ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Emissão de carbono de aplacados de madeira na construção: uma meta-análise

Carbon emissions of construction wood panels: a meta-analysis

Manuele Regina Harnisch
Universidade Federal da Integração Latino-Americana | Foz do Iguaçu | Brasil | manueleharnisch@gmail.com
Katia Regina Garcia Punhagui
Universidade Federal da Integração Latino-Americana | Foz do Iguaçu | Brasil | katia.punhagui@unila.edu.br

Resumo

Ampliar o uso de biomateriais na construção é uma estratégia para reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE), pois eles absorvem carbono da atmosfera e o armazenam em sua biomassa. Porém, na construção convencional no Brasil majoritariamente se usa a madeira em fins transitórios. Alguns produtos, como os aplacados empregados em fôrmas para concretagem, possuem adesivos químicos que afetam sua pegada de carbono e reduzem seus benefícios ambientais. Assim, este trabalho objetivou avaliar o impacto dos adesivos químicos nas emissões de GEE dos aplacados de madeira usados na construção. Para isso, realizou-se uma meta-análise com dados secundários extraídos de artigos sobre Avaliação do Ciclo de Vida, com a qual verificou-se que de 10% a 50% das emissões de GEE do painel compensado e *oriented strand board* (OSB) referem-se aos químicos. Tais resultados, evidenciam a necessidade de discussão sobre o real impacto do uso de biomateriais na construção brasileira, considerando os químicos aderidos que muitas vezes são ignorados devido à baixa quantidade empregada por volume de produto. Com isso, e a ampliação dos resultados para mais produtos madeireiros, espera-se contribuir com a discussão sobre os adesivos químicos aplicados à madeira, com estudos estratégicos para a mitigação de GEE pelo uso de biomateriais, e com o incentivo à geração de indicadores ambientais dos produtos nacionais.

Palavras-chave: Produtos de madeira. Aplacados de madeira. Materiais de construção. Pegada de carbono. Avaliação do Ciclo de Vida.

Abstract

Expanding the use of biomaterials in construction is a strategy to reduce GHG emissions, since they absorb carbon from the atmosphere and store it in their biomass. Within the traditional construction system in Brazil most wood has transitory uses. Some products, such as wood panels used as concrete formworks, have chemical adhesives that can affect their carbon footprint and reduce environmental benefits. Hence, this paper aimed to assess the impact from the chemical adhesives of wood products in the GHG emissions. Therefore, a meta-analysis with

Como citar:
HARNISCH, M. R.; PUNHAGUI, K. R. G. Emissão de carbono de aplacados de madeira na construção: uma meta-análise. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

secondary data from wood panels Life Cycle Assessment articles was conducted. As a result, it was verified that from 10% to 50% of GHG emissions of plywood and Oriented Strand Board (OSB) are related to the chemical components. These results demonstrate the necessity of discussing the real impact of using biomaterials in the Brazilian construction, as their chemicals are in many studies ignored due to the low quantity used per product's volume. Furthermore, expanding this discussion to other wood products may contribute with the reduction of GHG emissions through the use of wood and encourage the creation of environmental indicators of national products.

Keywords: Wood products. Wood panels. Building materials. Carbon footprint. Life cycle assessment.

INTRODUÇÃO

As árvores absorvem carbono da atmosfera através da fotossíntese e o armazenam em sua biomassa [1], podendo ser posteriormente transformadas em produtos de madeira e atuar como estoque temporário de carbono ao longo do seu ciclo de vida [2,3]. Assim, aumentar o uso de biomateriais pode ser uma estratégia para reduzir os gases de efeito estufa (GEE) da atmosfera [4] e desacelerar a crise climática, dado que esses materiais têm menores emissões e demanda de insumo energético em sua produção [5,6].

No entanto, sistemas industrializados em madeira como o *wood frame* e *mass timber* ainda estão em fase de implementação no Brasil [7]. O sistema construtivo mais popular no país, que representa 95,5% das residências [8], é em estrutura em concreto armado moldado *in loco* com envoltória em alvenaria de blocos. Nele, a maior parte da madeira tem usos transitórios, como fôrmas, plataformas de proteção, escoramentos, etc [9]. Oliveira (2022) identificou que apenas 17,4% da madeira nesse sistema tem fins permanentes (telhados, portas, pisos, etc) e metade (51,5%) se torna resíduo no decorrer da obra [10].

A madeira por si só é um material com forte apelo ambiental, e quando proveniente de florestas sustentáveis pode ser considerada neutra em carbono, pois emite no final da vida a mesma quantidade de carbono sequestrado na floresta [1,11]. Porém, para tornar-se material de construção, passa por transformações e transportes [11] que podem interferir nas vantagens ambientais [12].

É o caso dos aplacados de madeira mais utilizados em obra: o *oriented strand board* (OSB), usado tanto no *wood frame* quanto em tapumes ou estruturas temporárias [13]; e os painéis compensados, usados em fôrmas. Ainda que correspondam a apenas cerca de 5% da madeira em obras convencionais [10], eles requerem em sua fabricação adesivos químicos de origem fóssil [14], que podem aumentar as emissões de carbono. Devido à baixa quantidade de painel consumido e de cola por volume de material, as implicações dos químicos são por vezes ignorada.

Assim, esse trabalho visa estimar a contribuição dos adesivos químicos na emissão de carbono dos produtos aplacados de madeira comumente usados em obras nacionais (compensado e *oriented strand board*).

MÉTODO

Uma maneira de avaliar impactos ambientais de produtos é através da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), estimando as emissões dos GEE, normalmente expresso em kg de CO_2 equivalente ($kgCO_{2\text{-}eq}$) por uma unidade funcional [15]; adotada para este estudo como 1 m³ de produto.

Assim, conduziu-se uma revisão de literatura de estudos ACV dos produtos aplacados de madeira usados na construção, sendo eles: painel compensado (*plywood*) e painel de tiras de madeira orientada (*oriented strand board* - OSB). A busca por estudos foi dividida em duas partes: (a) revisão sistemática da literatura; complementada por (b) busca exploratória; especificadas no **Erro! Fonte de referência não encontrada.** para cada artigo selecionado. Na parte (a), a busca foi conduzida na base de dados SCOPUS, contendo os seguintes termos:

- *((greenhouse gases emission) OR (carbon footprint) OR (life cycle assessment) OR (life cycle inventory)) AND ((wood panel) OR plywood OR "oriented strand board" OR OSB)* Após aplicar filtros para restringir o tipo de documento para artigos e o idioma para inglês, a busca retornou 235 documentos, cuja seleção deu-se através da leitura do título e, quando necessário, do resumo. Quando ambos estivessem dentro do escopo do presente estudo (ACV de aplacados de madeira), o artigo completo era lido e poderia ser selecionado ou descartado conforme os seguintes critérios:
- Excluía-se o artigo quando:
  - Estivesse fora do escopo deste estudo;
  - O produto avaliado fosse produzido apenas em escala laboratorial, ou fosse uma edificação ou componente construtivo (com mais de um tipo de material);
  - Não fosse possível converter a unidade funcional para m³ ou emissões para $kgCO_{2\text{-}eq}$.

Durante esta etapa, encontrou-se uma ACV de painéis compensados na China, limitada de berço a portão, com emissão de 18.800 $kgCO_{2\text{-}eq}/m^3$ [16], valor 26 vezes maior que a média das emissões apresentadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**; e se incluído na amostra, estaria mais de 5 vezes o desvio padrão acima da média. Além disso, o valor é muito maior que os outros estudos no mesmo país estimaram [17,18], e como não há Inventário de Ciclo de Vida não foi possível investigar a razão para tal elevada emissão, que foi considerada um valor atípico (*outlier*) e excluída desta meta-análise, resultando na seleção de 11 artigos nesta parte (a).

Na segunda parte (b), buscou-se mais estudos nas referências e citações dos artigos anteriormente selecionados, considerando os mesmos critérios de exclusão de (a). Conduziu-se também uma busca em bancos de teses e dissertações brasileiros; e no Google por Declarações Ambientais de Produto (EPD). Nesta etapa, 5 estudos foram selecionados.

No **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são apresentados os 16 documentos selecionados, cuja ACV se limita do berço ao portão (*cradle-to-gate*), reportando assim emissões da extração de matérias-primas, seu transporte, e o processamento do material na fábrica [11]. Existem referências que se repetem pois alguns estudos

compararam diferentes características de um produto ou avaliaram os dois tipos de aplacado.

Quadro 1: Estudos selecionados de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), do berço ao portão da fábrica, de aplacados de madeira compensada (C) e *Oriented Strand Board* (OSB)

Casos	Método de busca	País ou região	Densidade (kg/m³)	Madeira	Adesivo	Tratamento	Ref.
C1[a]	a	Europa	-	Beech	UF	-	[19]
C2[a]	a	Europa	-	Beech	MF	-	[19]
C3	a	Europa	-	Hardwood	PF	-	[12]
C4	a	França	-	Hardwood	PU	-	[12]
C5	a	França	-	Pinus pinaster	PF	-	[12]
C6	b	Espanha	550	Pinus radiata	-	-	[20]
C7	b	China	541	-	PF	-	[17]
C8	a	China	613	-	MUF; UF	-	[18]
C9	a	Brasil	-	-	-	-	[21]
OSB1	a	Irlanda	-	-	UF	-	[22]
OSB2	a	Alemanha	573	-	MDI	-	[23]
OSB3	a	Eslováquia	640	-	MDI	-	[3]
OSB4	b	E.U.A.	649	Pinus (taeda e elliottii)	MDI; PF	-	[24]
OSB5	a	E.U.A.	649	-	MDI; PF	-	[25]
OSB6	b	Canadá	-	Trembling aspen	F	-	[2]
OSB7	a	China	608	-	MDI	-	[26]
OSB8	a	China	620	-	MDI	-	[26]
OSB9	a	China	680	-	MDI	-	[26]
OSB10	a	China	637	-	MDI	-	[18]
OSB11	a	Brasil	780	Eucalyptus ssp.	PU-bio[b]	Termal	[27]
OSB12	a	Brasil	780	Softwood	MDI	Piretroide	[27]
OSB13	a	Brasil	600	Pinus (taeda e elliottii)	MDI	Piretroide	[27]
OSB14	b	Brasil	600	Pinus	MDI	Termiticida[c]	[28]

-: inexistente ou sem especificação. a: não inclui transporte. b: adesivo de poliuretano derivado do óleo de mamona. c: termiticida não especificado. PF: fenol-formaldeído. PU: poliuretano. UF: ureia-formaldeído. MF: melamina-formaldeído. MUF: melamina ureia-formaldeído. MDI: metileno difenil diisocianato. F: formaldeído. Fonte: o autor

A extração de dados de cada estudo ocorreu de forma manual e foi organizada em planilhas no programa Excel. Quando necessário, convertiam-se as unidades para uniformizar a unidade funcional dos produtos em 1 m³ e emissões em $kgCO_{2\text{-}eq}/m^3$. As emissões dos GEE, quando necessário, eram convertidas usando a calculadora de equivalências da Agência de Proteção Ambiental Americana [29].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

MADEIRA COMPENSADA

Conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, as emissões dos painéis compensados de C3 a C9 variaram entre 513,0 – 1.585,3 $kgCO_{2\text{-}eq}/m^3$ (média 799,8; mediana 623,6). Ao acrescentar os valores de C1 e C2, que não contabilizam o transporte das matérias-primas, as emissões totais variaram entre 391,8 – 1.585,3

$kgCO_{2\text{-eq}}/m^3$ (média 722,9; mediana 538,0). A emissão do adesivo foi reportada de isoladamente apenas em C9, e representou 21% da emissão desse produto (112,9 $kgCO_{2\text{-eq}}/m^3$).

Tabela 1: Consumo de adesivos e emissão de carbono da madeira compensada

Casos	Consumo de adesivo[a]		Emissões (kgCO2-eq/m³)			
	kg/m³	kg/kg (%)	Adesivo[b]	Transporte[b]	Total sem transporte	Total com transporte
C1[c] [19]	UF: 64,8	11,4%[e]	-	-	391,8	-
C2[c] [19]	MF: 64,8	11,4%[e]	-	-	515,1	-
C3 [12]	-	-	-	-	-	1585,3
C4 [12]	-	-	-	-	-	902,0
C5 [12]	-	-	-	-	-	902,0
C6 [20]	Genérico: 19,3[d]	3,5%	-	-	-	535,0
C7 [17]	PF: 80,3	14,8%	-	-	-	513,0
C8 [18]	MUF: 80,0; UF: 16,0;	15,7%	112,9 (21,0%)	10,8 (2,0%)	527,2	538,0
C9 [21]	-	-	-	-	-	623,6
Média	**-**	**11,3%**	**-**	**-**	**478,0**	**799,8**
Mediana	**-**	**14,8%**	**-**	**-**	**515,0**	**623,6**

-: inexistente ou sem especificação. a: massa de adesivo consumido por volume e massa de painel. b: emissões apresentadas em % entre parênteses em relação a emissão total. c: não inclui emissões devido de transporte. d: adesivo não especificado. e: como não há densidade especificada pelos autores, considerou-se a densidade média da madeira compensada a partir do **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (568 kg/m³) para determinar o consumo. Fonte: o autor.

Como mencionado, os casos C1 e C2 não incluem as emissões do transporte das matérias-primas. Essa é uma etapa de grande variabilidade devido a heterogeneidade das distâncias e meios de transporte, e está ligada ao consumo de combustíveis fósseis, que contribui com a pegada de carbono final do produto [11]. Lao e Chang (2023) analisaram a produção de 4 tipos de aplacados de madeira e estimaram as emissões devido ao transporte entre 1% e 18% das emissões totais [18], que condiz com a variação encontrada neste estudo (entre 2% e 39% considerando ambos painéis analisados).

A espécie de árvore da qual a madeira foi extraída também influencia na pegada de carbono dos produtos madeireiros. No trabalho de Pommier et al. (2016), os autores fizeram uma análise de uma madeira dura genérica (*hardwood*) dos casos C3 e C4 que foi simulada conforme os dados da base de dados Ecoinvent; e uma madeira de Pinus (*softwood*) usada em C5 [12]. Os autores perceberam que o Pinus é 30% menos emissivo, e por ser proveniente de florestas plantadas oferece vantagens em relação à captura de gás carbônico [19] e à matéria prima local, reduzindo distâncias de transporte [12].

Nos casos C4 e C5, os produtos emitem a mesma quantidade de GEE, ainda que apresentem diferenças no tipo de madeira e cola, sendo que C4 usa a madeira dura genérica e adesivo poliuretano (PU), e C5 usa Pinus e adesivo fenol-formaldeído (PF). Como comentado, o Pinus apresenta emissões menores que a madeira dura genérica. Em relação aos adesivos, o PU é menos tóxico e cerca de 24% menos emissivo que o PF [12,19], e ainda que seja mais caro, tem um bom desempenho de colagem [30,31].

Ainda relacionado aos adesivos, é possível comparar o C1 que usa ureia-formaldeído (UF) e é 30% menos emissivo que o C2, que usa melamina-formaldeído (MF). Segundo Vaňová e Štefko (2021), o adesivo MF é 72% mais emissivo que UF [19], e de acordo com Wilson (2010), a variabilidade entre a pegada de carbono das colas fenólicas PF, UF e MUF chega a 34%, sendo PF a de menor emissão entre elas [32]. No entanto, ainda que tais aspectos ambientais dos adesivos sejam comparados, sua escolha deve satisfazer a função do aplacado. A resina UF tem baixa resistência a água e é geralmente usada em aplicações interiores, MUF em interiores com umidade ou exteriores, enquanto PF é recomendada para aplicações exteriores [14,33].

PAINÉIS OSB

Em relação aos painéis OSB, conforme resultados da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, as emissões variam entre 114,8 – 727,9 $kgCO_{2\text{-}eq}/m^3$ (média 322,7; mediana 289,3), enquanto a contribuição dos adesivos na emissão total foi de 10,5% - 50,3%.

Tabela 2: Consumo de adesivos e emissão de carbono dos painéis OSB

Casos	Consumo de adesivo[a]		Emissões ($kgCO_{2\text{-}eq}/m^3$)			
	kg/m^3	kg/kg (%)	Adesivo[b]	Transporte[b]	Total sem transporte	Total com transporte
OSB1 [22]	-	-	82,5 (35,0%)	-	-	235,6
OSB2 [23]	MDI: 21,1; MUF: 9,7	5,4%	160,0 (50,3%)	6,4 (2,0%)	311,6	318,0
OSB3 [3]	-	-	-	-	-	377,4
OSB4 [24]	MDI: 4; PF: 21,7	4,0%	-	-	-	289,6
OSB5 [25]	MDI: 4,2; PF: 21,8	4,0%	-	-	-	289,0
OSB6 [2]	-	-	-	-	-	124,2
OSB7 [26]	MDI: 14,7	2,4%	48,3 (10,5%)	92,1 (20,1%)	366,8	458,9
OSB8 [26]	MDI: 22,9	3,7%	75,3 (15,2%)	94,0 (19,0%)	401,7	495,7
OSB9 [26]	MDI: 53,3	7,4%	174,9 (24,0%)	111,2 (15,3%)	616,7	727,9
OSB10 [18]	MDI: 30	4,7%	99,4 (18,0%)	99,4 (18,0%)	452,6	552,0
OSB11 [27]	PU: 70,9	9,1%	44,1 (28,0%)	-	-	157,5
OSB12 [27]	MDI: 18,3	2,3%	120,2 (48,0%)	-	-	250,4
OSB13 [34]	MDI: 14,7	2,5%	48,3 (38,0%)	2,5 (2,0%)	124,5	127,0
OSB14 [28]	-	-	29,9 (26,1%)	44,8 (39,0%)	70,02	114,8
Média	**-**	**4,5%**	**88,3**	**64,3**	**334,9**	**322,7**
Mediana	**-**	**4,0%**	**78,9**	**92,1**	**366,8**	**289,3**

-: inexistente ou sem especificação. a: massa de adesivo consumido por volume e massa de painel. b: emissões apresentadas em % entre parênteses em relação a emissão total. Fonte: o autor.

O OSB9 consumiu a maior quantidade de MDI e apresentou maior emissão devido ao adesivo entre os produtos analisados. Além disso, o OSB9 é o produto de maior densidade no trabalho de Lao, Duan e Li (2023) quando comparado aos outros dois produtos analisados (OSB7 e OSB8) [26]. Segundo os autores, quanto maior a densidade do produto, maior o consumo de matéria prima, tanto de adesivo quanto de madeira; e maiores as emissões de carbono.

Apesar disso, o OSB12 tem densidade maior que o OSB9 e usa uma quantidade de MDI quase 3 vezes menor, emitindo 31% menos $CO_{2\text{-}eq}$. Tal fato pode relacionar-se ao tipo

e densidade da madeira utilizada, mas abre margem para investigar a possibilidade de redução do consumo de adesivo.

Como observado do **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, o adesivo mais utilizado mostrou-se ser o MDI, representando uma média de 4% da massa do aplacado. Nos Estados Unidos o OSB leva dois tipos de adesivo, pois normalmente o PF é usada para adesão das tiras das camadas superficiais, enquanto MDI é usado nas camadas centrais [34], pois é mais caro e pode deixar uma superfície pegajosa, que prejudica o processo de prensagem [35,36]. O OSB11 também apresenta dois tipos de adesivo, mas neste caso é apenas representativo da média dos diversos produtos estudados na elaboração da ACV, sendo usado na prática apenas um tipo [23].

No OSB11 [27], os autores propuseram o uso de um adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona, cujo desempenho mecânico é similar ao dos adesivos fenólicos [37] mas tem vantagem pois exige menor tempo de cura [38]. Essa substituição resultou em uma redução de 76,1 $kgCO_{2\text{-}eq}/m^3$ ou 30% das emissões totais do OSB12, que é tratado no mesmo artigo e usa MDI como adesivo.

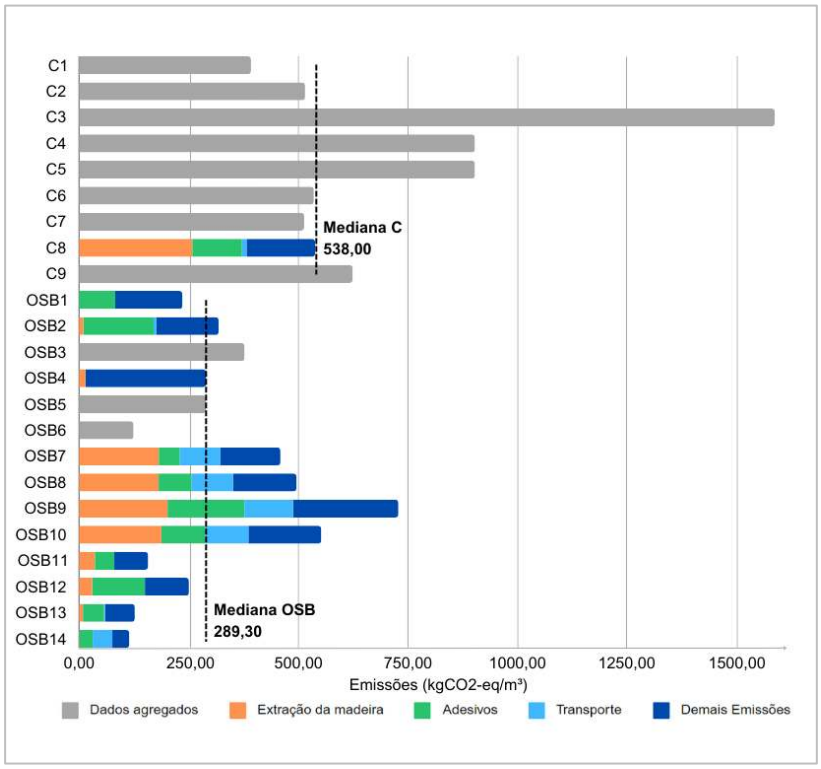
Um tratamento térmico foi proposto por Sugahara et al. (2024) em OSB11, comparando-o com o químico piretroide (OSB12) [27], a fim de evitar o uso de químicos preservantes e usar apenas fornos elétricos para o tratamento. Como resultado, houve um acréscimo no consumo de energia elétrica em 4,2 kWh/m^3, elevando as emissões devido a eletricidade em 2,3 $kgCO_{2\text{-}eq}/m^3$. Ainda assim, essa emissão é menor que a do piretróide, dando indicativos que o tratamento térmico pode ser benéfico do ponto de vista ambiental, desde que tenha a mesma eficiência na preservação da madeira.

Vale ressaltar que esses valores podem variar de cenário a cenário, pois mudanças na matriz energética impactam a pegada de carbono da eletricidade [4,12]. Energia provinda de fontes renováveis é vantajosa do ponto de vista ambiental [2], como no caso do OSB4, que tem baixa emissão e é produzido com matriz energética composta de 99% hidroeletricidade. A exemplo, Murphy, Devlin e McDonnell (2015) constataram que aumentando as fontes de energias renováveis de 19% (matriz energética na Irlanda em 2012) para 37% (estimativa para 2020), as emissões do OSB reduziriam em 7,7% [22].

DISCUSSÃO GERAL

Dos resultados mostrados na Figura 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**percebe-se uma grande variação, ainda que todos os casos considerem o limite do ACV como do berço ao portão. Isso porque os estudos abrangem diversos países, cada qual com suas variáveis. Adicionalmente, cada produto tem suas próprias características, suposições e incertezas, como já comentado sobre a influência do tipo de madeira, adesivo, tratamento, densidade do produto, transporte e matriz energética.

Figura 1: Emissões dos aplacados compensado (C) e *Oriented Strand Board* (OSB)



Fonte: o autor

A maior parte da madeira em obras tradicionais no Brasil tem fins transitórios, e em geral esse material não é reutilizado devido as características únicas de projeto que dificultam a repetição de fôrmas de mesma medida [10]. Assim, mesmo que a madeira seja um estoque de carbono, seus benefícios são diminuídos dado a quantidade e tempo de uso, e considerá-los nas aferições de impactos ambientais das edificações torna-se relevante. Essa meta-análise revela que as emissões de CO_2 não são desconsideráveis e os impactos dos químicos tampouco, abrindo espaço para investigar também os demais fatores contribuintes na emissão de carbono de produtos madeireiros.

Ademais das questões relacionadas ao carbono, as resinas também trazem outras problemáticas, como a emissão de gases voláteis durante a manufatura do produto, que pode trazer riscos à saúde [39]. Também, o pouco tempo de uso e baixa taxa de reutilização dos aplacados contribui com a geração de resíduos, outro problema no contexto brasileiro, pois a maior parte dos resíduos de construção e demolição gerados no país são descartados de forma irregular [40,41].

As questões relativas ao uso e fim de vida dos aplacados não foram abordadas nesta meta-análise, mas são necessárias para futuras discussões. A depender da destinação final, a madeira pode trazer alguns ganhos ambientais, como no caso de ser incinerada para geração de calor e substituição de outros combustíveis fósseis; ou prejuízos, como por exemplo em aterros onde pode ocorrer a lixiviação dos químicos inerentes aos produtos de madeira [11] e consequente contaminação do solo e águas subterrâneas [42,43].

CONCLUSÕES

Com este trabalho verificou-se que os adesivos dos aplacados compensado e OSB, do berço a portão, representam de 10,5 - 50,3% das emissões dos produtos, que variam entre 114,8 - 1585,3 $kgCO_{2\text{-}eq}/m^3$ (mediana: 458,9). Esse valor destaca como o processamento da madeira pode influenciar na sua pegada de carbono e no conceito de neutralidade muitas vezes empregado de forma não discriminante, e torna preocupante o uso de tais produtos em situações de curto ciclo de vida, como é o caso de aplacados usados como apoio ao sistema construtivo tradicional no Brasil.

Os resultados indicam ainda, que ao contabilizar os impactos ambientais de obras convencionais, é mandatório que se considerem as implicações da madeira usada de forma transitória. Assim, com este estudo espera-se contribuir com a discussão a respeito dos impactos que os componentes químicos dos produtos de madeira têm na sua pegada de carbono, instigando a busca por estratégias que possam reduzir suas afetações ambientais negativas, e também contribuindo com o desenvolvimento da pesquisa em mitigação dos GEE do setor da construção, e incentivar a geração de indicadores ambientais de produtos nacionais.

AGRADECIMENTOS

As autoras expressam seu agradecimento à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e à Universidade Federal de Integração Latino-Americana (UNILA) pelo apoio financeiro nessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

[1] NUNES, L. J. R.; MEIRELES, C. I. R.; GOMES, C. J. P.; RIBEIRO, N. M. C. A. Forest contribution to climate change mitigation: Management oriented to carbon capture and storage. **Climate**, v. 8, n. 2, fev. 2020. DOI: 10.3390/cli8020021.

[2] LAURENT, A. B.; MENARD, J. F.; LESAGE, P.; BEAUREGARD, R. Cradle-to-Gate Environmental Life Cycle Assessment of the Portfolio of an Innovative Forest Products Manufacturing Unit. **Bioresources**, v. 11, n. 4, p. 8981–9001, 2016. Disponível em: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/cradle-to-gate-life-cycle-assessment-of-the-portfolio-of-an-innovative-forest-products-manufacturing-unit/. Acesso em: 24 jul. 2024.

[3] VAŇOVÁ, R. Influence of carbon accounting on assessment of wood-based products. **Acta Facultatis Xylologiae Zvolen**, v. 63, n. 2, p. 143–152, 2021. DOI: 10.17423/afx.2021.63.2.12.

[4] BOLIN, C. A.; SMITH, S. T. Life cycle assessment of borate-treated lumber with comparison to galvanized steel framing. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 6–7, p. 630–639, abr. 2011. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.12.005.

[5] J HART, J.; POMPONI, F. More timber in construction: Unanswered questions and future challenges. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 8, 1 abr. 2020. DOI: 10.3390/SU12083473.

[6] SATHRE, R.; GUSTAVSSON, L. Using wood products to mitigate climate change: External costs and structural change. **Applied Energy**, v. 86, n. 2, p. 251–257, 2009. DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.04.007.

[7] NETO, C. C.; TAKATA, A.; SILVA, V. A. N. The first mass timber building in Brazil. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 2023, Oslo. DOI: 10.52202/069179-0548.

[8] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Tabela 6822: Domicílios e Moradores, por material predominante nas paredes**. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6822#resultado. Acesso em: 23 abril 2024.

[9] OLIVEIRA, C. G.; MORAES, E. S.; ORLANDINI, L. C.; POSSAN, E.; PUNHAGUI, K. R. G. Caracterização do Consumo de Madeira para Execução de Sistema Estrutural em Concreto Armado. **Mix Sustentável**, v. 8, n. 4, p. 119–131, 2022. DOI: https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2022.v8.n4.119-131.

[10] OLIVEIRA, C. G. **Fluxo de madeira na execução de construções habitacionais em concreto armado moldado no local**. 2022. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.

[11] CHEN, L.; ZHANG, Y.; CHEN, Z.; DONG, Y.; JIANG, Y.; HUA, J.; LIU, Y.; OSMAN, A. I.; FARGHALI, M.; HUANG, L.; ROONEY, D. W.; YAP, P. S. Biomaterials technology and policies in the building sector: a review. Environmental Chemistry **Letters. Environmental Chemistry Letters**, v. 22. n. 2, p. 715 – 750, jan. 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10311-023-01689-w.

[12] POMMIER, R.; GRIMAUD, G.; PRINÇAUD, M.; PERRY, N.; SONNEMANN, G. LCA (Life Cycle Assessment) of EVP - Engineering veneer product: Plywood glued using a vacuum moulding technology from green veneers. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, p. 383–394, Jun. 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.02.130.

[13] ZENID, Geraldo José. **Madeira**: uso sustentável na construção civil. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2009. Disponível em: https://wwfbrnew.awsassets.panda.org/downloads/manual_madeira.pdf. Acesso em: 24 jul. 2024.

[14] GONÇALVES, D.; BORDADO, J. M.; MARQUES, A. C.; SANTOS, R. G. Non-formaldehyde, bio-based adhesives for use in wood-based panel manufacturing industry—a review. **Polymers**, v. 13, n. 23, dez. 2021. DOI: 10.3390/polym13234086.

[15] ASDRUBALI, F.; GRAZIESCHI, G.; RONCONE, M.; THIEBAT, F.; CARBONARO, C. Sustainability of Building Materials: Embodied Energy and Embodied Carbon of Masonry. **Energies**, v. 16, n. 4, fev. 2023. DOI: 10.3390/en16041846.

[16] JIA, L.; CHU, J.; MA, L.; QI, X.; KUMAR, A. Life cycle assessment of plywood manufacturing process in China. **International Journal of Environmental Research and Public Health***,* v. 16, n. 11, jun. 2019, DOI: 10.3390/ijerph16112037.

[17] IVL Swedish Environmental Research Institute. **Environmental Product Declaration (EPD) of BASIC Film-faced Plywood**. [*S.l.*], 2023. Disponível em: https://pim.starkgroup.dk/media/t4qpygqe/epd-basic-film-faced-plywood-2023.pdf?rnd=133233479976830000. Acesso em: 24 jul. 2024.

[18] LAO, W.-L.; CHANG, L. Greenhouse gas footprint assessment of wood-based panel production in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 389, p. 136064, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136064.

[19] VAŇOVÁ, R.; ŠTEFKO, J. Assessment of selected types of the structural engineered wood production from the environmental point of view. **Acta Facultatis Xylologiae Zvolen**, v. 63, n. 2, p. 117–130, 2021. DOI: 10.17423/afx.2021.63.2.10.

[20] GRUPO GARNICA PLYWOOD, S.A.U. Environmental Product Declaration plywood panels: laudio form, laudio wire. [*S.l.*], 2023. Disponível em:

[21] SAADE, M. R. M.; DA SILVA, M. G.; GOMES, V.; FRANCO, H. G.; SCHWAMBACK, D. LAVOR, B. Material eco-efficiency indicators for brazilian buildings. **Smart and Sustainable Built Environment**, v. 3, n. 1, p. 54–71, 13 mai. 2014. DOI: 10.1108/SASBE-04-2013-0024.

[22] MURPHY, F.; DEVLIN, G.; MCDONNELL, K. Greenhouse gas and energy based life cycle analysis of products from the Irish wood processing industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 92, p. 134–141, 1 abr. 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.01.001.

[23] DIEDERICHS, S. K. 2010 status quo for life cycle inventory and environmental impact assessment of wood-based panel products in Germany. **Wood and Fiber Science**, v. 46, n. 3, p. 340–355, 2014.

[24] PUETTMANN, M.; ONEIL, E.; KLINE, E.; JOHNSON, L. Cradle to Gate Life Cycle Assessment of Oriented Strandboard Production from the Southeast. **CORRIM**. 2012.

[25] KLINE, D. E. Gate-to-gate life-cycle inventory of oriented strandboard production. **Wood and Fiber Science**, v. 37, n. Corrim Special Issue, p. 74–84, 2006.

[26] LAO, W. L.; DUAN, X. F.; LI, X. L. Comparison on greenhouse gas footprint of three types of oriented strand board manufacturing process in China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 32, p. 78793–78801, 1 jul. 2023. DOI: 10.1007/s11356-023-28003-z.

[27] SUGAHARA, E. S.; DIAS, A. M. A.; BOTELHO, E. C.; DIAS, A. M. P. G.; de CAMPOS C. I. Environmental Evaluation of Experimental Heat-treated Oriented Strand Board. **Bioresources**, v. 19, n. 1, p. 732–750, 1 fev. 2024. DOI: 10.15376/BIORES.19.1.732-750.

[28] FISCHER A. C. **Avaliação do ciclo de vida energético e emissões de CO_2 dos materiais de madeira aplicados à prefabricação de vedações verticais em Wood Frame para o contexto brasileiro**. 2020. 207 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

[29] United States Environmental Protection Agency. **Greenhouse Gas Equivalencies Calculator**. Disponível em: https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator#results. Acesso em: 23 abril 2024.

[30] DAS, S.; GAŠPARÍK, M.; SETHY, A. K.; KYTKA, T.; KAMBOJ, G.; REZAEI, F. Bonding performance of mixed species cross laminated timber from poplar (Populus nigra L.) and maple (Acer platanoides L.) glued with melamine and PUR adhesive. **Journal of Building Engineering**, v. 68, 1 jun. 2023. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.106159.

[31] SCIOMENTA, M.; PAOLETTI, A.; STAMOPOULOS, A. G. Experimental investigation of the mode I fracture toughness behaviour of timber adhesive joints: The synergistic effect of the adhesive type and the bondline thickness. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, v. 130, p. 103652, 2024. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2024.103652.

[32] WILSON, J. B. Life-cycle inventory of formaldehyde-based resins used in wood composites in terms of resources, emissions, energy and carbon. **Wood and Fiber Science**, v. 42, n. CORRIM Special Issue, p. 125–143, 2010.

[33] BOCKEL, S. **Structural bonding of European beech wood (Fagus sylvatica L.) with polyurethane adhesives**. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais e Engenharia de Processos) – Universidade de Hamburgo, Hamburgo, 2020.

[34] FERRO, F. S.; SILVA, D. A. L.; ROCCO LAHR, F. A.; ARGENTON, M.; GONZÁLEZ-GARCÍA, S. Environmental aspects of oriented strand boards production. A Brazilian case study **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 710–719, 10 mai. 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.174.

[35] PHANOPOULOS, C. **Polyurethanes and Isocyanates used as adhesives in Composite Wood Products**. 2010. Disponível em: https://www.huntsman.com/products/detail/320/i-bond. Acesso em: 20 mai. 2024.

[36] MANTANIS, G. I. ATHANASSIADOU, E. T.; BARBU, M. C.; WIJNENDAELE, K. Adhesive systems used in the European particleboard, MDF and OSB industries. **Wood Material Science and Engineering.** Taylor and Francis Ltd.,15 mar. 2018. DOI: 10.1080/17480272.2017.1396622.

[37] WILCZAK, L.; TRIANOSKI, R.; NETO, S. C.; PEREIRA DE PAULA, C. R.; VILLANOVA, R. L.; AZEVEDO, E. Efficiency of castor oil-based polyurethane in the production of plywood panels. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 47, n. 123, p. 463–471, 2019. DOI: 10.18671/scifor.v47n123.08.

[38] GAMA, N.; FERREIRA, A.; BARROS-TIMMONS, A. Cure and performance of castor oil polyurethane adhesive. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 95, 1 dez. 2019. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2019.102413.

[39] ŁEBKOWSKA, M., ZAŁĘSKA-RADZIWIŁŁ, M., TABERNACKA, A. Adhesives based on formaldehyde – environmental problems. **Journal of Biotechnology, Computational Biology and Bionanotechnology**, v. 98, n. 1, p. 53–65, 2017. DOI: 10.5114/bta.2017.66617.

[40] TORRES, L. **A gestão dos resíduos da construção e demolição e o papel do engenheiro**. ABRECON, 2022. Disponível em: https://abrecon.org.br/noticias/a-gestao-dos-residuos-da-construcao-e-demolicao-e-o-papel-do-engenheiro. Acesso em: 22 Jul. 2024.

[41] CONCEIÇÃO, M. M. M.; BARROSO, L. L.; FONSECA, D. P.; JUNIOR, W. F. F.; ABDULMASSIH, M. F.; BARRETO, O. F.; BORGES, H. R.; AIRES, I. M.; CARNEIRO, C. C. A.; NAZARÉ, G. A. S. Diagnóstico dos resíduos de demolição e construção no Brasil. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 9, p. 87466–87481, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n9-080.

[42] MORAIS, S.; FONSECA, H. M. A. C.; OLIVEIRA, S. M. R.; OLIVEIRA, H.; GUPTA, V. K.; SHARMA, B.; PEREIRA, M. L. Environmental and health hazards of chromated copper arsenate-treated wood: A review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 11, 1 jun. 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph18115518

[43] CPSC. CCA-Pressure Treated Wood Guidance for Outdoor Wooden Structures. 2011. Disponível em: https://www.cpsc.gov/s3fs-public/270_0.pdf. Acesso em: 03 mai. 2024.