiva de raios-x marca Shimadzu modelo EDX-700HS (Figura 10). Para isso, o material precisou ser previamente seco, e após foi alocado em recipientes adequados para as análises (Figura 11).

Figura 10. Espectrômetro de energia dispersiva de raios-x.

O aparelho foi abastecido com nitrogênio líquido 30 minutos prévios ao início das análises, e foram alocadas 16 amostras, por vez, no amostrador. A aplicação de raios-x sob o material ocorreu a partir de uma fissura de 10 mm, um padrão previamente criado no software do aparelho registrou as concentrações de cobre, cromo e arsênio nas amostras. A medição dos metais acontece a partir de uma amostra de referência, com suas condições já conhecidas a qual é utilizada para a calibração do equipamento, posteriormente, a análise das amostras capturando os picos de Cobre, Cromo e Arsênio ocorre a partir de um padrão previamente criado e estabelecido no software ligado ao espectrômetro. Os resultados obtidos são gerados na unidade de medida de

partes por milhão (ppm), em um arquivo PDF. Essa metodologia foi aplicada antes e depois da aplicação do processo de eletrorremoção. Os tratamentos foram analisados com 3 repetições.

Figura 11. Recipientes de plástico onde o material analisado foi alocado, vedado com papel seda e filme.

4.7 Análises por fluorescência de raios-x

A avaliação da presença do cobre, cromo e arsênio no material submetido à extração ácida a frio, bem como a retenção inicial de CCA desse mesmo material, seguiu as recomendações da norma ABNT-NBR 6232 (2013), por meio da metodologia de fluorescência de raios-x. Esses ensaios foram realizados no laboratório da Montana Química S.A.

4.8 Manufatura dos painéis à base de madeira de partículas

Para a confecção dos painéis MDP, visando massa específica nominal de $0,650 \text{ g/cm}^3$, o material de Eucalipto foi inicialmente cortado em cavacos, onde separou-se o cerne e o alburno (Figura 12) e o material de Pinus em “strands”, e na sequência picados em um moinho de facas tipo Wiley com peneira de 4 mm de abertura acoplada.

A introdução do Pinus, tanto para os painéis em camadas, quanto para os homogêneos, se deu em função da redução da razão de compactação, pois a madeira de Eucalipto possui uma densidade alta, e em decorrência disso, se os painéis fossem manufaturados com 100% de partículas de Eucalipto, apresentariam problemas quanto a razão de compactação final obtida. O Pinus foi escolhido por ser o material disponível no laboratório e por apresentar uma massa específica e densidade baixa, em torno de $0,38 \text{ g/cm}^3$.

A seleção do material de Eucalipto para a manufatura dos painéis de partículas foi baseada na reconstituição do volume real de cada poste, onde a quantidade de partículas utilizada representou a proporção real de cerne e alborno para cada um dos postes coletados em campo.

Figura 12. Material proveniente dos postes de madeira tratada na forma de cavacos e de partículas.

A classificação granulométrica das partículas foi feita utilizando-se um jogo de peneiras vibratórias com aberturas de 4,00 mm, 2,00 mm, 0,85 mm e 0,50 mm (Figura 13); no qual foi peneirado, separadamente, 1,0 kg de cada um dos materiais e aferida a massa das partículas retidas em cada uma das peneiras.

Posteriormente, para a manufatura dos painéis MDP foram coletadas as partículas retidas nas peneiras com aberturas entre de 2,00 mm e 0,85 mm; e descartadas as partículas mais grossas (acima de 2 mm) e mais finas (abaixo de 0,50 mm).

Figura 13. À esquerda: partículas pré-classificação. À direita: peneiras de diferentes aberturas onde o material foi classificado de acordo com a espessura das partículas.

As partículas selecionadas foram secas em estufa de circulação de ar forçada (Figura 14), até atingir o teor de umidade de aproximadamente 3%. O controle foi realizado com o auxílio de uma balança determinadora de umidade que permite obter o resultado em 10 minutos.

Figura 14. Estufa de circulação de ar forçada utilizada na secagem das partículas e medição do teor de umidade.

Os painéis MDP foram manufaturados tanto em composição homogênea como em 3 camadas (heterogêneos), variando-se a proporção da mistura de partículas (Eucalipto x Pinus) e, especificamente para o material de Eucalipto, o tipo de partícula (madeira tratada sem e com extração ácida); com um delineamento experimental envolvendo 7 tratamentos, discriminados na Tabela 5. A opção de avaliar o painel composto em 3 camadas teve por objetivo manter as partículas tratadas com CCA no centro do painel, aumentando a segurança em termos de manuseio e utilização.

Foram manufaturados 4 painéis por tratamento (repetições), resultando em um total de 28 painéis.

Tabela 5. Delineamento experimental utilizado na confecção dos painéis aglomerados.

Tratamento	Proporção
1	100% <i>Pinus caribaea</i>
2	30% <i>Pinus caribaea</i> : 40% madeira tratada : 30% <i>Pinus caribaea</i>
3	40% <i>Pinus caribaea</i> : 20% madeira tratada : 40% <i>Pinus caribaea</i>
4	30% <i>Pinus caribaea</i> : 40% madeira tratada, após extração ácida : 30% <i>Pinus caribaea</i>
5	40% <i>Pinus caribaea</i> : 20% madeira tratada, após extração ácida : 40% <i>Pinus caribaea</i>
6	60% <i>Pinus caribaea</i> + 40% madeira tratada [homogêneo]
7	60% <i>Pinus caribaea</i> + 40% madeira tratada, após extração ácida [homogêneo]

A quantidade de material necessária para cada painel foi pesada e então inserido na encoladeira para a aplicação do adesivo e da parafina. Nessa etapa as partículas de Pinus e de Eucalipto foram misturadas quando se tratou de painéis homogêneos, e processadas separadamente para os painéis feitos em 3 camadas.

O adesivo utilizado foi uma resina à base de uréia-formaldeído (UF) a 12% (sólidos resinosos calculados sobre a massa de partículas a 0% de umidade), misturada ao catalisador numa proporção de 2% sobre a quantidade do adesivo. A aplicação foi feita por 5 minutos na encoladeira a 12 rpm (Figura 15). Na sequência foi aplicada parafina durante aproximadamente 3 minutos, na proporção de 1% (massa de sólidos/massa de partículas a 0% de umidade).

O teor de sólidos da UF, parafina e catalisador foram determinados em laboratório, e tiveram os valores de 67,04; 59,88 e 11,63%, respectivamente.

Figura 15. À esquerda: Pesagem do adesivo, parafina e catalisador. À direita: Encoladeira para mistura das partículas com os materiais utilizados na confecção dos painéis.

Após a colagem, as chapas foram montadas em colchão de 40,0 x 40,0 cm (Figura 16a), e prensadas a frio por 10 minutos a 15 kgf/cm² (Figura 16b); seguida da prensagem a quente por 10 minutos, sendo 1 minuto para abertura e 1 minuto para o fechamento da prensa, a 180 ° C e 35 kgf/cm² (Figura 16c), na prensagem a quente, foram utilizados “stops” afim de garantir a espessura final do painel em 1,57 cm.

Figura 16. Processo de formação do colchão (A); prensagem a frio (B) e prensagem a quente (C).

Os painéis foram dispostos em ambiente climatizado a 25° C e 60% de umidade relativa (UR), por um período de 15 dias, para estabilização. Na sequência tiveram as dimensões ajustadas em 38,0 x 38,0 cm para posterior retirada dos corpos de prova para os ensaios físicos e mecânicos, de acordo com a Figura 17 e 18.

De cada um dos 4 painéis foram retirados 4 corpos de prova para cada ensaio previsto, totalizando 16 corpos de prova/ensaio em cada tratamento.

Figura 17. Esquema de corte obtido a partir do software CutList Optimizer dos painéis para retirada dos corpos de prova para ensaios físicos e mecânicos. Onde: em amarelo= tração perpendicular; em vermelho= massa específica; em azul= teor de umidade; em marrom= inchamento em espessura; em verde= flexão estática.

Figura 18. Processo de corte dos painéis para retirada dos corpos de prova destinados aos ensaios físicos e mecânicos.

4.9 Ensaios físicos e mecânicos dos painéis

Os ensaios físicos e mecânicos dos painéis de partículas aglomeradas seguiram as recomendações da norma ABNT-NBR 14810-2 (2018).

Os ensaios físicos realizados foram de massa específica, teor de umidade, inchamento e absorção de água em 2 e 24 horas de imersão (Figura 19) e mecânicos de flexão estática (Figura 20) e ligação interna (Figura 21).

Figura 19. Ensaio de inchamento em espessura.

Os ensaios mecânicos de flexão estática e ligação interna foram realizados em uma máquina universal de ensaios de acordo com as recomendações da norma citada anteriormente.

Figura 20. Ensaio mecânico de flexão estática.

Figura 21. Corpos de prova preparados para os ensaios de tração perpendicular.

Adicionalmente, foram retiradas amostras para determinação do perfil de densidade no sentido da espessura do painel, usando a técnica da densitometria de raios-x. Para essa análise foi utilizado um densitômetro de raios-x marca QMS modelo QDP-01X.

4.10 Delineamento estatístico

Foi adotado o delineamento inteiramente casualizado, tanto para os ensaios de eletrorremoção (8 tratamentos com 3 repetições) como para o experimento com os painéis MDP (7 tratamentos com 4 repetições). A análise estatística utilizou o programa R Studio (pacote Laecio), aplicando-se a análise de variância – ANOVA para comparação entre tratamentos e, em seguida, o Teste Tukey para comparação entre médias.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias de massa específica e densidade básica, diferenciando o cerne do alburno, da madeira tratada com CCA retirada de serviço estão expostas na Tabela 6. Os resultados não apresentaram uma tendência definida de acordo com o tempo de exposição em campo, mostrando variações nos valores entre os postes coletados. Já, para as posições acima e abaixo da zona de afloramento, pode-se observar comportamento semelhantes dos postes em ambas as situações.

Tabela 6. Densidade básica e massa específica aparente seco ao ar da madeira do cerne e do alburno de *Eucalyptus* spp. tratada retirada de serviço.

Local	Ano de tratamento	Cerne		Alburno	
		Densidade básica (g/cm ³)	Massa específica aparente seco ao ar (g/cm ³)	Densidade básica (g/cm ³)	Massa específica aparente seco ao ar (g/cm ³)
ACZ	1987	0,765 (0,054)	0,994 (0,010)	0,636 (0,223)	1,011 (0,034)
	1989	0,700 (0,007)	0,916 (0,016)	0,448 (0,009)	0,781 (0,195)
	1989A	1,025 (0,168)	1,002 (0,021)	1,025 (0,238)	0,973 (0,005)
	2000	0,778 (0,003)	0,830 (0,096)	0,780 (0,002)	0,971 (0,000)
ABZ	1987	0,808 (0,021)	1,023 (0,010)	0,671 (0,001)	0,862 (0,130)
	1989	0,700 (0,011)	0,904 (0,068)	0,448 (0,009)	0,659 (0,168)
	1989A	0,847 (0,014)	0,924 (0,012)	0,749 (0,021)	0,832 (0,188)
	2000	0,742 (0,501)	0,830 (0,096)	0,637 (0,020)	0,920 (0,000)

Onde: ACZ= acima da zona de afloramento; ABZ= abaixo da zona de afloramento. Números entre parênteses= desvio padrão. A= repetição do poste de 1989.

De maneira geral, os dados de massa específica e densidade básica se mostraram ligeiramente inferiores aos valores relatados para a madeira de *Eucalyptus citriodora* tratado com CCA (PIGOZZO et al., 2017). Essa espécie é a mais utilizada na produção de postes de madeira, sendo grande a possibilidade de ser essa a espécie a qual a presente pesquisa se refere. Porém, não foram realizados estudos anatômicos para a comprovação disso, visto que o objetivo do trabalho foca a temática de utilização dos resíduos de madeira tratada.

Ainda, essa propriedade física pode ter passado por uma certa redução com o tempo em campo devido a alguma deterioração biológica que pode ter ocorrido no material; pois, com o decorrer dos anos, ocorre uma perda do preservativo (BARILLARI et al., 2003). Com isso, torna-

se possível o desenvolvimento de organismos biológicos deterioradores da madeira, os quais, ao atacar a parede celular do material, promovem a redução de suas propriedades.

Estudos realizados por Araújo et al., (2012), com a madeira de *Eucalyptus citriodora* tratada com CCA, evidenciaram que com o decorrer do tempo, o material pode revelar alguma deterioração biológica, e, em caso da madeira dessa espécie sem tratamento preservativo, aos 16 meses o material já se encontrava totalmente biodeteriorado.

Os resultados obtidos para as concentrações de cobre, cromo e arsênio dos postes coletados, podem ser observados na Tabela 7. As análises indicaram, de maneira geral, tanto na região acima da zona de afloramento, quanto abaixo, que as concentrações dos metais se apresentaram menores nos postes que foram tratados a mais tempo e consequentemente passaram maior período em campo. Esse resultado se dá em função de certa lixiviação dos metais para o solo que pode ocorrer com o passar dos anos, assim como os efeitos do intemperismo. Esse comportamento não foi observado no menor tempo em campo (20 anos), que apresentou médias menores do que os demais postes; fato que pode ter ocorrido em função de um tratamento mal sucedido nesse caso em específico, gerando menor concentração desses metais.

Tabela 7. Concentração média, em ppm, dos metais nos postes de madeira retirados de serviço.

	Anos em campo	Cu	Cr	As
Acima da Zona de Afloramento	20	106,4	171,9	343,6
	31	224,9	404,4	796,9
	33	146,8	379,9	294,7
Abaixo da Zona de Afloramento	20	56,1	80,6	36,4
	31	182,9	555,4	403,6
	33	88,2	359,8	161,2

Outro fator observado com relação as concentrações dos metais, foi que em alguns casos os valores encontrados no material localizado abaixo da zona de afloramento apresentaram médias inferiores às encontradas para o material disposto acima da zona de afloramento, porém, não foi uma tendência bem definida. Tal ocorrência pode estar relacionada ao contato direto com o solo, que a parte enterrada dos postes foi submetida, e com isso, vivenciando constantemente condições de umidade elevada, contribuindo para as taxas de lixiviação.

No estudo desenvolvido por Jankowsky et al., (2012), os autores investigaram os índices de retenção e biodeterioração da madeira tratada com CCA-C e CCB em campo de apodrecimento, e puderam verificar que no caso do primeiro, para tratamentos acima de 8 kg/m³ de retenção, a expectativa de vida útil em campo do material pode atingir até 60 anos. Os mesmos autores

apresentaram que a redução da retenção do produto químico preservativo a madeira, ocorre com o passar dos anos, porém em taxas muito baixas.

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos após a análise do material submetido aos tratamentos de eletrorremoção.

Tabela 8. Concentração média dos metais em amostras de madeira tratada com CCA e submetida à técnica de eletrorremoção.

Tratamentos	Variáveis	Concentração (ppm)			Taxas de remoção (%)		
		Cu	Cr	As	Cu	Cr	As
1	1h; 20v; <cc	31,1	2,93	9,6	74,0a	98,5a	96,0a
2	2h; 20v; <cc	55,5	72,8	199,4	55,5a	91,2b	24,4d
3	1h; 20v; >cc	54,3	199,6	229,8	93,2a	66,1d	94,9a
4	2h; 20v; >cc	1,7	5,6	121,9	98,7a	98,4a	70,1bc
5	1h; 40v; <cc	36,4	158,4	207,3	75,1a	55,2e	51,8cd
6	2h; 40v; <cc	17,7	70,1	39,6	85,7a	80,6c	85,1ab
7	1h; 40v; >cc	81,0	170,9	155,6	53,5a	50,1ef	50,3cd
8	2h; 40v; >cc	74,9	199,5	73,1	59,7a	48,5f	73,1abc
CV (%)					23,0	3,0	12,3

Onde: h= horas; v= volts; <cc= menor concentração molar dos ácidos; >cc= maior concentração molar dos ácidos, CV= coeficiente de variação. Médias, no sentido vertical, seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05.

Os resultados obtidos a partir da aplicação da técnica de eletrorremoção podem ser observados na Tabela 8. Os dados médios demonstraram valores de taxas de remoção satisfatórios na maioria dos tratamentos que foram aplicados. O tratamento que apresentou a maior extração do cobre, cromo e arsênio, foi o 1. Porém, demais tratamentos como o 3, 4 e 6, tiveram taxas de remoção que podem ser consideradas satisfatórias, variando de 66,1% a 98,7%.

Apesar da análise estatística, na comparação entre médias de um mesmo elemento químico, ter apresentado diferenças na taxa de remoção para o Cromo e para o Arsênio, não se observou uma tendência bem definida na relação das variáveis estudadas com os resultados obtidos.

A taxa de remoção do Cobre apresentou variação acentuada entre tratamentos e repetições dentro dos tratamentos (coeficiente de variação igual a 23,0%), tendo como resultado da comparação entre médias a não diferenciação entre tratamentos. Esse comportamento não era esperado, e não foi possível aventar uma hipótese para explicar o ocorrido.

Ainda, com relação aos resultados provenientes da aplicação de eletrorremoção em escala de bancada, é necessário observar as taxas de remoção aferidas para o arsênio, pois se trata do metal mais preocupante presente na madeira em função de sua toxicidade. Os resultados obtidos

podem também ser considerados satisfatórios para praticamente todos os tratamentos aplicados, apresentando valores de remoção superiores a 50%, com exceção do tratamento 2.

Em metodologia semelhante, Ferrarini et al., (2016) atingiram remoções de 97, 85 e 98% de cobre, cromo e arsênio, respectivamente, sendo válido ressaltar que os autores estudaram a influência da aplicação da temperatura no processo de eletrorremoção, porém, puderam verificar que a mesma induz negativamente na técnica, proporcionando decomposição das partículas aos 70 °C e, aos 150 °C houve evaporação quase total dos reagentes utilizados. Os mesmos também avaliaram o tempo de aplicação e quantidade de partículas por batelada, diferente do observado no presente estudo, verificaram influência positiva do tempo na aplicação da técnica, porém, observaram as 12 e 24 horas. Com relação a quantidade de partículas, os resultados mostraram que o aumento de material a ser extraído em um mesmo volume líquido de solução extratora, gerou resultados não promissores de remoção dos componentes cobre, cromo e arsênio, ocorrência essa que também foi notada na presente pesquisa.

Castro et al., (2015) aferiram resultados interessantes aplicando a eletrorremoção em escala piloto utilizando ácido oxálico e fórmico, corroborando com os obtidos no presente trabalho, onde os níveis de extração atingiram taxas acima de 98% para todos os componentes do CCA, trabalhando com madeira também retirada de serviço. Em um dos tratamentos avaliados por esses autores, os índices de remoção ficaram abaixo de 30% para o cobre, sob a justificativa de que o tempo de exposição aplicado não foi o suficiente para a transição desse componente na transição dos ânodos para cátodos.

Da mesma forma, Janin et al., (2009a) utilizando metodologia semelhante a do presente estudo, conseguiram a remoção de 99% de cobre e arsênio, e 91% de cromo, da madeira de conífera tratada com CCA. Os autores admitiram que o ótimo obtido foi a aplicação de 150 litros de solução com ácido sulfúrico de 0,2 N de concentração por 2 horas aplicando a temperatura de 75 °C.

No mesmo esquema de corrente contínua de eletrorremoção, Pedersen et al., (2005) aplicando a metodologia em escala piloto, conseguiram a retirada de 82, 88 e 96% dos agentes químicos de cromo, cobre e arsênio, respectivamente, sendo válido ressaltar que o ácido inorgânico aplicado nessa pesquisa foi o fosfórico, e os autores estudaram as diferentes distâncias entre os eletrodos afim de encontrar a metodologia que fosse mais rentável, de acordo com a retirada dos metais da madeira.

Sierra-Alvarez (2009) também obteve alguns resultados baixos aplicando a extração ácida eletrolítica (abaixo de 30%), porém, utilizando apenas o ácido oxálico no processo, com isso, pode verificar a necessidade da combinação correta dos ácidos orgânicos e inorgânicos para a eficácia do processo. Esse resultado pode corroborar com o obtido nos tratamentos onde as taxas, de pelo

menos 1 dos componentes do CCA, não atingiu níveis satisfatórios de remoção, como no tratamento 2, por exemplo, indicando que a proporção de ácido orgânico + ácido inorgânico aplicada pode não ter sido a ideal, aliada as demais variáveis analisadas no processo, gerou taxas inferiores de extração dos metais.

Em contrapartida, Ribeiro et al., (2000) aplicando apenas ácido oxálico nas amostras de madeira tratadas com CCA, obtiveram valores de remoção próximos a 100% para ambos os metais, porém, a introdução do ácido oxálico foi saturando as peças de madeira, as quais tinham dimensões maiores do que as mencionadas nos estudos anteriormente citados. Da mesma forma, Velizarova et al., (2002), discutiram em seus estudos que a presença do ácido oxálico nos processos dialíticos e eletrolíticos, é de fundamental importância para o sucesso da técnica, e as demais variáveis do processo podem comprometer os resultados. Diante disso, algo ainda não discutido, é a respeito das diferentes espécies empregadas, visto que, nos estudos realizados nos países da Europa, sendo maioria da literatura disponível a respeito dessa temática, referem-se à madeiras de coníferas, em alguns casos, espécies de *Pinus*, com isso, é válido ressaltar que a madeira utilizada nesse estudo trata-se de *Eucalipto*, podendo ser um dos fatores responsáveis pelas situações em que os resultados diferem.

É importante comentar que a amplitude das variáveis estudadas neste ensaio (voltagem aplicada, concentração ácida e tempo de remoção) não permitiu identificar uma tendência bem definida sobre o efeito de cada uma dessas variáveis; mas que houve uma redução na concentração dos metais (Cr, Cu e As) na madeira em todas as combinações experimentadas.

Um detalhe que pode ter interferido nos resultados é que não houve a separação entre cerne (não tratável) e alburno (tratável) antes da realização do ensaio; e a casualização na escolha das amostras pode ter provocado uma variação indesejada na proporção cerne/alburno das amostras ensaiadas. Esse efeito também pode ter causado a variabilidade observada nos resultados dentro de um mesmo tratamento.

Mesmo não identificando uma tendência definida quanto às variáveis envolvidas no experimento, os resultados permitem concluir que o processo de eletrorremoção é efetivo em reduzir a concentração de metais em madeira tratada com CCA; e que é importante a continuidade da pesquisa visando otimizar a aplicação dessa técnica, inclusive prevendo uma possível utilização industrial.

A Figura 22 apresenta os resultados obtidos em um dos testes preliminares para avaliar a possibilidade da extração ácida sem a aplicação de um campo elétrico. O objetivo deste teste foi verificar uma possível influência da área superficial da amostra na remoção dos metais, quando submetidas a uma extração ácida simples.

Pode-se observar que as taxas de remoção foram variadas, não apresentando uma tendência definida entre a área superficial da amostra e a taxa de remoção observada. Contudo, o resultado obtido para esse experimento foi interessante, visto que elevadas taxas de remoção puderam ser obtidas mesmo sem a aplicação de um campo elétrico. As taxas médias de remoção para o Cu, Cr e As foram, respectivamente, de 42,9%; 46,4% e 39,8%.

Figura 22. Taxas de remoção dos metais da madeira em diferentes tamanhos e sem aplicação do campo elétrico.

A metodologia em escala piloto, anteriormente testada em laboratório por Janin et al., (2012), verificou a eficácia da remoção no esquema de extração ácida, sem aplicação de eletricidade e para amostras maiores do que em partículas, conforme discutido anteriormente, testando madeira acima de 4 mm de dimensão. Os resultados obtidos neste ensaio estão coerentes com os resultados divulgados pelos referidos pesquisadores, que obtiveram taxas de remoção variadas, algumas chegando próximo a 100% de extração dos metais da madeira tratada com CCA.

Na Tabela 9 são apresentadas as concentrações médias de metais das partículas de alburno (tratado com CCA), na condição original e após a extração ácida; coletadas do material usado na manufatura dos painéis MDP. Cumpre destacar que a metodologia de análise dessas amostras foi a fluorescência de raios-x.

Tabela 9. Porcentagem média de remoção dos metais após extração ácida.

Metais	Concentração (ppm)		Taxa de remoção (%)
	Sem remoção	Com remoção	
Cu	0,089	0,041	53,9
Cr	0,310	0,132	57,4
As	0,027	0,0	100,0

Observa-se que, mesmo trabalhando com um volume maior de partículas, foram obtidas taxas de remoção superiores a 50% e coerentes com outros resultados da literatura. A metodologia tem potencial para ser empregada em larga escala, e em um estudo econômico foi verificado que a mesma pode se tornar viável industrialmente, porém os autores ressaltam a necessidade de estudos com as propriedades dessa madeira que passou pelo processo de lixiviação ácida e suas aplicações após o processo (JANIN et al., 2012).

Os resultados aferidos a partir da classificação granulométrica das partículas de madeira de Pinus e Eucalipto utilizadas na manufatura dos painéis MDP podem ser verificados na Tabela 10. Tanto para a madeira de Eucalipto como para a de Pinus, foi possível observar que a maior proporção granulométrica de descarte foi observada abaixo de 0,5 mm, material o qual não foi utilizado na confecção dos painéis MDP.

Tabela 10. Classificação granulométrica das partículas utilizadas na manufatura dos painéis MDP.

Eucalipto				Pinus			
Aberturas (mm)	Malha (mesh)	Peso (g)	%	Aberturas (mm)	Malha (mesh)	Peso (g)	%
560	3,5	0	0	560	3,5	1,6	0,2
4	5	0	0	4	5	2,6	0,3
2	10	13,9	1,4	2	10	13,4	1,3
0,85	20	611	61,2	0,85	20	695	69,5
< 0,5	3,5	189,4	19,0	< 0,5	3,5	141,3	14,1
Fundo		183,7	18,4	Fundo		157,8	15,8

Também para ambos, a maior quantidade de material utilizado teve uma granulometria de 0,85 mm, função do ajuste nas facas do moinho utilizado para obtenção das partículas.

Os dados coletados a partir dos ensaios físicos e mecânicos dos painéis aglomerados de média densidade são apresentados nas Tabelas 11 a 13, a seguir. Os valores nominais e efetivos dos painéis com relação ao planejamento inicial dos mesmos, bem como o teste de médias das massas específicas entre os tratamentos, e os valores encontrados para a razão de compactação constam da Tabela 11.

Tabela 11. Informações das propriedades físicas de massa específica planejada e real e razão de compactação dos painéis aglomerados.

Tratamento	Massa específica nominal (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Razão de Compactação
T1	0,65	0,701ab	1,6
T2	0,65	0,713ab	1,2
T3	0,65	0,743a	1,5
T4	0,65	0,669b	1,2
T5	0,65	0,686ab	1,4
T6	0,65	0,697ab	1,2
T7	0,65	0,697ab	1,2

Médias, no sentido vertical, seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05.

Os resultados mostraram que as massas específicas reais obtidas, de maneira geral, foram próximas ao valor planejado, sendo ligeiramente superiores, em todos os casos. Esse fato está ligado a porcentagem de perdas inserida sob o cálculo de planejamento dos painéis, onde as perdas reais durante a manufatura foram menores que as perdas estimadas no planejamento.

As massas específicas dos painéis tiveram pouca ou nenhuma variação entre os tratamentos, sendo que o tratamento 3, se destacou com maior relação massa/volume com associação aos demais. Com relação aos resultados obtidos para a razão de compactação, esses se mostraram positivos, visto que, se enquadraram, em sua maioria, dentro do que é sugerido na literatura, próximos a 1,2.

As propriedades obtidas nos ensaios físicos podem ser observadas nas médias apresentadas na Tabela 12. Os resultados encontrados para o inchamento em espessura ao tempo de 2 horas mostraram que a aplicação da extração ácida influenciou negativamente essa propriedade, sendo que os tratamentos 4 e 5, os quais foram submetidos ao processo de remoção dos metais, apresentaram os maiores valores de inchamento, notadamente o tratamento 4.

Tabela 12. Médias das propriedades físicas dos painéis aglomerados.

Tratamento	IE 2h (%)	IE 24h (%)	Teor de Umidade (%)
1	5,7bc	16,5b	7,8a
2	5,9bc	15,0bc	7,8a
3	6,1bc	14,1c	7,7a
4	9,7a	19,7a	6,9a
5	7,1b	19,6a	6,9a
6	6,8bc	15,1bc	8,0a
7	4,8c	15,9bc	8,5a
Valor Máximo recomendado pela NBR 14810-2	-	22	-

Onde: IE= Inchamento em espessura; médias, no sentido vertical, seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05.

Já, para os dados de inchamento após 24 horas de imersão em água, os tratamentos apresentam resultados mais homogêneos entre si. Destacam-se os tratamentos 4 e 5, os quais apresentaram igualdade estatística entre si, os maiores valores absolutos e estatisticamente diferentes em comparação aos demais tratamentos; comprovando o efeito negativo causado pela extração ácida para essa propriedade nos painéis MDP.

Um efeito contrário, ou seja, a redução do inchamento dos painéis, com a introdução da madeira tratada, foi notada por Bertolini et al., (2014), porém, trabalhando com madeira de Pinus. Os autores abordaram que o emprego do tratamento químico na madeira promove modificações na estrutura interna celular, a qual reflete na entrada de água no material, reduzindo as taxas de inchamento em espessura quando submetido a umidade elevada, sendo assim, o uso de madeira tratada na manufatura desse tipo de produto pode ser promissora.

No estudo de Kartal et al., (2001) avaliando a madeira tratada com CCA resíduo e madeira sem tratamento e sem passar por intemperismo, obtiveram resultados de absorção e inchamento melhores para o material em condição de resíduo a partir da fabricação de painéis de partículas aglomeradas. Corroborando com os dados obtidos no presente estudo, esses autores também aplicaram a eletrorremoção no material, e obtiveram resultados considerados bons para as propriedades físicas dos painéis, porém, menores do que a do resíduo sem aplicação do tratamento de descontaminação dos metais.

Os tratamentos 2 e 3 tem proporção de madeira tratada equivalente à dos tratamentos 4 e 5, sendo que a diferença entre eles é a extração ácida das partículas. Como a composição do painel é em 3 camadas, as partículas de Eucalipto estão concentradas no centro do painel; e nessa situação poderiam ocorrer dois fatores que afetariam a colagem entre partículas.

A parte central do painel é a que apresenta menor compactação durante a prensagem a quente, fato comprovado pelo exame do perfil de densidade no sentido da espessura (Figura 23), reduzindo a eficiência da colagem. Adicionalmente, a extração ácida estaria alterando quimicamente a superfície das partículas, seja pela presença de resíduos da solução extratora que permaneceram na madeira ou por degradação química dos componentes da madeira. A conjunção desses dois efeitos explicaria uma colagem deficiente no centro dos painéis, facilitando a entrada de água durante o ensaio de inchamento.

O tratamento 7 tem a mesma proporção entre partículas de Pinus e de Eucalipto (submetido à extração ácida) do tratamento 4, porém sua composição é homogênea. Os valores de inchamento, tanto para 2 ou 24 horas de ensaios, são menores em relação aos tratamentos 4 e 5 e estatisticamente iguais aos valores obtidos nos demais tratamentos. Essa comparação demonstra que a mistura das partículas distribui o efeito prejudicial da extração ácida por todo o painel, corroborando a hipótese da colagem deficiente entre partículas submetidas à extração e concentradas no centro do painel.

As características mecânicas de Módulo de Elasticidade (MOE) e Módulo de Ruptura (MOR) obtidos a partir do ensaio de flexão estática, podem ser observados na Tabela 13.

Tabela 13. Propriedade mecânica de flexão estática dos painéis aglomerados.

Tratamentos	MOE (Mpa)	MOR (Mpa)
1	6342,9 ^a	13,3ab
2	5099,4b	10,7c
3	6436,3 ^a	13,5a
4	1401,9c	11,2bc
5	1093,9c	13,4a
6	5799,3ab	12,1abc
7	1602,3c	6,8d
Valores Mínimos recomendados pela NBR 14810-2	1600	11

Onde: MOE= Módulo de Elasticidade; MOR= Módulo de Ruptura; Médias, no sentido vertical, seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05.

Analisando os resultados obtidos para o MOR, verifica-se que o tratamento 7 apresentou o menor valor absoluto e estatisticamente diferente em relação aos demais tratamentos; comportamento oposto ao observado nos ensaios de inchamento.

Tomando como base os valores mínimos estabelecidos na NBR 14810-2, apenas os tratamentos 1, 3 e 5 estão em conformidade com a referida especificação. Neste aspecto, a proporção entre partículas de Pinus e Eucalipto se mostrou mais importante do que o efeito causado pela extração ácida.

Contudo, ao examinar os resultados obtidos para o MOE, verifica-se que todos os tratamentos contendo partículas de Eucalipto submetidos à extração ácida apresentaram valores absolutos estatisticamente inferiores em comparação aos demais tratamentos. Os tratamentos 4 e 5 não atingiram o valor mínimo estabelecido na NBR 14820-2, e o tratamento 7 apresentou resultado no limite da referida especificação.

Ao utilizar madeira tratada com CCA na manufatura de painéis aglomerados, Nascimento et al., (2013) encontraram valores para MOE inferiores aos do presente estudo, sendo a principal diferença entre os tratamentos, o adesivo aplicado; sendo que os autores da pesquisa mencionada utilizaram uma cola à base de mamona, podendo ter influência nas propriedades do painel. Enquanto, para MOR, o valor médio encontrado por Nascimento et al., (2013) se sobressaiu aos observados no presente trabalho, tendo médias de 27 Mpa.

Tais diferenças entre os tratamentos de acordo com as proporções de madeira tratada não foram observadas por Bertolini et al., (2014), onde os testes com material de 100% Pinus não diferiram daqueles com Pinus tratado com CCA na composição. Com relação aos valores médios, esses autores aferiram, de maneira geral, médias inferiores às observadas no presente estudo para MOE, já para MOR, os dados se sobressaíram, sendo em média 20 Mpa.

Os resultados obtidos para a propriedade mecânica de tração perpendicular, podem ser visualizados na Tabela 14. Da mesma forma do que foi observado em relação ao MOE, os tratamentos contendo as partículas de Eucalipto submetidas à extração ácida (tratamentos 4, 5 e 7) apresentaram os piores resultados; comprovando o efeito indesejado decorrente do tratamento com a solução ácida. Desses, destacam-se negativamente os tratamentos 4 e 5, por não atenderem ao valor mínimo de tração perpendicular recomendado pela norma utilizada no ensaio; diante disso, pode-se discutir que a extração ácida prejudicou a qualidade dos painéis de camadas.

Tabela 14. Propriedade mecânica de tração perpendicular dos painéis aglomerados.

Tratamentos	Tração perpendicular (Mpa)
1	1,0a
2	1,1a
3	1,1a
4	0,1b
5	0,2b
6	1,2a
7	0,5c
Valores Mínimos recomendados pela NBR 14810-2	0,35

Onde: MOE= Módulo de Elasticidade; MOR= Módulo de Ruptura; Médias, no sentido vertical, seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05.

Ferreira et al., (2017) verificaram que o tratamento químico com CCA afeta negativamente na colagem dos painéis, tal fator não foi evidente no presente estudo, justificado pelas partículas utilizadas terem recebido o tratamento a muitos anos atrás e se tratarem de madeira tratada de resíduo e não recém tratada saída da usina de preservação. Porém, os resultados notados por Ferreira et al., (2017) corroboram com o que ocorreu com a introdução da lavagem ácida nas partículas, a qual pode modificar a superfície das mesmas e alterar demais propriedades, conforme o CCA recém aplicado comportou-se no trabalho mencionado, dessa forma, trazendo consequência negativas a colagem do painel e justificando o baixo desempenho nos ensaios mecânicos.

Os resultados positivos encontrados para os tratamentos com o material tratado, sem exposição ácida, também foram observados por Shirosaki (2019), porém aplicado o tratamento a base de boro, CCB. Todas as propriedades físicas e mecânicas dos painéis tiveram desempenho satisfatório com o emprego do material tratado nos testes realizados.

Analisando-se o conjunto dos resultados obtidos, fica patente que a extração dos metais envolvendo a aplicação de uma solução ácida acarreta uma redução nas propriedades do painel MDP, principalmente nas propriedades mecânicas. Contudo, em algumas situações específicas em relação à absorção de água (inchamento), não se verifica essa influência indesejada.

É recomendável a continuidade das pesquisas, buscando identificar com melhor exatidão a causa da colagem deficiente das partículas submetidas à extração ácida; considerando que a remoção dos metais da madeira tratada com CCA é importante para minimizar o potencial efeito contaminante pertinente ao uso dos resíduos de madeira tratada.

A Figura 23 apresenta os resultados aferidos com a aplicação da técnica de raios-x para visualizar o perfil de densidade dos corpos de prova dos painéis MDP manufaturados.

De acordo com resultados demonstrados na Figura 24, os perfis de densidade se mostraram mais acentuados nos tratamentos 2, 3, 4 e 5, devido a presença de camadas nos mesmos, sendo possível observar que a diferença dos materiais inseridos nas camadas refletiu no perfil de densidade. Enquanto, nos tratamentos 1, 6 e 7, tratando-se de painéis homogêneos, ou seja, sem a presença de camadas, o perfil de densidade de mostrou mais ameno ao longo da espessura dos corpos de prova estudados.

De maneira geral, a tendência do formato no estilo “M” no perfil de densidade nos painéis, é o esperado para produtos do tipo MDP, provenientes do processo de prensagem e aplicação de temperatura que ocorrem nas extremidades da chapa (BRITO et al., 2020). Diferentemente de alguns trabalhos disponíveis na literatura, na presente pesquisa, os tratamentos 2 e 3, tiveram um aumento considerável da massa específica na região central do painel, de acordo com o esperado,

pois a camada central foi composta da madeira de Eucalipto, a qual apresenta a maior massa específica. Tal ocorrência, possibilitou bons resultados nas propriedades dos painéis, onde as camadas externas de Pinus, além de corresponderem no bom desempenho físico e mecânico do produto, atuou como uma barreira para que o produto químico do CCA não fique exposto no ambiente em que essas chapas podem ser empregadas.

A razão de compactação dos painéis pode refletir no perfil de densidade dos mesmos, onde nos menores valores dessa propriedade, a curva obtida na análise de raios-x é menos acentuada, apresentando picos mais suaves do que quando comparado as demais com maior razão de compactação (GONÇALVES et al., 2018). Esse comportamento foi observado na Figura 24, onde os tratamentos com o perfil mais homogêneo são o 4, 6 e 7, concomitantemente, ambos apresentam razão de compactação de 1,2.

Figura 23. Perfis de densidade obtidos nos diferentes tratamentos estudados.

6 CONCLUSÃO

A aplicação da técnica de eletrorremoção em resíduos de madeira tratada com CCA é possível, a qual pode remover de 90 a 100% do cobre, cromo e arsênio do material, tornando-o livre dos componentes contaminantes, ampliando as suas aplicações quando o material sai de serviço, podendo ser aplicado na geração de energia e outros ramos que exigem o material livre de agentes tóxicos.

A extração ácida, sem a aplicação de eletricidade, também apresenta resultados satisfatórios, removendo de 53,9 a 100% dos metais da madeira tratada, sendo uma alternativa tecnicamente viável, pois torna o processo menos custoso e com maior possibilidade de ser aplicado em grande escala.

A manufatura de painéis MDP com os resíduos de madeira tratada com CCA é uma excelente prática de emprego do material, onde os resultados das propriedades físicas e mecânicas atendem aos requisitos mínimos normativos e se sobressaem quando comparados aos painéis confeccionados com material não proveniente desse tipo de resíduo. Contudo, os painéis manufaturados com madeira tratada com CCA submetida ao processo de extração ácida não apresentam propriedades físico-mecânicas adequadas.

De maneira geral, o estudo mostra que a técnica de eletrorremoção e extração ácida da madeira tratada ampliam as formas de reciclagem e reutilização do resíduo gerado com esse material que tem saído de campo e dos milhões de metros cúbicos de madeira tratada que sairão nas próximas décadas. Um estudo acerca da recuperação dos metais de cobre, cromo e arsênio, da solução gerada com a aplicação dessas metodologias é necessário, a fim de reutilizar esses produtos, completando um ciclo de gestão de resíduos e agregando no nicho da madeira tratada.

Também, com os resultados obtidos para os painéis MDP, incentiva-se fortemente o uso de madeira tratada com CCA na condição de resíduo na manufatura de painéis aglomerados, com a finalidade de reduzir custos de produção e criar práticas ambientalmente sustentáveis.

REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials, ASTM, **D143**: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber, 31 p., 2014.

American Wood Preservers' Association. AWP, **E11-97**. Standard method of determining the leachability of wood preservatives. Woodstock, MD, PP. 386 –388, 1999.

_____. **AWPA P23**: Standard for Chromated Copper Arsenate Type C (CCA-C), 3 p., 2014.

ARAÚJO, H. J. B.; MAGALHÃES, W. L. E.; OLIVEIRA, L. C. Durabilidade de madeira de eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora* (Hook.) K. D. HILL & L. A. S. Johnson) tratada com CCA em ambiente amazônico. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 42, p. 49-58, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 10157**: Aterros de resíduos perigosos - Critérios para projeto, construção e operação – Procedimento. Rio de Janeiro, 1987, 13 p.

_____. **NBR 6232**: Penetração e Retenção de Preservativos em madeira tratada sob pressão. Rio de Janeiro, 16 p., 2013.

_____. **NBR 14810-2**: Painéis de partículas de média densidade - Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio, 69 p., 2018.

_____. **NBR 1643**: Preservação de madeiras: Sistema de categorias de uso. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRESERVADORES DA MADEIRA – ABPM. **Boletim Eletrônico Quinzenal** – Ano XV - Número 646 – São Paulo, 28 de Abril de 2015.

BARILLARI, C. T.; FREITAS, V. P. **Preservação**. Revista da Madeira, Curitiba, n. 68, 2002.

BARILLARI, C. T.; BRAZOLIN, S.; JANKOWSKY, I. P. O uso da madeira tratada com CCA - aspectos tecnológicos e ambientais. In: **CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO**, 8, 2003, São Paulo. Anais eletrônicos... São Paulo: SBS/SBEF, 2003. 1 CD-ROM.

BERGER, G.; GAUVIN, F.; BROUWERS, H. J. H. The recycling potential of wood waste into wood-wool/cement composite. **Construction and Building Materials**, 2020.

BERTOLINI, M. S. **Emprego de resíduos de *Pinus* tratado com preservante CCB na produção de chapas de partículas homogêneas utilizando resina poliuretana à base de mamona**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais). Universidade de São Paulo, 2011.

BERTOLINI, M. S.; NASCIMENTO, M. F.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.. Painéis de Partículas Provenientes de Rejeitos de *Pinus* sp. Tratado Com Preservante CCA e Resina Derivada de Biomassa. **Revista Árvore**, v. 38, p. 339-346, 2014.

BRITO, F. M. D.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; PAES, J. B.; BELINI, U. L.; TOMAZELLO-FILHO, M. Technological characterization of particleboards made with sugarcane bagasse and bamboo culm particles. **Construction and Building Materials**, 2020.

CASTRO, A. M.; PICO, F. A.; RIBEIRO, A. B.; MATEUS, E. P.; OLIVEIRA, A. V. Electrodialytic removal of heavy metals from treated timber waste. **Proceedings of the Global Conference on Global Warming**, July 2011, Lisbon, PT.

CHOI, Y. S.; KIM, J. J.; KIM, M. J.; SON, J.; KIM, G. H. Optimization of bioleaching conditions for metal removal from CCA-treated wood by using an unknown Polyporales sp. KUC8959. **Journal Environmental Management**, v. 121, p.6–12, 2013.

CHRISTENSEN, I. V.; DAMOE, O. J.; OTTOSEN, L. M.; RIBEIRO, A. B. Electrodialytic remediation of CCA-treated waste wood in a 2 m³ pilot plant. **Science of The Total Environment**, v. 364, n. (1-3), p. 45-54, 2006.

CLAUSEN, C. A. **Int. Biodeteriorations & Biodegradation** 1996, 37, 101.

CLAUSEN, C. A.; KARTAL, S. N.; MUEHL, J. Properties of particleboard made from recycled CCA-treated wood. **International Research Group on Wood Preservation**, 2000.

COUDERT, L.; BLAIS, J. F.; MERCIER, G.; COOPER, P.; JANIN, A.; GASTONGUAY, L. Demonstration of the efficiency and robustness of an acid leaching process to remove metals from various CCA-treated wood samples. **Journal Environmental Management**, p. 197–206, 2014.

CRISTENSEN, I. V.; PEDERSEN, A. J.; OTTOSEN, L. M.; RIBEIRO, A. B. Electrodialytic remediation of CCA-treated waste wood in a 2 m³ pilot plant. **Science of the Total Environment**. v.3 64, 45-54, 2006.

DE GROOT, R. C.; WOODWARD, B. *Wolfiporia cocos*—a potential agent for composting or bioprocessing Douglas-fir wood treated with copper-based preservatives. **Materialen und Organismen**, v. 32, p. 195–21, 1998.

DOS SANTOS, H. S.; FERRARINI, S. F.; FLORES, F. Q.; PIRES, M. J. R.; AZEVEDO, C. M. N.; COUDERT, L.; BLAIS, J. F. Removal of toxic elements from wastewater generated in the decontamination of CCA-treated *Eucalyptus* sp. and *Pinus canadense* wood. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, p. 1299-1309, 2017.

FERRARINI, S. F.; MIRANDA, L. G.; MAIA, S. M.; PIRES, M. Madeira Tratada com Arseniato de Cobre Cromatado (CCA): opções de destino para os resíduos gerados e perspectivas no desenvolvimento de metodologias para a remoção de elementos tóxicos. **Periódico Tchê Química**, v. 12, p. 7-21, 2015.

FERRARINI, S. F.; SANTOS, H. S. dos; MIRANDA, L. G.; AZEVEDO, C. M. N.; PIRES, M. J. R.; MAIA, S. M. Classificação de resíduos de madeira tratada com preservativos à base de Arseniato de Cobre Cromatado e de boro/flúor. **Química Nova**, v. 35, p. 1767-1771, 2012.

FERRARINI, S. F. **Estabelecimento de metodologia para remoção de cobre, cromo e arsênio de resíduos de madeira tratada com Arseniato de Cobre Cromatado – CCA**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, PUC-RS, 2012.

FERRARINI, S. F.; DOS SANTOS, H. S.; MIRANDA, L. G.; AZEVEDO, C. M. N.; MAIA, S. M.; PIRES, M. Decontamination of CCA-treated eucalyptus wood waste by acid leaching. **Waste Management**, v. 49, p. 253-262, 2016.

FERREIRA, B. S.; CAMPOS, C. I. de; SILVA, J. V. F. Qualidade de colagem de compensados de madeira tratados com CCA. **II Congresso latino-americano de estruturas de madeira**, Buenos Aires, 2017.

FERNANDEZ-COSTAS, C.; PALANTI, S.; CHARPENTIER, J. P.; SANROMAN, M. A.; MOLDES, D. A Sustainable Treatment for Wood Preservation: Enzymatic Grafting of Wood Extractives. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 5, p. 7557–7567, 2017.

GALVÃO, A. P. M.; MAGALHÃES, W. L. E.; MATTOS, P. P. de. **Processos Práticos para Preservar a Madeira**. Colombo: 2004. Disponível em: <<http://www.cnpf.embrapa.br/publica/seriedoc/edicoes/doc96.pdf>>.

GEZER, E. D.; COOPER, P. A. Effects of wood species and retention levels on removal of copper, chromium, and arsenic from CCA-treated wood using sodium hypochlorite. **Journal of Forestry Research**, v. 27, p. 433–442, 2015.

GIANNETTI, B. G.; ALMEIRA, C. M. V. B.; BONILLA, S. H. Implementação de eco-tecnologias rumo à ecologia industrial. **RAE-eletrônica**, v. 2, n. 1, 2003.

GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C.; CARVALHO, A. M. de; TOMAZELLO FILHO, M. Densitometria de raios x na avaliação da densidade em painéis de partículas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 3, p. 1151-1162, 2018.

GREF, Edusp. **Física 3: Eletromagnetismo**. 440 p. 2006.

HELSEN, L.; BULCK, E. V. D. Review of disposal technologies for chromated copper arsenate (CCA) treated wood waste, with detailed analyses of thermo chemical conversion processes. **Environmental Pollution**, p. 301-314, 2005.

HERNEY, A. C. R. **Certificado de Registro de Produto, IBAMA, MMA, FOLHA Nº 283, PROC. Nº 7205104**, 2015. QUÍMICA BRASIL LTDA. Nº REGISTRO IBAMA 7205/04. Tenalith 60% CCA-C.

HOERLLE, C. R.; BREHM, F. A.; MACIEL, E. F. Reciclagem da madeira tratada com Arseniato de Cobre Cromatado – CCA. **4º Seminário de Inovação e Tecnologia do IFSul**. Sapucaia do Sul – RS – Brasil, 2015.

HUMAR, M.; BOKAN, M.; AMARTEY, S. A.; SENTJUSC, M.; KALAN, P.; POHLEVEN, F. Fungal bioremediation of copper, chromium and boron treated wood as studied by electron paramagnetic resonance. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 53, n. 1, p. 25-32, 2004.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, IBA. **Relatório 2019**, 80 p. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>>.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. Portaria Interministerial nº 292, Lei nº 4797, 2005.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira**. 1ª Edição. UFPR. 2002.

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

IWAKIRI, S.; SILVA, L. S.; TRIANOSKI, R.; BONDUELLE, G.; M.; ROCHA, V. Y. Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* “paricá” e *Cecropia hololeuca* “embaúba” para produção de painéis cimento-madeira. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 303-308, 2012.

JAMBECK, J.; WEITZ, K.; SOLO-GABRIELE, H.; TOWNSEND, T. THORNELOE, S. CCA-Treated wood disposed in landfills and life-cycle trade-offs with waste-to-energy and MSW landfill disposal. **Waste Management**, v. 27, n. 8, p. S21-S28, 2007.

JANIN, A.; BLAIS, J. F.; MERCIER, G.; DROGUI, P. Optimization of a chemical leaching process for decontamination of CCA-treated wood. **Journal of Hazardous Materials**, p. 136-145, 2009b.

JANIN, A.; BLAIS, J. F.; MERCIER, G.; DROGUI, P. Selective recovery of Cr and Cu in leachate from chromated copper arsenate treated wood using chelating and acidic ion exchange resins. **Journal of Hazardous Materials**, p. 1099-1105, 2009a.

JANIN, A.; COUDERT, L.; BLAIS, J. F.; MERCIER, G.; COOPER, P.; GASTONGUAY, L.; MORRIS, P. Design and performance of a pilot-scale equipment for CCA-treated wood remediation. **Separation and Purification Technology**, 2012.

JANIN, A.; COUDERT, L.; MERCIER, G.; BLAIS, JF. Copper extraction and recovery from alkaline copper quaternary and copper azole treated wood using sulfuric acid leaching and ion exchange or electrodeposition. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, 2021.

JANKOWSKY, I.P. **Fundamentos de preservação de madeiras**. Piracicaba: ESALQ, 1990. 12 p. (Documentos Florestais, 11).

JANKOWSKY, I. P.; BARILLARI, C. T.; FREITAS, V. de P.; A preservação de madeiras no Brasil. **REVISTA DA MADEIRA**, Curitiba, v. 67, n.67, p. 49-50, 2002.

JANKOWSKY, I. P.; LEPAGE, E. S.; SALVELA, C.; VIDAL, J. M.; TAKESHITA, S. Effectiveness of CCA-C and CCB preservatives after a 30 years stake test. **IRG – IUFRO Research Sessions**, International Union of Forest Research Organizations All Division 5 Conference Estoril, Portugal, 2012.

JESUS, M. A.; MORAIS, J. W.; ABREU, R. L. S.; CARDIAS, M. F. C. Durabilidade natural de 46 espécies de madeiras amazônicas em contato com o solo em ambiente florestal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 54, p. 81-91, 1998.

JONES, A. S.; MARINI, J.; SOLO-GABRIELE, H. M.; ROBEY, N. M.; TOWNSEND, T. G. Arsenic, copper, and chromium from treated wood products in the U.S. **Waste Management**, v. 87, p. 731–740, 2019.

KAKITANI, A. T.; HATA, T.; KAJIMOTO, T.; IMAMURA, Y. A novel extractant for removal of hazardous metals from preservative-treated wood waste, **Journal Environmental Quality**, p. 912–917, 2006a.

KAKITANI, T.; HATA, T.; KAJIMOTO, T.; IMAMURA, Y. Designing a purification process for chromium-, copper- and arsenic - contaminated wood. **Waste Management**, p. 453–458, 2006b.

KALLEN, C. C.; GOSSELIN, M.; ZAGURY, G. J. Oral and inhalation bioaccessibility of metal(loid)s in chromated copper arsenate (CCA)-contaminated soils: Assessment of particle size influence. **Science of the Total Environment**, 2020.

KARTAL, S. N.; KATSUMATA, N.; IMAMURA, Y. Removal of copper, chromium, and arsenic from CCA-treated wood by organic acids released by mold and staining fungi. **Forest Products Journal**, 2006.

KARTAL, S. N.; CLAUSEN, C. A. Leachability and decay resistance of particleboard made from acid extracted and bioremediated CCA-treated wood. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 47, p. 183–191, 2001.

KIM, G. H.; CHOI, Y. S.; KIM, J. J. Improving the efficiency of metal removal from CCA-treated wood using brown rot fungi. **Environmental Technology**, v. 30, p. 673–679, 2009.

KIM, J. Y.; OH, S.; PARK, Y. K. Overview of biochar production from preservative-treated wood with detailed analysis of biochar characteristics, heavy metals behaviors, and their ecotoxicity. **Journal of Hazardous Materials**, v. 384, 2020.

KIN, Y. S.; SINGH, A. P.; IANA, J. **2000**, 21, 135.

LEPAGE, E. J. MONTANA QUÍMICA. **Informativo Técnico Divisão Osmose – Destinação Final de Madeira Tratada com CCA**, 2010. Disponível em: <<https://www.montana.com.br/download/984/file/Destina%25C3%25A7%25C3%25A3o+Fina+de+Madeira+Tratada+com+CCA.pdf>>.

MCMAHON, V.; GARG, A.; ALDRED, D.; HOBBS, G.; SMITH, R.; TOTHILL, I. E. Evaluation of the potential of applying composting/bioremediation techniques to wastes generated within the construction industry. **Waste Management**, v. 29, p. 186–196, 2009.

MERCER, T. G.; FROSTICK, L. E. Leaching characteristics of CCA-treated wood waste: A UK study. **Science of the Total Environment**, 2012.

MOHAJERANI, A.; VAJNA, J.; ELLCOCK, R. Chromated copper arsenate timber: A review of products, leachate studies and recycling. **Journal of Cleaner Production**, v. 179, p. 292–307, 2018.

MORALES, E. A P. M.; NASCIMENTO, M. F.; LAHR, F. A. R.; PARTEL, H.; OLIVEIRA, R. M. Estudo Inicial sobre a Viabilidade da Produção de Painéis de Partículas de Madeira de Reflorestamento Tratada. **XI Encontro Brasileiro em Madeira e Estruturas de Madeira**, 2008.

MOSLEMI, A. A; PFISTER, Stephen C. The influence of cement/wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels. **Wood and Fiber Science**, v. 19, n. 2, p. 165–175, abr. 1987.

MORESCHI, J. C.; ROCHA, M. P.; BORGES, C. C.; CARVALHO, R. C.; **Revista da Madeira** 2002, 68, 12.

MUNSON, J. M.; KAMDEM, D. P. Reconstituted particleboards from CCA-treated red pine utility poles. **Forest Products Journal**, v. 48, n. 3, p. 55–62, 1998.

MURPHY, R. J. et al. Preservative treated wood as a component in the recovered wood stream in Europe: a quantitative and qualitative review. **In: THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PRESERVATION**, 35., 2004, Estocolmo. Annual Meeting... Estocolmo: IRG Secretariat, 2004.

NAHUZ, M. A. R.; WATAI, L. T. Uma Visão Ampla dos Materiais à Base de Madeira no Brasil. **Brasil: Silvicultura**, v. 19, n. 35, p. 34-38, 1998.

NASCIMENTO, M. F. do; CHRISTOFORO, A. L.; CAMPOS, C. I. D.; ALMEIDA, D. H. de; LAHR, F. A. R. Efeitos das intempéries na rugosidade de painéis de partículas de *Pinus* sp. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 227-238, 2018.

NASCIMENTO, M. F.; LAHR, F. A. R.; BERTOLINI, M. S.; SOUZA, A. M. Viabilidade do Emprego de Eucalyptus tratado com CCA e CCB na Produção de Painéis de Partículas de alta Densidade. **Painéis de Partículas**. 1ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, v. 1, p. 57-90, 2013.

OHGAMI, N.; YAMANOSHITA, O.; THANG, N. D.; YAJIMA, I.; NAKANO, C.; WENTING, W.; OHNUMA, S.; KATO, M. Carcinogenic risk of chromium, copper and arsenic in CCA-treated wood. **Environmental Pollution**, v. 206, p. 456-460, 2015.

OTTOSEN, L. M.; HANSEN, H. K.; LAURSEN, S.; VILLUMSEN, A. Electrodialytic remediation of soil polluted with copper from wood preservation industry. **Environment Science Technology**, v.31, 1711-1715, 1997.

PEDERSEN, A. J.; KRISTENSEN, V.; OTTOSEN, L. M.; RIBEIRO, A. B.; VILLUMSEN, A. Electrodialytic remediation of CCA-treated waste wood in pilot scale. **Engineering Geology**, v. 77, p. 331-338, 2005.

PIGOZZO, J. S.; ARROYO, F. N.; CHRISTOFORO, A. L.; CALIL JÚNIOR, C.; LAHR, F. A. R. Pull out Strength Evaluation of Steel Bars Bonded-in to 45° in Round Timbers of *Corymbia citriodora* Treated with CCA. **International Journal of Materials Engineering**, v. 7, n. 2, p. 25-32, 2017.

RAVASI, R. **Aplicação de sais hidrossolúveis para tratamento de madeira roliça por meio de métodos não industriais**. 2015. 57 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. 2015.

RIBEIRO, A. B.; RODRÍGUEZ-MAROTO, J. M.; MATEUS, E. P.; VELIZAROVA, E.; OTTOSEN, L. M. Modeling of electrodialytic and dialytic removal of Cr, Cu and As from CCA-treated wood chips. **Chemosphere**, p. 1716-1726, 2006.

RIBEIRO, A. B.; MATEUS, E. P.; OTTOSEN, L. M.; BECH-NIELSEN, G. Electrodialytic Removal of Cu, Cr, and As from Chromated Copper Arsenate-Treated Timber Waste. **Environmental Science and Technology**. v.34, p.784-788, 2000.

SAFA, M.; O'CARROLL, D.; MANSOURI, N.; ROBINSON, B.; CURLINE, G. Investigating arsenic impact of ACC treated timbers in compost production (A case study in Christchurch, New Zealand). **Environmental Pollution**, v. 262, 2020.

SHIROSAKI, R. K. **Caracterização de painéis de partículas de madeira tratada com CCB confeccionados com resina poliuretana mista**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais), Universidade Federal de São Carlos, 2019.

SIERRA-ALVAREZ, R. Removal of copper, chromium and arsenic from preservative-treated wood by chemical extraction-fungal bioleaching. **Waste Management**, v. 29, p. 1885–1891, 2009.

SILVA, J. C. **REVISTA DA MADEIRA – REMADE - EDIÇÃO Nº100 - NOVEMBRO DE 2006**.

SILVA, M. R. da. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de *Eucalyptus citriodora* e *Pinus taeda***. 2012. 223 p. Tese (Doutorado em Estruturas de Madeira) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

STEPHAN, I.; LEITHOFF, H.; PEEK, R. D. Microbial conversion of wood treated with salt preservatives. **Material und Organismen**, v. 30, p. 179–199, 1996.

TEIXEIRA, D.; ALVES, M. V. da S.; COSTA, A. F. da; SOUSA, N. G. de. Características de chapas de cimento-madeira com partículas de seringueira (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) tratadas com CCA. **Floresta e Ambiente**, v. 8, n. único, p. 18–26, 2012.

VALLE, M. L. A.; SILVA, J. de C.; DELLA LUCIA, R. M.; EVANGELISTA, W. V. Retenção e penetração de CCA em madeira de primeira e segunda rotação de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 481-490, 2013

VELIZAROVA, E.; RIBEIRO, A. B.; OTTOSEN, L. M. A comparative study on Cu, Cr and As removal from CCA-treated wood waste by dialytic and electrodialytic processes. **Journal of Hazardous Materials**, p. 147–160, 2002.

VIDAL, J. M.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; JANKOWSKY, I. P. Preservação de madeiras no Brasil: histórico, cenário atual e tendências. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 257-271, 2015.

VIDOR, F. L. R. **Avaliação da Vida Útil de postes de madeira em Serviço em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. 2011. 130 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS, 2011.

VIDOR, F. L. R.; PIRES, M. J. R.; DEDAVID, B. A.; MONTANI, P. D. B.; GABIATTI, A. Inspection of wooden poles in electrical power distribution networks in southern Brazil. **Transactions on Power Delivery**, v. 25, p. 479-484, 2010.

WESTPHAL, W. H. **Tratado de Física**. Editora Labor, 1964.