

Madeira preservada com CCA: proficuidade, potencial deletério, toxicidade dos resíduos e tecnologias de recuperação

CCA-preserved wood: efficiency, deleterious potential, toxicity of wastes and recovery technologies

Caroline Emiliano Santos¹, Luana Candaten², Paulo Roberto Bairros da Silva³, Rômulo Trevisan⁴

RESUMO: A madeira é um material sustentável que pode ser empregado para diversos fins. A sua durabilidade é prolongada com o uso do conservantes químicos, destacando-se mundialmente para este fim o Arseniato de Cobre Cromatado (CCA). No entanto, o descarte da madeira, após o tratamento e a vida útil, costuma acarretar efeitos ambientais adversos. A recuperação e o destino final da madeira preservada com CCA podem ser realizados de formas distintas, minimizando o impacto ao meio ambiente. Nessa perspectiva, esta pesquisa foi desenvolvida de modo sistemático, abordando sobre a proficuidade do tratamento de madeira com CCA, enunciando seu potencial efeito tóxico, revisando os métodos de recuperação do CCA da madeira, discorrendo sobre o descarte final dos resíduos sólidos contaminados e apresentando seus potenciais substitutos. A produção de artigos sobre o tema é expressiva e crescente, principalmente nos Estados Unidos, embora exista uma pressão mundial política e ambiental, desestimulando o uso do CCA no tratamento preservativo da madeira. Além disso, este estudo possibilitou a identificação dos principais periódicos onde o tema é discutido, o impacto das produções, bem como a categorização dos principais assuntos abordados, destacando-se o 'Potencial Ambiental adverso da Madeira Tratada com CCA'. As informações que foram coletadas estão de acordo com dados disponíveis no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), considerando os últimos 10 anos de produção científica sobre o tema Madeira Tratada com CCA, e refletem o estado atual deste campo de estudos.

Palavras-chave: Disposição final. Elementos tóxicos. Preservação da madeira. Resíduos contaminados. Revisão sistemática.

ABSTRACT: Timber is a sustainable material that may be employed to several ends. Its durability is prolonged by chemical preservers, especially Cromated Copper Arsenate (CCA). However, timber wastes after treatment and usefulness cause adverse environmental results. Recovery and final layout of CCA-timber may be undertaken distinctly with an improvement in the preservation of the environment. Current research involved the efficaciousness of CCA-treated timber and its potential toxic effect by reviewing the recovery of CCA from the wood, the final layout of contaminated solid residues and potential replacements. There are many publications on the theme, especially in the USA, even though political and environmental pressure exists for diminishing the use of CCA in timber conservation. Further, current analysis identified the main journals on the theme, their impact and the categorization of the main subject matters, with special reference to adverse environmental potential of CCA-treated timber. Data comply with those on the Portal of Journals of CAPES for the last ten years on the theme and the state-of-the art of studies on the subject.

Keywords: Contaminated wastes. Final layout. Preservation of wood. Systematic review. Toxic elements.

Autor correspondente:

Paulo Roberto Bairros da Silva: paulobairros@politecnico.ufsm.br

Recebido em: 16/08/2020

Aceito em: 15/12/2020

INTRODUÇÃO

A madeira é um material versátil, renovável, de uso ecológico correto, cujas propriedades físicas, mecânicas, anatômicas e biológicas permitem seu emprego para diversos fins (MATOS *et al.*, 2020; KIMA;

¹ Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), Brasil.

² Mestre em Recursos Florestais pela Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba (SP), Brasil.

³ Doutor em Ciências. Técnico de Laboratório Área - Centro de Ciências Naturais e Exatas, Departamento de Química, Setor de Química Industrial e Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria (RS), Brasil.

⁴ Doutor em Engenharia Florestal. Professor - Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), Brasil.

PARK, 2020; OHGAMI *et al.*, 2015). O Brasil é líder mundial na produção desse material, com destaque para os gêneros comerciais *Eucalyptus* e *Pinus*, principalmente por apresentarem rápido crescimento, variada utilização para usos na construção civil e indústria moveleira e, ainda, excelente potencial energético e calorífico (MATOS *et al.*, 2020; IBÁ, 2020; VIDAL *et al.*, 2015).

No entanto, a durabilidade natural dessas espécies e sua vida útil, quando em uso, geralmente são comprometidas pela exposição a fatores ambientais como acidez, luminosidade, umidade e variação de temperatura (DHILLON *et al.*, 2017; BATOMÉ *et al.*, 2017). Somado a isso, essas espécies possuem baixa resistência à deterioração por ação de insetos, bactérias e fungos quando expostas ao ambiente, tornando necessário o emprego de tratamentos químicos preservativos a fim de se prolongar sua durabilidade (MATOS *et al.*, 2020; DHILLON *et al.*, 2017; FERRARINI *et al.*, 2016).

Atualmente, o Arseniato de Cobre Cromatado (CCA) é o principal conservante de madeira empregado mundialmente no tratamento da madeira (ABPM, 2017; FERRARINI *et al.*, 2016; FERRARINI *et al.*, 2015a). A descoberta desse produto ocorreu em 1933 pelo cientista Sonti Kamesan, entretanto, somente em 1970 seu uso passou a ser extensivo (MATOS *et al.*, 2020; FERRARINI *et al.*, 2016; FERRARINI *et al.*, 2015b).

Essa substância apresenta eficiência como preservativo da madeira e possui viabilidade econômica em comparação com outros tratamentos, tais como tratamentos preservativos naturais da madeira a base de óleos essenciais, tratamentos térmicos da madeira e tratamentos químicos da madeira a base de outras substâncias (KIMA; PARK, 2020; MOHAJERANI *et al.*, 2018; FERRARINI *et al.*, 2016). A sigla CCA deriva do inglês *Chromated Copper Arsenate* e denota a formulação de sais preservativos a base de Cobre (Cu), Cromo (Cr) e Arsênio (As). O cromo tem como função essencial fixar o Cobre e o Arsênio na madeira, enquanto estes agem no combate de fungos e cupins, respectivamente (KIMA; PARK, 2020; MOHAJERANI *et al.*, 2018).

Em contrapartida à larga escala de utilização desse produto, grandes volumes de madeiras tratadas com CCA contendo cargas potencialmente poluentes de Cu, Cr e As são descartados diariamente em aterros sanitários, após sua vida útil, e têm gerado crescente preocupação em função de seu potencial nocivo ao meio ambiente (GOSSELIN; ZAGURY, 2020; MOHAJERANI *et al.*, 2018).

Nessa perspectiva, este estudo teve como foco a revisão sistemática sobre o tema ‘Madeira Tratada com CCA’, considerando seu uso, descarte e a disposição final após seu ciclo de ‘vida útil’.

A pesquisa teve caráter bibliográfico com a construção de cenários para mapear e trazer à tona a compreensão do assunto, possibilitando a discussão da produção acadêmica por diferentes campos do conhecimento. Além disso, buscou-se ordenar os relatos para os quais já se têm resultados aceitos e identificar as linhas de pesquisa existentes, possibilitando uma visão geral do comportamento do campo de estudo (PEREIRA; MAGNAGO, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2019; GOES; FERNANDEZ, 2018; VIEIRA *et al.*, 2018).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A delimitação de estudo baseou-se na procura de artigos por meio de ferramentas de busca, disponíveis no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), das palavras-chave “Wood”, “CCA”, “Wood + CCA”, “Cooper Chrome Arsenic”, “Treated Wood” e “Treated Wood + CCA”, considerando a produção científica entre os anos de 2010 e 2019 (10 anos de produção), período em que não houve estudos de revisão sobre este tema, e apesar do uso do CCA tratar-se de um método

antigo, nos últimos anos a preocupação a respeito dos resíduos gerados pela madeira tratada que saiu de serviço vem aumentando, devido aos riscos ao ambiente e saúde humana. Os resultados foram refinados pelo tópico *Environmental Sciences*, gerando um banco de dados de 263 artigos. Destes manuscritos, 73 foram selecionados para este estudo por atenderem ao critério de inclusão ao escopo devido à abordagem ao tema 'Madeira Tratada com CCA' (*Material Suplementar - Tabela S1*).

Cabe ressaltar que nem todos os artigos selecionados apresentaram discussões sobre o tema 'Madeira Tratada com CCA' e, portanto, foram eliminados do conjunto amostral. A compreensão acerca do tema considerou o fichamento das informações das produções selecionadas (identificação do periódico, título do estudo, autores, ano de publicação, etc.), possibilitando agrupá-las conforme características comuns para categorização e interpretação de dados (PEREIRA; MAGNAGO, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2019).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A abordagem de assuntos ligados ao tema 'Madeira Tratada com CCA' tem sido objeto de interesse recorrente por parte de pesquisadores na área de Ciências Ambientais. Na última década a produção de estudos sobre o tema é expressiva e crescente, conforme demonstrado na Figura 1.

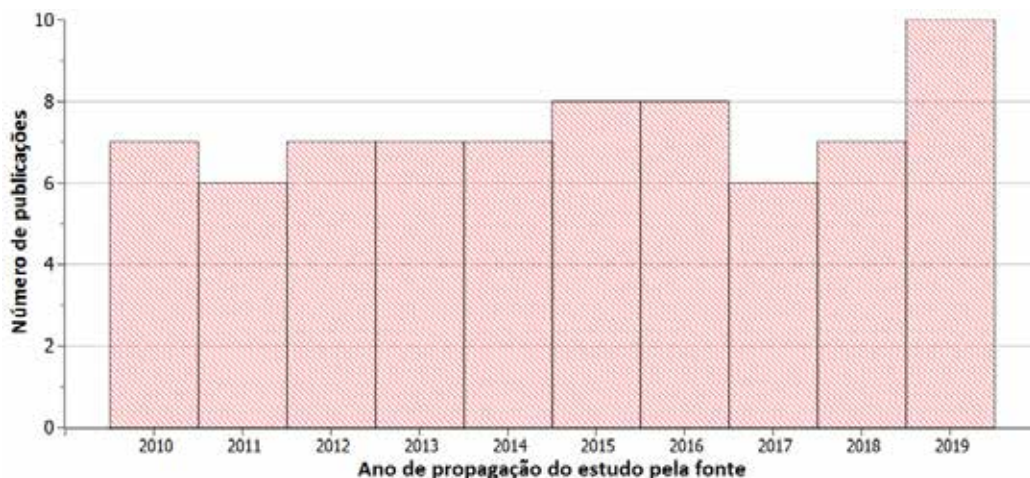


Figura 1. Artigos que abordam o tema 'Madeira Tratada com CCA' e ano de sua publicação.

Fonte: Autor.

Acredita-se que este resultado possa estar ligado às pressões política e ambiental de governos europeus e do governo americano para redução e/ou eliminação do uso do CCA no tratamento da madeira (KIMA *et al.*, 2020; KING *et al.*, 2019; OHGAMI *et al.*, 2015). A origem dos estudos sobre 'Madeira Tratada com CCA' permite destacar o elevado número de estudos realizados nos Estados Unidos quando comparado a outros países, segundo a Figura 2.

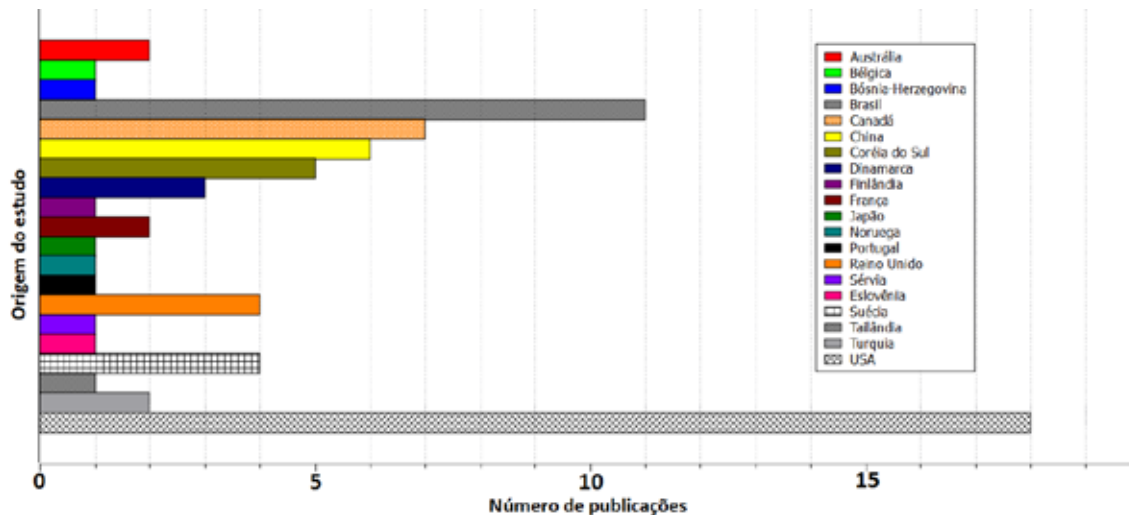


Figura 2. Origem dos distintos estudos sobre o tema 'Madeira Tratada com CCA'.

Fonte: Autor.

A Figura 2 também demonstra que os estudos sobre madeiras tratadas com CCA são comuns e expressivos no Brasil, segundo país que mais publicou sobre o tema. A influência do Brasil no campo de estudo sobre o assunto traz trabalhos de revisão sobre a forma de tratamento, análises de retenção de penetração da substância preservativa na madeira até métodos inovadores de recuperação do resíduo sólido após sua vida útil (MATOS *et al.*, 2020; SANTOS *et al.*, 2017; FERRARI *et al.*, 2016), conforme o que é apresentado no Quadro 1. Tal informação está ligada à legislação existente no país, a qual não impede o uso de materiais tratados com CCA em nenhum tipo de ambiente, diferente do que ocorreu na Europa e EUA nos últimos anos, com isso, o mercado da madeira tratada no Brasil vem crescendo em escala linear positiva, anualmente; atrelado a isso, os estudos que envolvam essa temática também tendem a aumentar.

Quadro 1. Apresentação dos métodos de recuperação e reutilização da madeira tratada após o fim da sua vida útil em campo.

Procedimento	Detalhes do Processo	Aplicação
Eletrorremoção	Consiste na aplicação de uma corrente elétrica envolta de ácidos orgânicos e inorgânicos sob a madeira, possibilitando o desprendimento do cromo, seguido do arsênio e cobre da madeira tratada com CCA	Apenas em escala de bancada e piloto em laboratório
Lavagem ácida	Aplicação de uma solução ácida sob a madeira	Laboratorial
Biorremediação	Fungos com potencial de enzimas ácidas são aplicados sob a madeira mediante uma solução líquida de fermentação	Laboratorial
Produtos à base de madeira	Painéis de madeira do tipo MDP, OSB, dentre outros, são aplicados em misturas com madeiras tradicionalmente usadas para a manufatura dos mesmos	Escala industrial incipiente
Processo Charterm	Queima a alta temperatura	Aplicado em escala industrial na Europa

Isso é explicado pelo fato dos Estados Unidos ser a nação que mais consumiu madeira tratada no mundo, anteriormente às recentes leis que proíbem o uso do CCA, e a previsão de descarte nas próximas décadas (GOSSELIN; ZAGURY, 2020; BATOMÉ *et al.*, 2017). A classificação dos artigos de natureza distinta, apurados nesse estudo sistemático, pode ser observada na Figura 3, a saber: proficuidade da madeira tratada

com CCA (8%), potencial deletério da madeira tratada com CCA (49%), toxicidade da madeira tratada com CCA (10%), recuperação e destinação final de resíduos (23%), e substituição do CCA no tratamento preservativo da madeira (10%), de um total de 73 artigos.

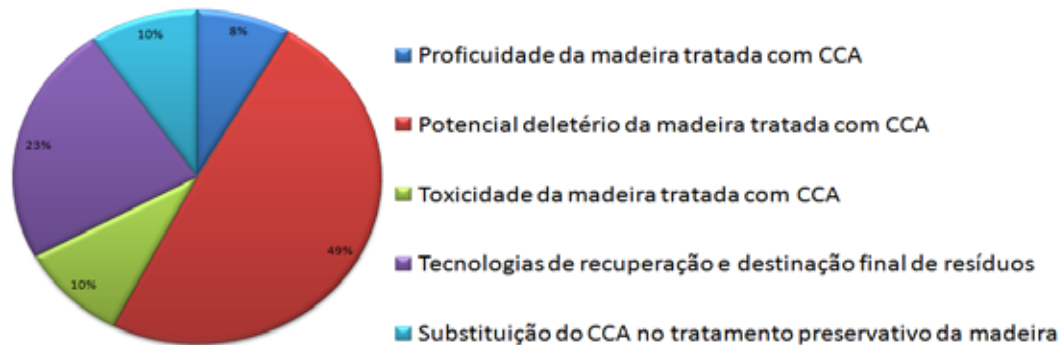


Figura 3. Assuntos abordados em periódico sobre o tema 'Madeira Tratada com CCA'.

Fonte: Autor.

Pode-se perceber que o 'potencial deletério da Madeira Tratada com CCA' é o assunto dominante, correspondendo a quase 50% do total de estudos. A quantidade de estudos sobre o tema tem crescido, mostrando que se trata de uma temática de importância, visto o emprego em larga escala do CCA no tratamento de madeira em países da América Latina (MATOS *et al.*, 2020; SANTOS *et al.*, 2017; KUMPIENE *et al.*, 2016; VIDAL *et al.*, 2015).

Cabe ressaltar também que há um volume considerável de material preservado que está em serviço e deverá ser substituído nos próximos anos, contribuindo para o aumento dos resíduos de madeira tratada e acúmulo de metais pesados em aterros sanitários (KIMA; PARCK, 2020; MOHAJERANI *et al.*, 2018). O Quadro 2 reforça a importância desse tema de estudo, apresentando periódicos que abrangem naturezas distintas de escopo e abordam o assunto em diversas regiões do mundo.

Quadro 2. Caracterização dos periódicos e manuscritos empregados na revisão do tema Madeira Tratada com CCA

(Continua)

Periódico	Origem	Número	SJR	H
Environmental Pollution	Reino Unido	5	1.67	194
Environmental Science & Technology	Estados Unidos	3	2.51	345
Environmental Monitoring and Assessment	Holanda	3	0.62	91
Journal of Industrial Ecology	Estados Unidos	1	1.49	85
Science of the Total Environment	Holanda	13	1.54	205
Environment International	Reino Unido	1	2.69	157
Water, Air and Soil Pollution	Holanda	4	0.55	100
Environmental Science and Pollution Research	Alemanha	6	0.83	82
Green Chemistry	Reino Unido	1	2.52	186
Journal of Environmental Management	Estados Unidos	5	1.21	146
Journal of Environmental Engineering	Estados Unidos	2	0.47	85
Environmental Research	Estados Unidos	1	1.57	113
Soil and Sediment Contamination	Reino Unido	2	0.39	43
Journal of Environmental Health	Estados Unidos	1	0.28	29

(Conclusão)

Periódico	Origem	Número	SJR	H
Journal of Environmental Sciences	Holanda	1	1.02	81
Chemical Engineering Journal	Holanda	1	2.07	172
Scientia Forestalis	Brasil	2	0.46	24
ACS Sustainable Chemistry & Engineering	Estados Unidos	1	1.67	65
Periódico Tchê Química	Brasil	1	0.20	3
Waste Management	Reino Unido	3	1.52	127
Journal of Hazardous Material	Holanda	1	1.96	235
Journal of Cleaner Production	Holanda	1	1.62	150
Journal of Material Cycles and Waste Management	Alemanha	1	0.49	33
Revista Árvore	Brasil	1	0.42	25
Acta Amazonica	Brasil	1	0.40	23
International Biodeterioration & Biodegradation	Holanda	1	1.26	85
Journal of Forestry Research	China	1	0.37	20
Chemosphere	Reino Unido	4	1.45	212
Environmental Technology	Reino Unido	1	0.52	65
Journal of environmental quality	Estados Unidos	1	1.02	150
Procedia Environmental Sciences	Holanda	1	0.00	27
Energy	Reino Unido	1	2.05	158
Journal of Soils and Sediments	Alemanha	1	0.91	59

SJR = Indicador de Fator de Impacto e H = Índice H. (Segundo o *Scimago Journal Ranking*, disponível em www.scimagojr.com, acessado em 05 de março de 2020).

Fonte: Autor.

A Tabela 2 revela que grande parte dos estudos foi publicada (últimos 10 anos) pela revista holandesa *Science of the Total Environment*.

3.1 PROFICUIDADE DA MADEIRA TRATADA COM CCA

As indústrias de madeira preservada geram, aproximadamente, 30 milhões de $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$, utilizando 500.000 toneladas de preservativo anualmente (MOHAJERANI *et al.*, 2018; FERRARINI *et al.*, 2016). Esse produto químico é considerado eficaz e de custo econômico reduzido para preservação da madeira (MATOS *et al.*, 2020; KIMA; PARCK, 2020), e pode ser classificado em três tipos, dependendo da variação de seus componentes (Tabela 1).

Tabela 1. Tipos de formulações comerciais de CCA.

Tipos de CCA	CrO ₃ (%)	CuO (%)	As ₂ O ₅ (%)
A	65,5	18,1	16,4
B	35,3	19,6	45,1
C	47,5	18,5	34,0
Função	Agente fixador	Fungicida	Inseticida/Fungicida

Fonte: adaptado de Matos *et al.* (2020); Ferrarini *et al.* (2016).

A eficiência do tratamento aplicado na madeira é mensurada pela penetração e retenção dos produtos utilizados, garantindo os níveis mínimos recomendados pelas normas técnicas (LANKONE *et al.*, 2019; VIDAL *et al.*, 2015; FERRARINI *et al.*, 2015b). A necessidade do uso de madeira tratada provavelmente tenha sido impulsionada pela escassez de material oriundo de florestas nativas de alta durabilidade natural, sendo preservadas, até o ano de 2010, aproximadamente 400.000.000 m³ de madeira com CCA, poupando a extração de cerca de seis bilhões de árvores nativas (FERRARINI *et al.*, 2016; VIDAL *et al.*, 2015).

No Brasil, o uso de madeira tratada teve início com a importação de 50 mil dormentes da Inglaterra pela Companhia Paulista de Estradas de Ferro (FERRARINI *et al.*, 2016; FERRARINI *et al.*, 2015a). O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) criaram, no ano de 2002, uma instrução normativa conjunta destinada a ordenar as atividades que envolvem produtos químicos preservativos de madeira, bem como a sua importação, produção, comercialização, utilização e destinação final de embalagens (FERRARINI *et al.*, 2016; VIDAL *et al.*, 2015). Já com relação à normatização técnica, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) lançou Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBR). Somado a isso, temos algumas internacionais que se referem à madeira tratada (Quadro 3).

Quadro 3. Legislações regulamentadoras encontradas nos estudos sobre 'Madeiras Tratadas CCA'

LEGISLAÇÃO	NÍVEL	INSTITUIÇÃO	CONTEÚDO
Nº 5 de 1992	Norma	IBAMA	Regulamenta o cadastro, formulação, armazenamento e revenda
7205/2004	Registro	IBAMA	Produto (TANALITH 60% CCA-C)
12.305/2010	Lei	MMA	Política nacional de resíduos sólidos
307 de 2002	Resolução	CONAMA	Gestão dos resíduos da construção civil
2012	Nota Técnica	ANVISA	Nota Técnica sobre a reavaliação toxicológica do ingrediente ativo pentaclorofenol e seus sais
6.232/2013	Norma	ABNT	Penetração e retenção de preservativo em postes de madeira
6.231/1980	Norma	ABNT	Postes de madeira - Resistência à flexão
16.202/2013	Norma	ABNT	Postes de eucalipto preservados para redes de distribuição elétrica
7.190/1997	Norma	ABNT	Projeto de estruturas de madeira
7.511/2013	Norma	ABNT	Métodos de ensaio para dormentes de madeira destinados à via férrea
9.480/2009	Norma	ABNT	Peças roliças preservadas de eucalipto para construções rurais
16.143/2013	Norma	ABNT	Preservação de Madeiras: Sistemas de Categorias de Uso
10.004/2004	Norma	ABNT	Resíduos sólidos
10.005/2004	Norma	ABNT	Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos
10.006/2004	Norma	ABNT	Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos
2008	Documento	USEPA	A Probabilistic Risk Assessment for Children Who Contact CCA-Treated Play sets and Decks
OPP-2003-0250	Nota	USEPA	Notice of Availability of the Preliminary Risk Assessment for Wood Preservatives Containing Arsenic and/or Chromium Reregistration Eligibility Decision
EPA/600/R10/009	Nota	USEPA	Evaluation of the Effectiveness of Coatings in Reducing Dislodgeable Arsenic, Chromium, and Copper from CCA Treated Wood
EPA/600/R05/050	Nota	USEPA	Evaluation of the Effectiveness of Coatings in Reducing Dislodgeable Arsenic, Chromium, and Copper from CCA Treated Wood
EPA/HQ/OPP/349	Nota	USEPA	Pesticides: Regulating Pesticides, Chromated Copper Arsenate (CCA)
EPA/311	Método	USEPA	Procedimento de lixiviação para características de toxicidade

Fonte: Autor.

A produção de madeira tratada chegou a 1,6 milhões de m³ em 2013, tornando o Brasil o maior país usuário do produto na América Latina (MATOS *et al.*, 2020; SANTOS *et al.*, 2017; VIDAL *et al.*, 2015). No Canadá, a estimativa da produção de 2,5 milhões de m³ de resíduos de madeira tratada com CCA e se avalia que houve a geração de 9 milhões de m³ nos Estados Unidos no ano de 2015 (SANTOS *et al.*, 2017; ABPM, 2017).

A madeira tratada pode ser empregada em postes que suportam redes elétricas e de telefonia, mourões para cercas agrícolas, redes de metrô e ferrovias, *decks* residenciais e em parques de recreação (SAFA *et al.*, 2020; MATOS *et al.*, 2020; OHGAMI *et al.*, 2015). Em relação à produção de mourões, não existem estatísticas oficiais, mas estima-se que é o produto de madeira tratada mais utilizado no Brasil (FERRARINI *et al.*, 2016; FERRARINI *et al.*, 2015a).

3.2 POTENCIAL DELETÉRIO DA MADEIRA TRATADA COM CCA

As madeiras tratadas com CCA, amplamente utilizadas em estruturas residenciais e *playgrounds*, representam riscos devido à potencial lixiviação de seus componentes para o meio ambiente (MATOS *et al.*, 2020; KING *et al.*, 2019). A preocupação mundial com as questões de proteção ambiental fez com que formulações contendo sais clorados utilizados na produção do CCA fossem retirados do mercado em países como Estados Unidos, Alemanha, Canadá e Reino Unido, potencializando, assim, a área para o desenvolvimento de estudos com produtos menos danosos ao homem e ao ambiente (KIMA; PARK, 2020; OHGAMI *et al.*, 2015).

Em 2003, Portugal restringiu a utilização do CCA por meio do Decreto-Lei nº 208/2003, segundo o qual a madeira tratada com CCA deve conter dizeres no rótulo sobre a exclusividade do uso para instalações industriais e que o produto contém arsênio (PORTUGAL, 2008). No mesmo ano, a Agência de Proteção Ambiental (EPA), dos Estados Unidos, declarou que as empresas voluntariamente não iriam mais fazer uso do CCA para preservação de madeiras para fins residenciais e com contato humano (GOSELIN; ZAGURY, 2020; FERRARINI *et al.*, 2016).

Ainda em 2003, foi a vez de países como Suécia e Dinamarca seguirem as mesmas restrições que os países anteriores, seguidos da Alemanha, Japão, Indonésia, Austrália, Reino Unido e Noruega (MATOS *et al.*, 2020; FERRARINI *et al.*, 2016). Tal impedimento está relacionado a estudos que comprovaram o potencial tóxico ao ser humano e ao ambiente (KILPI-KOSKI *et al.*, 2019; OHGAMI *et al.*, 2015) causados pelo CCA e, devido a isso, alguns países adotaram medidas restritivas ou de proibição de seu uso (SAFA *et al.*, 2020; GUO *et al.*, 2018).

A restrição à possível alteração na estabilidade dos componentes do CCA, uma vez que, ao longo do tempo, estes podem lixiviar ou volatilizar, acarretando risco ambiental (GOSELIN; ZAGURY, 2020; KIMA; PARK, 2020). Esses estudos relacionam a exposição a efeitos ambientais danosos (KIMA; PARK, 2020; GOSELIN; ZAGURY, 2020).

Considerando a previsão do aumento do fluxo de descarte de resíduos de madeira tratada com CCA, os pesquisadores McIntyre *et al.* (2019) relatam a contaminação de águas pluviais urbanas devido à lixiviação de metais (As, Cu e Zn) de painéis de coberturas prediais na região de Puget Sound, Noroeste do Pacífico. Em seu estudo, os autores consideram que as concentrações de Cu e As sejam oriundas quase que totalmente de madeira tratada com CCA. Como esta madeira usada em estruturas de *playground* tem sido

associada a impactos negativos à saúde e ao meio ambiente, King *et al.* (2019) avaliaram a concentração do componente químico Arsênio (As) no solo superficial de 4 estruturas com 16 e 26 anos de instalação. O estudo demonstrou o acúmulo de As no solo ao redor das estruturas antigas de *playground* e apontou a potencial exposição por contato dérmico das crianças.

3.3 TOXICIDADE DA MADEIRA TRATADA COM CCA

O Arseniato de Cobre Cromatado (CCA) é constituído por trióxido de cromo, óxido de cobre e pentóxido de arsênio, que são compostos preocupantes devido às elevadas toxicidades, podendo apresentar problemas para o meio ambiente e para a saúde (GOSSELIN; ZAGURY, 2020; ROCHA *et al.*, 2016). Estudo realizado por Matos *et al.* (2020) com camundongos mostrou a toxicidade aguda do CCA por exposição em tempos diferentes por meio da avaliação dos rins e fígado, enfatizando o risco potencial da contaminação por CCA nos órgãos vitais.

Na Finlândia, Kilpi-Koski *et al.* (2019) determinaram a biodisponibilidade de metais em solos de campos contaminados com misturas de CCA avaliando a influência sobre a minhoca *Eisenia andrei*, demonstrando a acumulação das espécies químicas presentes no CCA pelos organismos evidenciando seu risco potencial. Na China, como ainda não há restrições do uso de madeiras com CCA, foi realizado um estudo para quantificar as concentrações de As nas madeiras de parques públicos através de um Analisador Portátil de Fluorescência de Raios-X (p-XRF). Os resultados demonstraram que houve uma redução nas concentrações devido ao contato dérmico com a madeira em corrimãos, escadarias de tábuas e diferentes superfícies de passagem (TANG *et al.*, 2015).

Na mesma linha, Gress *et al.* (2016) avaliaram 25 espécies de animais de zoológicos contemplando a quantificação do componente químico As em penas, ovos, alimento, cabelos e espinhos, além do solo coletado dos recintos que geralmente são madeiras tratadas com CCA. O resultado de maior relevância foi relacionado a pelagem dos saguis, onde o valor foi 30 vezes maior do que o de referência, possivelmente pela incapacidade do animal de inativar o metal. Em relação à dose letal, os valores de DL50 para ratos (dose letal para 50% da população testada), nas formulações de CCA mais utilizadas, estão nas faixas de 150 a 400 mg.kg⁻¹, para toxicidade aguda via oral, e de 200 a 1188 mg.kg⁻¹, para via dérmica.

A dose letal para humanos é menor, com valores inferiores entre 1 a 2 mg.kg⁻¹ para algumas formulações (USEPA, 2015). De acordo com Ohgami *et al.* (2015), se os detritos do Grande Terremoto do Leste do Japão em 2011 passarem por um processo de incineração, as madeiras das casas e postes podem conter valores de Cu, Cr e As prejudiciais à vida humana e, ao inalar o material particulado contaminado, este se deposita diretamente nos pulmões.

Cabe ressaltar que o estudo foi realizado em fase de exposição de células e representando 2,1% dos entulhos do terremoto. Por isso, Fernández-Costas *et al.* (2017) destacaram que a madeira tratada com CCA não deve ser incinerada, pois libera produtos químicos a partir da fumaça e particulados.

3.4 TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO E DESTINAÇÃO FINAL DE RESÍDUOS

De acordo com a NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004), a classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes originou, seus constituintes com rejeitos e substâncias cujo impacto à saúde humana e ao meio ambiente é conhecido. Autores como Santos *et al.* (2017) e Ferrarini *et al.*

(2015a) evidenciaram, por meio de ensaios de lixiviação, que, no Brasil, a madeira tratada com CCA pode ser classificada como resíduo Classe I - Perigoso seguindo a NBR 10.004/04 (ABNT, 2004), independente da análise de alburno ou alburno com porções de cerne. Dessa forma, é indispensável a disposição final ambientalmente adequada, não podendo ser descartados conforme os demais resíduos sólidos.

Entretanto, constatações verificadas por Santos *et al.* (2017) relataram que grande parte dos resíduos gerados em cidades brasileiras é destinada a aterros inadequados e a lixões a céu aberto, contribuindo para ampliação dos problemas ambientais e comprometendo a saúde pública da população. Nesse sentido, há um grande risco de lixiviação da substância preservativa, dependendo de fatores como a temperatura, idade da madeira, teor de umidade, método de tratamento utilizado e ambiente de exposição do material (MOHAJERANI *et al.*, 2018; OHGAMI *et al.*, 2015).

Assim, nos últimos anos, as técnicas de remediação da madeira preservada (processo Chartherm; pirólise da madeira; eletrorremoção) receberam considerável atenção às grandes taxas de liberação do cobre, cromo e arsênio do material tratado com CCA. Esses métodos podem diminuir a contaminação nos solos e lençóis subterrâneos, visto que essa madeira vem sendo descartada em aterros sem nenhuma restrição (MOHAJERANI *et al.*, 2018; FERRARINI *et al.*, 2015a).

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 (KIMA; PARK, 2020; ROBEY *et al.*, 2018). Mais ainda, a aplicação dessas técnicas em escala comercial depende de fatores socioeconômicos ligados aos custos financeiros dos processos, necessidade de mão de obra altamente qualificada para execução e a definição por regulamentação de quais atores públicos devem financiar estas ações (SANTOS *et al.*, 2017; FERRARINI *et al.*, 2016).

Atualmente, postes, moirões e outras peças de madeiras tratadas com CCA, quando retiradas de serviço, são inseridos em aterros sanitários quando ocorre o descarte correto, sendo que, por vezes, o material é queimado ilegalmente ou depositado em terrenos baldios. Já a sua reutilização pode se dar pela fabricação de painéis a base de madeira, chapas de madeira-cimento e, fora do Brasil, pelo processo Chartherm, que consiste na queima do material descartado a altas temperaturas, transformando-o em carbono (SANTOS *et al.*, 2017; OHGAMI *et al.*, 2015).

A pirólise da madeira tratada com CCA, seguida da produção e aplicação de carvão ativado, foi proposta por Batomé *et al.* (2017). A reutilização desse material na fabricação de carvão ativado, bem como sua aplicação na adsorção de CO₂, se mostram, até certo ponto, soluções viáveis para minimizar os danos ambientais causados no seu uso. Porém, com a utilização dessa técnica, a volatilização dos metais pesados presentes no CCA, discutidos no presente estudo, deve ser levada em consideração.

Na Flórida, Robey *et al.* (2018) desenvolveram um estudo visando a separação e reciclagem de madeira tratada que possibilitou o reaproveitamento e descarte adequado por meio de melhores práticas de gestão. O método de extração ácida foi utilizado por Ferrarini *et al.* (2016) para remoção da matéria orgânica presente no efluente provindo da descontaminação da madeira tratada com CCA. Após testar diversas metodologias, o melhor rendimento de degradação foi obtido com a técnica de eletrólise com remoções de 97%, 85% e 98% para Cu, Cr e As, respectivamente.

A aplicação dessa técnica vem sendo bastante estudada pelos pesquisadores e, após esse processo, os níveis de toxicidade do material reduziram, permitindo que estes sejam reutilizados na elaboração de

chapas de compensado para a construção civil ou utilizados para produção de energia em fornos industriais (MOHAJERANI *et al.*, 2018; FERNÁNDEZ-COSTAS *et al.*, 2018; FERRARINI *et al.*, 2015b). A problemática de uso dessa técnica está relacionada ao alto custo de aplicação e o uso em escala comercial, e, além disso, os metais contidos na solução aquosa resultante do processo devem passar por uma descontaminação antes de serem liberados ao ambiente (MOHAJERANI *et al.*, 2018; BATOMÉ *et al.*, 2017).

No entanto, quando uma extração química apropriada é realizada, o agente tóxico pode ser removido e, idealmente, recuperado para reutilização; ao mesmo tempo, a madeira limpa após a remediação poderia ser reutilizada, embora alguns estudos apontem a perda de atributos em propriedades físico-mecânicas devido a este tratamento, tais como alterações na parede celular da madeira, devido aos ácidos aplicados no processo, conferindo menor resistência ao material (KIMA *et al.*, 2020; GOSSELIN; ZAGURY, 2020; MOHAJERANI *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2017).

3.5 SUBSTITUIÇÃO DO CCA NO TRATAMENTO PRESERVATIVO DA MADEIRA

A busca por substâncias preservativas não tóxicas, que sejam eficazes no prolongamento da vida útil da madeira e que idealmente não tragam riscos à saúde humana, alternativos ao uso do CCA, tem sido campo de interesse de estudos (GRIGGS *et al.*, 2017; PLATTEN *et al.*, 2016; FERRARINI *et al.*, 2016). Ainda, estudos de fixação do CCA na madeira têm sido desenvolvidos, como o proposto por Fernández-Costas *et al.* (2017), que mostraram o melhoramento da preservação da madeira realizada através de uma enzima (lacase) com o objetivo de abrandar o processo de lixiviação e, posterior a isso, um teste com fungos revelou perdas de massa abaixo de 7%.

Estudos de Guo *et al.* (2018) descrevem o método de proteção da madeira baseado no uso de gel isopropílico de titânio e nitrato de amônio cério (IV), como uma alternativa menos danosa ao ambiente e segura quando comparado aos preservativos tradicionais como o CCA, prolongando a vida útil dos materiais de madeira, particularmente em aplicações externas. Lankone *et al.* (2019) estudaram o tratamento de madeira sob pressão com Azol de Cobre Micronizado (MCA), como substituto ao CCA nos EUA, e concluíram que o produto apresenta baixa probabilidade de induzir liberação de elementos da superfície da madeira, reduzindo as chances de absorção via dérmica por seres humanos.

O uso de revestimentos pressurizados em superfície de madeira, a base de Azol de Cobre Micronizado (MCA) e Azol de Cobre Aquoso (ACA), também é destacado como uma alternativa promissora por Clar *et al.* (2019). Segundo esse estudo, as técnicas não possibilitam lixiviação e/ou transferência dérmica de compostos. Embora existam alternativas mercadológicas para a substituição ao CCA no tratamento preservativo de madeira, a não efetivação da eliminação do produto ainda é uma realidade comercial em muitos países devido à relação *eficácia x custo* do volume de madeira tratada.

4 CONCLUSÕES

A madeira é essencial para muitos fins, como na construção civil e como matéria-prima na geração de energia. A durabilidade da madeira é expandida pelo uso do Aseniato de Cobre Cromatado (CCA), que é o preservativo químico de madeira mais empregado mundialmente. No entanto, o CCA vem sendo banido na

última década de muitos países devido a sua elevada toxicidade. Estudos de natureza distinta, que abordam o tema Madeira Tratada com CCA por meio de linhas de investigação específicas, demonstram o aumento na produção científica sobre o tema na última década, principalmente no assunto 'potencial deletério da madeira tratada com CCA' (50%), e na busca por 'tecnologias de recuperação e destinação final de resíduos' (23%), referindo-se ao CCA.

Porém, haverá muita madeira com resíduos de CCA a ser descartada, devido à substituição de postes de energia no Brasil, trazendo situações desagradáveis ao meio ambiente por ainda não ter cobrança através da legislação. Diferente do Brasil, a madeira com CCA nos EUA e outros países da Europa já foi banida, pelo fato de ser comprovadamente prejudicial ao meio ambiente e saúde, justificando o elevado número de pesquisas sobre o tema no país.

No entanto, o emprego do CCA ainda é expressivo nos países latino-americanos e China, principalmente quando consideradas questões comerciais e de efetividade do produto na preservação da madeira. O Brasil apresenta-se como segundo colocado na produção de estudos sobre o tema 'Madeira Tratada com CCA'.

Assume-se que abordagens ligadas à preservação da madeira, as potenciais contaminações de solos pela lixiviação de compostos, ao descarte do resíduo sólido contaminado em aterros e aos potenciais efeitos da exposição da substância preservativa ao meio ambiente e para o homem e às alternativas de reuso fazem parte desse campo de estudo. Contudo, é preciso que as normas em vigência e leis que pouco abordam o tema sejam revisadas levando por base as pesquisas desenvolvidas. É preciso incentivar a inserção no mercado de tecnologias de recuperação já desenvolvidas, diminuindo o potencial de toxicidade da madeira em reuso ou descarte.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRESERVADORES DE MADEIRA. ABNT publica duas normas técnicas que marcam o início de nova fase do setor de madeira tratada no país, **ABPM**, São Paulo. 2017. Disponível em: <http://www.abpm.com.br/noticia>. Acesso em: 14 out. 2019.

BOTOMÉ, M. L.; POLETTO, P.; JUNGES, J.; PERONDI, D.; DETTMER, A.; GODINHO, M. Preparation and characterization of a metal-rich activated carbon from CCA-treated wood for CO₂ capture. **Chemical Engineering Journal**, v. 321, p. 614-621, 2017.

CLAR, J. G. *et al.* Transformation and release of nanoparticle additives & byproducts from commercially available surface coatings on pressure treated lumber via dermal contact. **Science of The Total Environment**, v. 694, 2019.

DHILLON, G. S.; ROSINE, G. M. L.; KAUR, S.; HEGDE, K.; BRAR, S. K.; DROGUI, P.; VERMA, M. Novel biomaterials from citric acid fermentation as biosorbents for removal of metals from waste chromated copper arsenate wood leachates. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 119, p. 147-154, 2017.

FERNÁNDEZ-COSTAS, C.; PALANTI, S.; CHARPENTIER, J. P.; SANROMÁN, 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.

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.

FERRARINI, S. F.; SANTOS, H. S.; MIRANDA, L. G.; AZEVEDO, C. M.; MAIA, S. M.; CHAVES, E. S.; PIRES, M. Determination of As, Cr, and Cu concentrations in CCA-treated wood poles using acid decomposition in closed flasks, oven heating, and ICP-MS Analysis. **Atomic Spectroscopy**, v. 36, p. 187-195, 2015a.

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, 2015b.

GOES, L. F.; FERNANDEZ, C. Reflexões metodológicas sobre pesquisas do tipo estado da arte: investigando o conhecimento pedagógico do conteúdo. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 17, n. 1, p. 94-118, 2018.

GOSSELIN, M.; ZAGURY, G. J. Metal(loid)s inhalation bioaccessibility and oxidative potential of particulate matter from chromated copper arsenate (CCA) - contaminated soils. **Chemosphere**, v. 238, n. 124557, 2020.

GRESS, J.; SILVA, E.; DE OLIVEIRA, L.; ZHAO, D. Potential arsenic exposures in 25 species of zoo animals living in CCA-wood enclosures. **Science of the Total Environment**, v. 551-552, p. 614-621, 2016.

GRIGGS, J. L.; ROGERS, K. R.; NELSON, C.; LUXTON, T.; PLATTEN, W. E.; BRADHAM, K. D. In vitro bioaccessibility of copper azole following simulated dermal transfer from pressure-treated wood. **Science of The Total Environment**, v. 598, p. 413-420, 2017.

GUO, H.; BACHTIAR, E. V.; RIBERA, J.; HEEB, M.; FRANCIS, W. M. R. Non-biocidal preservation of wood against brown-rot fungi with a TiO₂/Ce xerogel†. **Green Chemistry**, v. 6, 2018.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório IBÁ 2020. IBÁ, São Paulo, 2020, 66p. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2020.

KIMA, J. Y.; OHB, S.; PARKC, 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, n. 121356, 2020.

KING, C. M. D.; DOZIER, C. S.; CAMPBELL, J. L.; CURRY, E. D.; POLLITT, K. J. G. Long-term leaching of arsenic from pressure-treated playground structures in the northeastern United States. **Science of the Total Environment**, v. 656, p. 834-842, 2019.

KILPI-KOSKI, J.; PENTTINEN, O. P.; VÄISÄNEN, A. O.; VAN GESTEL, C. A. M. An uptake and elimination kinetics approach to assess the bioavailability of chromium, copper, and arsenic to earthworms (*Eisenia andrei*) in contaminated field soils. **Environmental Science Pollution Research**, v. 26, n. 15, p. 15095-15104, 2019.

KUMPIENE, J.; NORDMARK, D.; HAMBERG, R.; CARABANTE, I.; SIMANAVICIENÉ, R.; AKSAMITAUSKAS, V. C. Leaching of arsenic, copper and chromium from thermally treated soil. **Journal Environmental Management**, v. 183, n. 3, p. 460-466, 2016.

LANKONE, R. S. *et al.* Copper release and transformation following natural weathering of nano-enabled pressure-treated lumber. **Science of The Total Environment**, v. 668, n. 10, p. 234-244, 2019.

MATOS, R. C.; OLIVEIRA, H.; FONSECA, H. M. A. C.; MOARIS, S.; SHARMA, B.; SANTOS, C.; PEREIRA, M. L. Comparative Cr, As and CCA induced Cytostaticity in mice kidney: A contribution to assess CCA toxicity. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 73, 2020.

MCINTYRE, J. K.; WINTERS, N.; ROZMYN, L.; HASKINS, T.; STARK, J. D. Metals leaching from common residential and commercial roofing materials across four years of weathering and implications for environmental loading. **Environmental Pollution**, v. 255, n. 2, 113262, 2019.