









ARTIGO ORIGINAL

Potencial de mitigação das mudanças climáticas com o uso de colmos de bambu na construção civil brasileira

Potencial para mitigar el cambio climático con el uso de culmos de bambú en la construcción civil brasileña

Climate change mitigation potential with the use of bamboo culms in the Brazilian construction sector

Lucas Rosse Caldas^{1,2,*}  
Leonardo Oliveira Rodriguez¹  
Bruno Menezes da Cunha Gomes¹  
Romildo Dias Toledo Filho¹  

¹ Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

² Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

* lucas.caldas@fau.ufrj.br

Resumo

Dentre os materiais não convencionais utilizados na construção civil, o bambu apresenta potencial de aplicação devido suas propriedades mecânicas, rápido crescimento, baixo custo, grande disponibilidade e capacidade de sequestro e armazenamento de CO₂. Este trabalho teve o objetivo de avaliar o potencial de redução do impacto de mudanças climáticas com o uso de colmos de bambu aplicados em habitações. Para isso foi utilizada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida Dinâmica (ACVd). A unidade funcional escolhida foi: "1 metro de colmo *Phyllostachys pubescens* com resistência à compressão mínima de 46 MPa e vida útil de dois anos". Foram quantificadas as emissões de gases de efeito estufa nas etapas de plantio, corte, tratamento e transporte dos colmos para diferentes localidades do país. Foram considerados diferentes cenários de fim de vida: (1) reciclagem, (2) aterramento e (3) incineração. Os dados de produção dos colmos foram cruzados com o futuro déficit habitacional brasileiro, adotando a aplicação dos colmos como escoras para a construção de habitações. Ao final da pesquisa foi possível mapear quais as regiões brasileiras são as mais indicadas para o uso desses colmos de bambu. O uso de colmos como escoras para a superação do déficit habitacional brasileiro, entre os anos de 2020 e 2040 pode resultar em -0,10 MtCO₂-eq (Reciclagem) a +0,08 MtCO₂-eq (Incineração). Para os cenários de emissão negativa, o uso de colmos de bambu pode ser enxergado como uma estratégia de compensação climática, sendo, portanto, uma justificativa importante para o incentivo do bambu no setor da construção civil. Palavras-chave: Escoras. Ciclo de vida. ACV dinâmica.

Resumen

Entre los materiales no convencionales utilizados en la construcción civil, el bambú tiene potencial de aplicación debido a sus propiedades mecánicas, rápido crecimiento, bajo costo, gran disponibilidad y capacidad de secuestro y almacenamiento de CO₂. El trabajo tuvo como objetivo evaluar el potencial para reducir el impacto del cambio climático con el uso de culmos de bambú aplicados en las viviendas. Para esto, se utilizó la metodología de evaluación dinámica del

Recebido: 23 março 2020.

Aceito: 09 dezembro 2020.

Publicado: 19 dezembro 2020.

Copyright: © 2020 Caldas *et al.* Este artigo é publicado em acesso aberto e distribuído sob os termos da [Licença Creative Commons Atribuição](#) (CC BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos, desde que creditados os autores e a fonte original.

Financiamento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Editora:



ciclo de vida (EDCV). La unidad funcional elegida fue: "1 metro de culmo *Phyllostachys pubescens* con una resistencia mínima a la compresión de 46 MPa y una vida útil de dos años". Las emisiones de gases de efecto invernadero se cuantificaron en las etapas de plantación y el transporte de los culmos a diferentes lugares del país. Se consideraron diferentes escenarios de fin de la vida: (1) reciclaje, (2) vertedero (3) incineración. Los datos de producción de culmos se cruzaron con el futuro déficit de vivienda en Brasil, adoptando la aplicación de los culmos como puntales para la construcción de viviendas. Al final de la investigación, fue posible mapear qué regiones de Brasil son las más adecuadas para el uso de estos culmos de bambú. El uso de culmos como puntales para superar el déficit de vivienda brasileño, entre los años 2020 y 2040, puede resultar en -0.10 MtCO₂-eq (Reciclaje) a +0.08 MtCO₂-eq (Incineración). Para escenarios de emisiones negativas, el uso de culmos de bambú puede verse como una estrategia de compensación climática, siendo, por lo tanto, una importante justificación para el incentivo del bambú en el sector de la construcción civil.

Palabras clave: Puntales. Ciclo de vida. ECV dinámica.

Abstract

Among the non-conventional materials used in the construction sector, bamboo has potential for application due to its mechanical properties, fast growth, low cost, great availability and CO₂ sequestration and storage capacity. Thus, this work aimed to evaluate the potential of climate change impact reduction with the use of bamboo culms applied in housing. The Dynamic Life Cycle Assessment (DLCA) methodology was employed. The functional unit chosen was: "1 meter of *Phyllostachys pubescens* culm with minimum compressive strength of 46 MPa and a service life of two years". Greenhouse gas emissions were quantified at the following stages: plantation, cut of the culm, treatment and its transportation to different locations in the country. Three different end-of-life scenarios were considered: (1) recycling, (2) landfilling and (3) incineration. The production data of the culms were associated with the number of the future Brazilian housing deficit, adopting the application of culms as scaffold for the construction of dwellings. In the end, it was possible to map which Brazilian regions are the most suitable for the use of these bamboo culms. The use of culms as scaffold to overcome the Brazilian housing deficit between 2020 and 2040 can result in -0.10 MtCO₂-eq (Recycling) to +0.08 MtCO₂-eq (Incineration). For negative emission scenarios, the use of bamboo culms can be seen as a strategy of climate compensation, thus an important reason for the incentive of bamboo in the construction sector.

Keywords: Scaffold. Ciclo de vida. Dynamic LCA.

1. INTRODUÇÃO

Há algumas décadas vem sendo constatada a relação direta entre as emissões atmosféricas de gases de efeito estufa (GEEs) e as mudanças climáticas observadas em todo o globo, como apontam os dados do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Episódios cada vez mais recorrentes de secas, chuvas e temperaturas recordes acenam para a necessidade de estratégias de combate ao desenvolvimento de desastres ecológicos ainda nos próximos anos.

Nesse sentido, esferas da política, da economia e da ciência mundial vêm se debruçando sobre medidas para a redução de emissões dos GEEs, principalmente o dióxido de carbono (CO₂), que é considerado o principal GEEs. Como contribuinte ativo nas emissões de GEEs, a construção civil é apontada como uma das atividades de maior pegada ecológica no planeta. Estima-se que o setor acumule cerca de 30% a 40% do uso global de energia, sendo também a atividade humana cuja cadeia produtiva consome mais recursos naturais, além de geração de grandes quantidades de

resíduos e efluentes. As edificações respondem por até 30% das emissões globais de GEEs relacionadas ao consumo de energia (UNEP 2007).

Nessa ótica, é necessário que a construção civil repense seu processo de concepção e implementação de edifícios, evoluindo para construções mais limpas, com o uso de matérias-primas renováveis, cujos resíduos possam ser devidamente geridos e dispostos. Para tal, o governo brasileiro vem incentivando o crescimento e implementação de ações de mitigação dos impactos ambientais, por meio do Plano Nacional sobre Mudança do Clima, que abre espaço para o desenvolvimento cada vez maior da bioeconomia. A bioeconomia pode ser definida como toda a cadeia de valor que é orientada pelo conhecimento científico avançado e a busca por inovações tecnológicas na aplicação de recursos biológicos e renováveis em processos industriais para gerar atividade econômica circular e benefício social e ambiental coletivo, segundo a Associação Brasileira de Bioinovação – ABBI (2019).

Nesse sentido, a opção por sistemas construtivos em biomateriais, como por exemplo o bambu, vem ao encontro a essas necessidades, com potencial de aliar baixos custos à redução dos impactos ambientais. O bambu apresenta um alto potencial comercial e industrial, por aliar facilidade de obtenção com propriedades físico-mecânicas mínimas normalizadas para a construção civil em poucos metros quadrados de plantio, com grande uso em países asiáticos como a China, Indonésia, Vietnã e alguns da América Latina, como Colômbia e Peru. O uso dessa matéria-prima pode se dar em conjunto com diversos outros materiais, com potencial de reduzir substancialmente custos e impactos ambientais se comparados a estruturas convencionais, como de concreto e aço (Ghavami 1995). Além disso, sua cadeia produtiva possibilita uma alternativa de trabalho e renda, com grande capacidade de integração e inclusão social para o contexto brasileiro (Drumond, Wiedman 2017).

Para saber o potencial de mitigação de mudanças climáticas quando o bambu é utilizado como elemento construtivo, por exemplo, na forma de colmos, é necessário quantificar as emissões de GEEs geradas durante o ciclo de vida desse elemento. Para isso, recomenda-se que as seguintes etapas sejam avaliadas: plantação, corte, transporte, construção, uso e fim de vida. Como ele é um biomaterial, durante o seu crescimento absorve CO₂, pelo processo de fotossíntese, que também precisa ser quantificado. Para essa tarefa, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia interessante por ser capaz de quantificar diferentes potenciais impactos ambientais causados por um produto, serviço ou processo podendo compreender o período entre a extração de matérias-primas e seu destino final pós-consumo. Além de poder ser aplicada em sistemas complexos como elementos construtivos e edificações (Cabeza *et al.* 2014). Através dessa análise, é possível garantir uma melhor gestão dos materiais de construção, aliando o uso de biomateriais ecoeficientes a uma redução global de recursos naturais e seus efeitos.

Alguns estudos aplicaram a ACV para a avaliação de bambu e seus derivados. Netto (2009) avaliou as emissões de CO₂ durante a plantação comercial da espécie *Bambusa vulgaris*, mostrando que o diesel consumido nas operações da plantação é o insumo mais impactante. Vogtländer *et al.* (2010) compararam os impactos ambientais do uso e transporte de materiais à base de bambu provenientes da China com o uso de materiais convencionais como a madeira em regiões da Europa Ocidental, e verificaram a viabilidade do ponto de vista ambiental do uso de colmos de bambu em aplicações locais chinesas, porém encontraram obstáculos na aplicação na Europa devido a seu maior custo ecológico relacionado as distâncias de transporte.

Escamilla e Habert (2014) avaliaram os impactos ambientais para diferentes produtos de bambu produzidos na China, desde colmos até produtos mais industrializados como laminados colados. Eles verificaram que os insumos relativos o tipo e quantidade de energia utilizada no processo produtivo dos materiais industrializados são parâmetros críticos. Escamilla *et al.* (2016) mostraram que materiais à base de bambu para construção de habitações sociais nas Filipinas são mais vantajosos em termos do impacto de mudanças climáticas que sistemas construtivos de cerâmica e concreto. Salcido *et al.* (2016) compararam diferentes materiais para o uso em domos e mostraram também que o bambu é mais vantajoso que aço e concreto em termos de energia incorporada e mudanças climáticas. Em ambos os estudos, fica claro que para o impacto de mudanças climáticas, o bambu é mais vantajoso devido ao CO₂ que é absorvido na fotossíntese.

Dentre os estudos de avaliação de mudanças climáticas de bambu e seus produtos existentes na literatura observa-se que grande parte está voltado para o contexto asiático, e em todos foi aplicado a metodologia de ACV convencional, que não considera a variação temporal na emissão e absorção dos GEEs. Por outro lado, Levasseur *et al.* (2010) desenvolveram uma abordagem nova da ACV, que considera o fator temporal na avaliação, chamada de ACV Dinâmica (ACVd), que especialmente para a avaliação de biomateriais de longa duração, como é o caso daqueles aplicados no setor da construção civil, é um item crítico, tendo em vista que a captura e emissão dos GEEs ocorrem em diferentes períodos. Fouquet *et al.* (2015), Peñaloza *et al.* (2016), Pittau *et al.* (2018) e Caldas *et al.* (2020b) utilizaram a ACVd para o estudo de biomateriais e verificaram importantes diferenças quando ela é utilizada e recomendam seu emprego para o estudo desses materiais. Nessa ótica, o bambu que é um biomaterial, com potencial aplicação em edificações, também deve ser avaliado com o uso da ACVd.

Uma vez consideradas as grandes extensões territoriais brasileiras, de dimensões continentais, a etapa de transporte dentro do estudo de ACV é de vital importância (Caldas, Sposto 2017). O impacto nas emissões de GEEs devido às grandes distâncias de transporte entre zonas de plantio ou distribuição de colmos de bambu até os grandes centros urbanos devem ser analisados, de modo que sejam apontadas as regiões de maior ou menor viabilidade de uso do ponto de vista ambiental.

Neste contexto, o presente estudo teve o objetivo avaliar o potencial de redução do impacto sobre mudanças climáticas com o uso de colmos de bambu aplicados em habitações brasileiras. Foram quantificadas as emissões de GEEs no ciclo de vida para a produção desses colmos, considerando o crescimento do déficit habitacional nos próximos anos, com foco na influência da distância de transporte, entre o local de plantação e uso dos colmos (como escoras), para as diferentes regiões do Brasil. Foi também avaliado como o fim de vida desses colmos influencia no impacto de mudanças climáticas.

O estudo avança na fronteira do conhecimento por considerar a produção desses colmos para o contexto brasileiro, além de avaliar o seu uso para a produção de escoras relacionado com o futuro déficit habitacional do país. Adicionalmente, é empregada a ACVd, que ainda não é bastante difundida nos estudos de ACV. Até onde se sabe, esse é o primeiro estudo que traz essas diferentes abordagens.

2. MÉTODO

Nesta pesquisa foi realizada a ACV com base na NBR ISO 14040 (ABNT 2009), sendo que ela é dividida em quatro etapas: (1) Definição do objetivo, escopo e unidade funcional; (2) Análise do inventário; (3) Avaliação do impacto do ciclo de vida; e (4) Interpretação.

De forma complementar foi utilizada o método de ACVd proposto por Levasseur *et al.* (2010). Nessa abordagem são utilizados fatores de caracterização dinâmicos, ou seja, que variam ao longo do tempo. O modelo de cálculo considera o impacto de aquecimento global instantâneo (GWI_{inst}) e cumulativo (GWI_{cum}), que são baseados na combinação de fatores de caracterização dinâmicos flexíveis (DCF), que contabiliza o caimento de diferentes gases de efeito estufa (GHG) ao longo tempo, a partir de um inventário dinâmico, considerando as emissões dos GHG ao longo do tempo. A seguir são apresentadas as formulações utilizadas no modelo (Equação 1, Equação 2 e Equação 3).

$$DCF_{inst;GHG}(t) = \int_{t-1}^1 a_{GHG} C(t)_{GHG} dt$$

Equação (1)

$$GWI_{inst}(t) = \sum GHG \sum_{i=0}^t g_{GHG}(t_i) \cdot DCF_{inst,GHG}(t - t_i)$$

Equação (2)

$$GWI_{cum}(t) = \sum_{i=0}^t GWI_{inst}(t_i)$$

Equação (3)

$DCF_{inst;GHG}(t)$ – fator dinâmico de caracterização de um específico gás de efeito estufa que ocorre no tempo t .

$C(t)_{GHG}$ – carga na atmosfera do dado gás de efeito estufa t anos após a sua emissão.

α_{GHG} – forçamento radiativo instantâneo por unidade de massa que aumentou na atmosfera para um específico gás de efeito estufa

$GW I_{inst}(t)$ – Impacto instantâneo de aquecimento global em um dado tempo t .

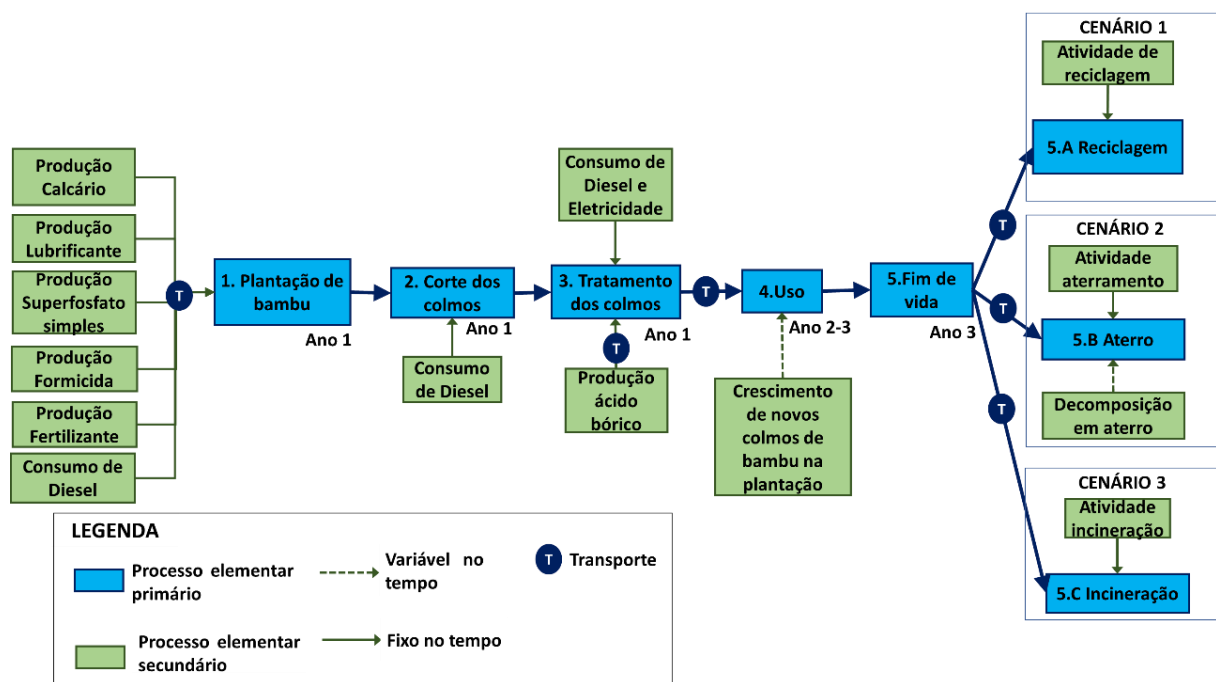
$g_{GHG}(t_i)$ – é o resultado do inventário dinâmico do dado gás de efeito estufa no ano i .

$GW I_{cum}(t)$ – Impacto cumulativo de aquecimento global - é a somatória de todos os $GW I_{inst}(t)$ do tempo zero ao tempo t .

2.1. Definição do escopo e unidade funcional

O escopo do estudo (Figura 1) envolveu as seguintes etapas: (1) plantio do bambu, (2) manutenção da floresta, (3) corte dos colmos, (4) tratamento, (5) transporte, (6) uso e (7) fim de vida. Como fim de vida, foram avaliados três cenários: reciclagem, aterramento e incineração.

Figura 1. Escopo avaliado e cenários de fim de vida avaliados no estudo.



Fonte: elaboração própria.

A unidade funcional adotada foi o comprimento unitário dos colmos de bambu (em metros), considerando a espécie Mossô (*Phyllostachys pubescens*) com resistência à compressão média de 46 MPa (Lorenzo et al. 2020). Foi adotado como aplicação dos colmos o escoramento para construção de habitações, com uma vida útil de dois anos. O uso dessa espécie como escoras é viabilizado pela capacidade do material a resistir a esforços estáticos e já ser empregado de forma

semelhante em países asiáticos (Xu *et al.* 2014). No entanto, em países como a China o bambu é muito utilizado para andaimes o que por seu pequeno diâmetro em relação à altura proporciona risco de flambarem (Cui *et al.* 2020), o que não é o caso de escoramentos de edificações.

A primeira etapa da pesquisa foi a mensuração da massa dos colmos. Foram pesadas seis amostras de colmos (secos em estufa e ambiente natural) em balança analítica do laboratório, sendo obtidos diferentes valores de kg/metro de bambu. A partir desses resultados foi encontrado a média e desvio padrão.

2.2. Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Os impactos para a plantação do bambu e corte dos colmos foram retirados do estudo de Netto (2009) que fez uma análise para o contexto brasileiro. Para a plantação foram considerados os seguintes insumos: diesel, óleo lubrificante, calcário dolomítico, superfosfato simples, fertilizante NPK 15-15-15, formicida e herbicida. Para o pré-tratamento foi adotado tratamento térmico com consumo de ácido bórico, de 0,19 kg/kg de colmo e o combustível, no caso gás natural, de 8,61 MJ/kg de colmo, apresentado por Escamilla e Habert (2014), já que não foi possível encontrar dados nacionais confiáveis.

Para o transporte foi realizado a coleta das distâncias de transporte via Google Maps. As cidades escolhidas como ponto de chegada foram as 25 das 26 capitais dos estados brasileiros e Distrito Federal e foram analisados como localizações hipotéticas os campus das universidades federais de cada estado, como proposto por Caldas e Sposto (2017). Não foi possível quantificar as distâncias até a cidade de Macapá (AP) por conta de falhas do programa, e por isso optou-se por excluí-la do presente estudo. Foram escolhidas as menores distâncias em transporte rodoviário. Para o transporte dos colmos é preciso considerar um maior número de viagens devido ao fato deles ocuparem um maior espaço do que outros materiais. Neste sentido, foi utilizado o fator de correção 3,8 calculado por Escamilla e Habert (2014).

Para o presente estudo, foram adotados dois pontos de partida para a análise na etapa de transporte. O primeiro foi a cidade de Xapuri (AC), que abrange parte da Reserva Extrativista Chico Mendes e onde predominam florestas contínuas com bambus arborescentes (Silveira 2006). O segundo foi a localização da distribuidora Takê Cortinas e Artefatos de Bambu LTDA., situada na cidade de São Paulo (SP). Sua escolha foi feita levando-se em conta o fato de São Paulo ser considerado o maior estado em termos demográficos e de desenvolvimento econômico, já possuir diversas empresas que comercializam colmos de bambu, além de ser líder em estratégias de adaptações climáticas (Simões *et al.* 2017).

Como o carbono biogênico é um item crítico na avaliação de biomateriais, especialmente quando a ACVd é utilizada (Peñaloza *et al.* 2016), foi realizada análise de incertezas considerando três

aspectos: (1) o percentual de carbono presente na biomassa de bambu, (2) variação da massa por metro de colmo e (3) período de rotação da floresta de bambu, sendo considerados três cenários, um pessimista, intermediário e outro otimista, como é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Dados utilizados para a análise de incerteza do carbono biogênico.

Itens avaliados	Otimista	Intermediário	Pessimista	Fonte
Carbono na biomassa (%)	47	45	42	Mognon (2015)
Massa seca em estufa (kg/m)	2,09	1,94	1,72	Medido em laboratório
Massa ambiente natural (kg/m)	2,35	2,16	1,98	Medido em laboratório
Período de rotação (anos)	3	5	8	Greco and Cromberg (2011)

Para a reciclagem foi considerado que o colmo é triturado para a produção de bioagregados, que é utilizado para a confecção de bioconcreto. Foi adotado um potencial de reciclagem dos colmos de 90% para essa aplicação, de acordo com os dados coletados em laboratório. O restante que não é aproveitado foi adotado incineração com aproveitamento energético. Como análise de sensibilidade foi considerado um cenário com potencial de reciclagem de 50%.

O bioconcreto é material que originado pela mistura desses bioagregados com materiais cimentícios, água e aditivos químicos desenvolvido por Andreola (2017). Os materiais cimentícios acabam mineralizando a biomassa e, dessa forma não ocorre mais emissões de GHG, como apontam Pittau *et al.* (2018) e Caldas et al. (2020b). Para esse cenário foi considerado somente as emissões para a trituração dos colmos, sendo utilizado o dado do Ecoinvent (*Wood chips, from post-consumer wood, measured as dry mass {GLO}*), com a adaptação do valor de consumo de energia elétrica levantado em laboratório. Assim, foi contabilizado o sequestro de CO₂ pelo bioconcreto, sendo que os efeitos benéficos, em termos do aquecimento global, foram 100% distribuídos no colmo de bambu.

Para o aterramento, assumiu-se que a decomposição do bambu é similar às madeiras por falta de dados específicos para a decomposição de bambu, no banco de dados do Ecoinvent v. 3.3 (*Waste wood, untreated {RoW}| treatment of, sanitary landfill*) que já considera o carbono biogênico emitido no processo de decomposição do aterro. Foi considerado o processo de decomposição no aterro sanitário por 20 anos, mesmo período considerado por Demertzi *et al.* (2017), assumindo uma taxa constante de emissão de CO₂ e CH₄ nesse tempo.

Para a alternativa de incineração, foram contabilizadas as emissões evitadas advindas do aproveitamento de energia elétrica a partir da queima dos colmos, tendo como referência a produção de energia elétrica na matriz brasileira, de acordo com dados do Ecoinvent v.3.3, também considerado a queima de madeira (*Waste wood, untreated {BR}| heat production, untreated waste wood, at furnace 1000-5000 kW*).

2.3. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Para os estudos de casos realizados foram avaliados quatro GHG, sendo eles: o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e monóxido de carbono (CO), de acordo com Caldas *et al.* (2020b). A modelagem foi realizada no software SimaPro v. 9.0.0.29 e na planilha eletrônica desenvolvida por Levasseur *et al.* (2010).

2.4. Relação com déficit habitacional

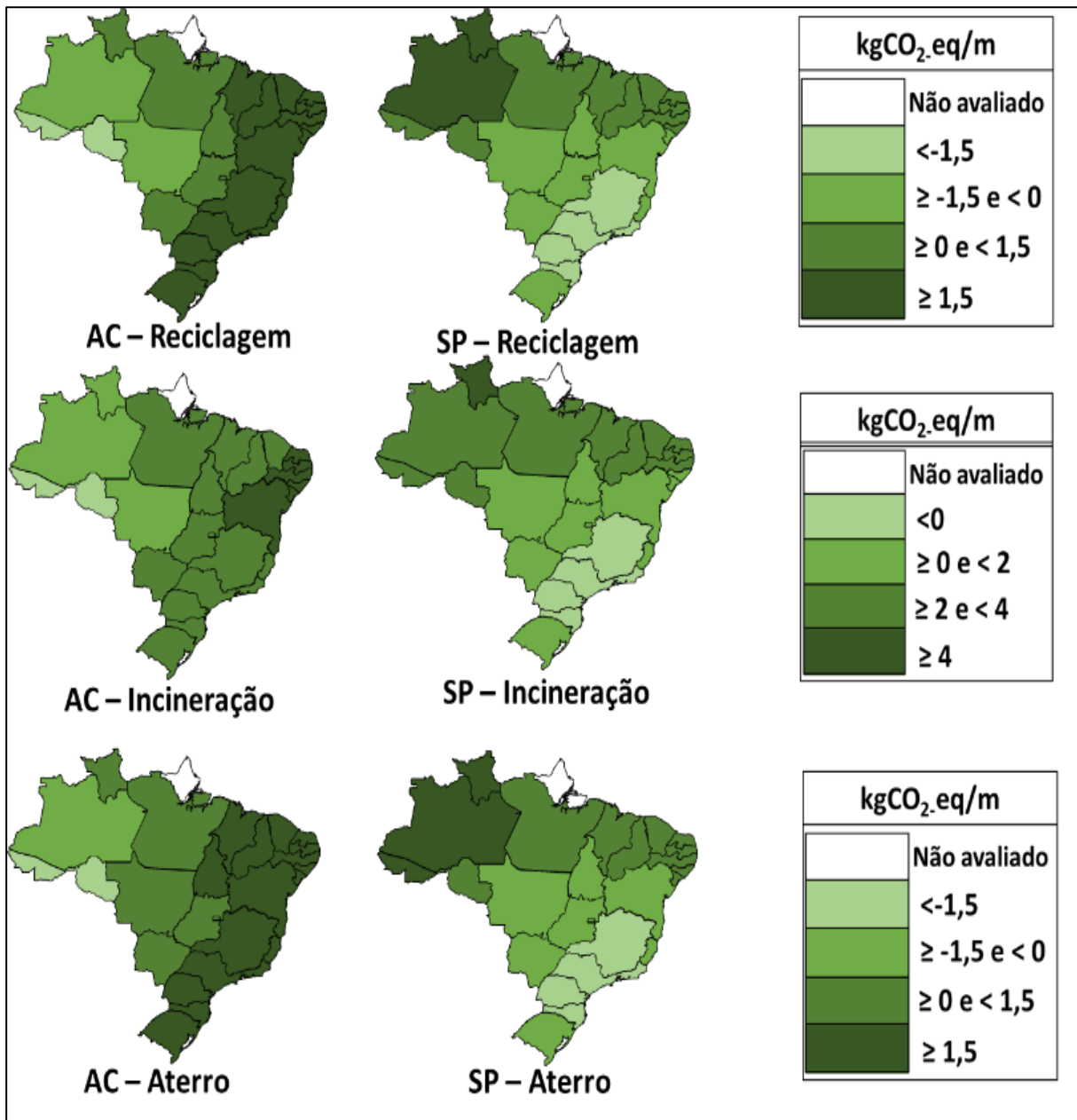
Para relacionar o potencial de mitigação de Mudanças Climáticas com o uso de colmos de bambu com o déficit habitacional foi pensado primeiramente em qual uso os colmos poderiam ter durante a construção de novas habitações. Foi adotado o uso como escoras, sendo considerado o valor apresentado por Marçal *et al.* (2016), que encontraram 70 escoras de 2,5 m por habitação. Foi adotado que as escoras podem ser reutilizadas pelo menos 10 vezes, de acordo com informação de empresas da área, o que resultou em 17,5 m de colmos de bambu por habitação.

A próxima etapa foi saber a quantidade de novas habitações a serem construídas nos próximos anos, sendo separadas por estado, como forma de relacionar com os resultados de mudanças climáticas por estado. Foram considerados as projeções apresentadas pelo estudo do Ministério das Cidades (2018), entre os anos de 2020 e 2040. Ao final foi possível saber as emissões de GEEs por estado, para cada cenário, AC-Reciclagem, AC-Incineração, AC-Aterro, SP-Reciclagem, SP-Incineração e SP-Aterro, como também a combinação entre eles (em relação as diferentes localizações).

3. RESULTADOS

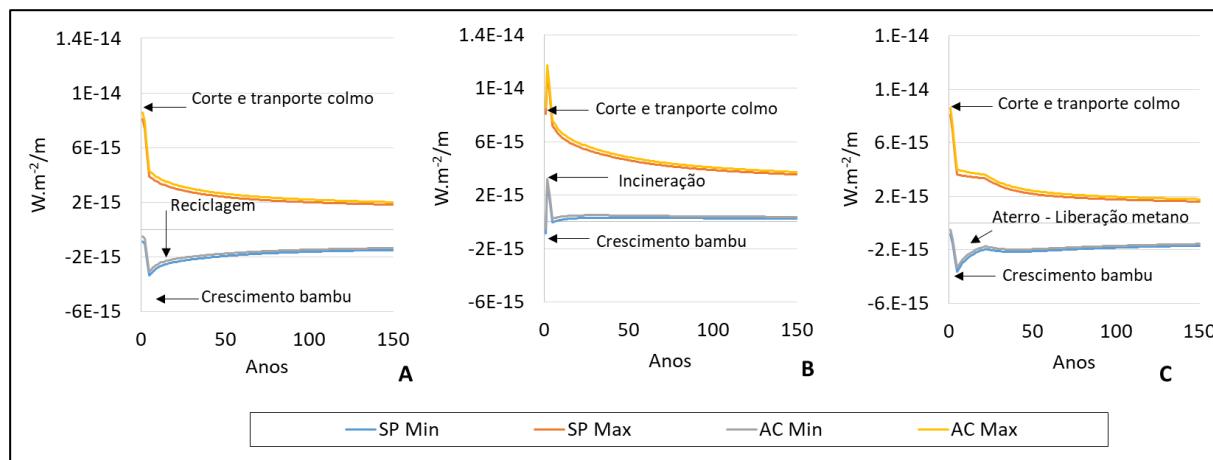
Nesta seção são apresentados os resultados encontrados na pesquisa (Figuras 2, 3 e 4).

Figura 2. Mapeamento das emissões de CO₂-eq no ciclo de vida do colmo de bambu (por metro) para os diferentes cenários.



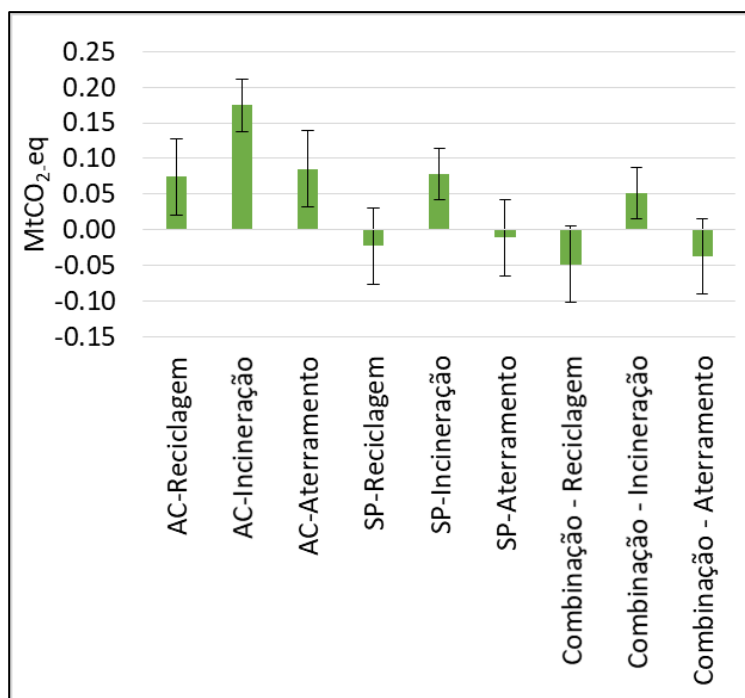
Fonte: elaboração própria.

Figura 3. Avaliação temporal do impacto de mudanças climáticas, em termos de forçamento radiativo, no ciclo de vida dos colmos de bambu. (A) Reciclagem. (B) Incineração. (C) Aterramento.



Fonte: elaboração própria.

Figura 4. Impacto de mudanças climáticas do uso de colmos de bambu como escoras para o déficit habitacional para os diferentes cenários. As barras de erros se referem a variação nas distâncias de transporte e aspectos do carbono biogênico.



Fonte: elaboração própria.

A partir da análise dos resultados da Figura 2 é possível observar que a incineração dos colmos foi o pior dos três cenários uma vez que apresentou 4,5 kgCO₂-eq /m como máximo valor quando considerado o Acre como ponto de partida o estado de Alagoas, na região nordeste, como destino. Já quando proveniente de São Paulo, o pior cenário permaneceu sendo a incineração,

apresentando como valor máximo 3,4 kgCO₂-eq /m quando considerado o estado de Roraima como local de destino.

Comparando-se os mínimos valores obtidos, o melhor cenário encontrado foi a reciclagem dos colmos, com os resultados de -2,5 kgCO₂-eq/m e -2,3 kgCO₂-eq/m para os locais hipotéticos dos estados de origem dos mesmos, respectivamente São Paulo e Acre.

A avaliação da Figura 3 permite observar os picos de forçamento radiativo ao longo do horizonte temporal. Nos cenários de reciclagem e aterro eles se localizam na produção do colmo, enquanto para o cenário de incineração durante o fim de vida, quando todo o CO₂ absorvido é devolvido à atmosfera. Para o aterramento a um pequeno aumento gradual devido à liberação do metano biogênico. A queda no pico após a produção dos colmos se deve ao CO₂ que é absorvido pelo processo de fotossíntese durante o crescimento dos colmos de bambu. Embora não tenha sido apresentado, menores períodos de rotação, sendo representado no presente estudo por 3 anos, faz a queda no pico acontecer mais rápido, resultando na redução do impacto de mudanças climáticas.

O mapeamento das emissões para o cenário de reciclagem demonstra um quadro desfavorável para a grande parte dos estados da Região Norte e Nordeste com os colmos partindo de São Paulo, enquanto a Região Norte apresenta vantagens ao uso uma vez considerado o estado do Acre como origem, por apresentar emissões negativas em sua quase totalidade. Quando levado em conta o cenário de incineração, pode-se observar um padrão entre ambos os quadros, com regiões apresentando um espectro de emissões de CO₂-eq similar.

A avaliação ambiental considerando o déficit habitacional no presente estudo permite uma análise mais sistêmica e possibilita obter informações para a definição de políticas públicas que venham ao encontro a um desenvolvimento sustentável dentro dos grandes centros urbanos. Nesse sentido, os resultados da Figura 4 demonstram o potencial impacto de mudanças climáticas do uso de colmos de bambu como escoras na superação do déficit habitacional brasileiro. Assim, pôde-se confirmar a reciclagem de colmos provenientes de São Paulo como melhor cenário de fim de vida dentre os três estudados, com uma média de -0,02 MtCO₂-eq. Quando as duas localidades são consideradas, é possível chegar a um valor médio de -0,05 MtCO₂-eq e chegando para melhores casos (considerando os desvios padrão) a -0,10 MtCO₂-eq (reciclagem) e -0,08 MtCO₂-eq (aterramento) e o pior caso +0,08 MtCO₂-eq (incineração).

Quando uma análise de sensibilidade para potencial de reciclagem é realizada, considerando somente um potencial de 50%, em vez de 90%, e o restante dos resíduos é incinerado com aproveitamento energético, os resultados mudam consideravelmente, chegando a um melhor valor de -0,04 MtCO₂-eq, tornando esse cenário menos vantajoso que o cenário de aterramento. Isso

indica a importância de maximizar o potencial de reciclagem caso essa opção seja a escolhida como destinação final.

4. DISCUSSÃO

Voagtländer *et al.* (2014), Salcido *et al.* (2016), Escamilla *et al.* (2018) também encontraram emissões negativas para produtos industrializados de bambu, mas existem diferentes formas de contabilizar o carbono biogênico, o que dificulta a comparação direta entre os diferentes estudos. No entanto, é possível concluir que produtos de bambu tem potencial de ter um impacto positivo em relação às mudanças climáticas, ou seja, seu uso em edificações pode gerar créditos ambientais, e, portanto, deve ser incentivado no setor da construção civil.

Esse atributo pode ser justificativo para o investimento em uma cadeia produtiva de bambu no Brasil, ainda mais se forem aproveitadas as características climáticas e territoriais favoráveis presentes no país (Drumond, Wiedman 2017).

Como foi mostrado nos resultados, os valores negativos têm grande influência das diferentes distâncias de transporte e fim de vida. O desenvolvimento de florestas comerciais no estado de São Paulo se mostrou mais vantajosa, ainda mais quando o déficit habitacional é considerado, já que São Paulo é o estado onde está concentrado o maior déficit habitacional do país. O ideal do ponto de vista logístico é ter florestas comerciais em diferentes locais (resultado que pode ser visto para os casos combinados com os dois locais), como também apontam Caldas e Sposto (2017), pois pelo fato do Brasil ser um país de dimensões continentais, o transporte pode ter uma grande influência nos impactos de mudanças climáticas de produtos da construção civil, e por isso precisa ser avaliado com atenção. Especialmente para colmos de bambu o aspecto do transporte ainda é mais crítico, pois mais viagens são necessárias para transportar uma mesma quantidade de materiais, como apontam Escamilla e Habert (2014).

As curvas que mostram o impacto de forçamento radiativo ao longo do tempo se comportam de forma semelhante aos estudos de Fouquet *et al.* (2015), Peñaloza *et al.* (2016) e Pittau *et al.* (2018), com picos acentuados na produção do material e diferenças de acordo com cada tipo de fim de vida, um maior pico para a incineração e um pico menor e crescente para o cenário de aterramento devido a liberação gradual do metano biogênico.

Em relação ao fim de vida, verifica-se que quando são comparados apenas o aterramento e incineração, o primeiro se mostra mais vantajoso, como foi verificado por Fouquet *et al.* (2015) e Peñaloza *et al.* (2016), devido ao aprisionamento indefinido da maior parte do CO₂ absorvido para a primeira opção.

Quando a reciclagem é considerada, em alguns casos ela se mostra como a alternativa de fim de vida menos impactante, ainda mais quando são considerados os impactos evitados para a produção de matérias primas virgens, como apontam Demertizi *et al.* (2017) e Pittau *et al.* (2018). No entanto, no presente estudo essa análise não foi realizada. Como foi adotada a reciclagem para a produção de um produto inorgânico, como é o caso do bioconcreto, a vantagem é maior, por exemplo, que produtos orgânicos, como chapas de particulados, como é o caso do estudo de Demertizi *et al.* (2017). Isso ocorre, pois, produtos inorgânicos, especialmente os materiais cimentícios mineralizam o material vegetal (Pittau *et al.* 2018), evitando que o CO₂ absorvido pela biomassa retorne a atmosfera. Um item importante referente a reciclagem é o potencial de material que é reciclado e recuperado, sendo que no presente estudo foi adotado inicialmente um potencial de 90%, que pode ser considerado alto. Quanto menor esse potencial, menor serão os ganhos trazidos com esse tipo de fim de vida, como foi apresentado na análise de sensibilidade, podendo tornar esse cenário de fim de vida menos vantajoso.

Outra questão importante em relação à reciclagem está relacionada a quem cabe os benefícios relacionados ao aproveitamento de resíduos e estocagem do CO₂, o gerador (o colmo) ou o receptor (o bioconcreto). Como no presente estudo foi distribuído 100% no colmo, acaba que o cenário de reciclagem é beneficiado, quando comparado ao aterramento e incineração. Para outros tipos de modelagem, por exemplo, com a distribuição dos benefícios 50/50, que também é uma prática comum adotada na ACV (Caldas *et al.* 2020a) levaria a uma piora dos resultados para o cenário de reciclagem.

Dentre os parâmetros de incerteza avaliados: quantidade de carbono na biomassa, massa de bambu e período de rotação, o primeiro parâmetro é o que mais contribui para a incerteza, seguido pela massa e período de rotação. Adicionalmente, a quantidade de carbono na biomassa é o parâmetro que mais contribui para diminuir a pegada de carbono. Nesse sentido, recomenda-se que pelo menos os dois primeiros sejam utilizados como parâmetros de incerteza em estudos sobre ACV ou mudanças climáticas de biomateriais, especialmente bambus.

Uma limitação do trabalho foi ter considerado as mesmas distâncias de transporte para os diferentes cenários de fim de vida, o que na prática é diferente, principalmente para reciclagem e incineração, que tendem a ser locais menos disponíveis, resultando em distâncias maiores para esses locais. Göswein *et al.* (2018) mostraram que as distâncias de transporte podem ser um obstáculo importante, em termos de impactos ambientais para o aproveitamento de resíduos para a produção de concreto. Por outro lado, em um cenário futuro em que a bioeconomia circular esteja mais difundida no país, espera-se que mais empresas de reciclagem de biomateriais estejam mais disponíveis.

A interpretação de cenários de diferentes alternativas de fim de vida deve ser realizada de forma cuidadosa, devido às várias fontes de incerteza existentes. No entanto, de forma geral a incineração tende a ser a pior alternativa para o impacto de mudanças climáticas, mesmo considerando o aproveitamento energético para o contexto brasileiro (devido à característica específica da matriz de energia elétrica do Brasil, que possui pouca participação de fontes fósseis), corroborando com outros estudos da literatura (Garcia, Freire 2014; Demertzi *et al.* 2017; Fouquet *et al.* 2015; Pittau *et al.* 2018), devido ao fato de todo o CO₂ absorvido pela fotossíntese retornar à atmosfera. Vale ressaltar, que para outros impactos ambientais, esses resultados podem mudar consideravelmente.

5. LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Nesta seção são apresentadas as limitações do estudo. A primeira delas está relacionada a algumas das atividades adotadas no ICV, como aquelas que são para madeira e foram consideradas para o bambu pelo fato de não ter sido encontrado atividades específicas. A cobertura geográfica de algumas atividades também não retrata as condições brasileiras, o que pode ser uma limitação importante dependendo da contribuição da atividade no impacto de mudanças climáticas.

Algumas premissas adotadas como a vida útil das escoras de bambu, que também irá variar de acordo com as condições de aplicação e uso, climáticas, entre outras. O aumento da vida útil pode levar a mais benefícios em termos de forçamento radiativo e aquecimento global, em que a metodologia de ACVd se mostra ter uma maior sensibilidade que a ACV estática. As distâncias de transporte adotadas nos cenários de fim de vida também podem ser uma limitação importante, o que vai depender do local onde o colmo é utilizado como escora e, principalmente da distribuição das usinas de reciclagem e incineração no território brasileiro.

As premissas adotadas para o cenário de reciclagem também podem ser consideradas uma limitação, pois dependendo do que é assumido pode levar a conclusões diferentes, como por exemplo a taxa adotada de reciclagem. Finalmente, a questão da distribuição dos benefícios, que como foi mencionado anteriormente, foi atribuído tudo ao colmo de bambu. A questão da distribuição de impactos em processos multifuncionais é uma das questões mais polêmicas e controversas nos estudos de ACV e que tem grande influência nos resultados finais (SILVA *et al.* 2018). Desta forma, essas limitações devem ser exploradas em futuros estudos e avaliadas quais são as mais relevantes para o impacto de mudanças climáticas de produtos de bambu.

6. CONCLUSÕES

O uso de colmos como escoras para a construção de novas habitações que irão atender o déficit habitacional brasileiro projetado, entre os anos de 2020 e 2040 pode variar de -0,10 MtCO₂-eq

(fim de vida como reciclagem) a $+0,08 \text{ MtCO}_2\text{-eq}$ (incineração). A localização da plantação na região Sudeste se mostrou mais favorável que na região Norte, podendo gerar mais créditos positivos no impacto de mudanças climáticas, sendo, portanto, uma oportunidade potencial para uso de bambus na construção civil brasileira. O cenário de reciclagem dos colmos para aproveitamento como bioagregado para a produção de bioconcreto de bambu foi o mais vantajoso, seguido do aterramento e incineração, considerando as premissas adotadas na modelagem.

Esta pesquisa avança no estado da arte sobre ACV de bambu nos seguintes pontos: primeiramente por considerar uma avaliação a nível do território brasileiro; utilizar diferentes parâmetros de incerteza relacionados ao carbono biogênico; avaliar três tipos de fim de vida dos colmos; cruzar os resultados com o futuro déficit habitacional e, assim, possibilitando uma tomada de decisão à nível da gestão pública; e, finalmente com o uso da ACVd, por mostrar a alteração do impacto para as mudanças climáticas ao longo do tempo, indicando que um valor fixo médio pode não ser escolha mais adequada para a tomada de decisão.

O estudo contribui para a difusão do bambu no setor da construção civil como uma estratégia potencial para mitigação do impacto de mudanças climáticas e, ressalta a importância de se considerar modelos mais robustos, como a ACVd para a avaliação de biomateriais de longa vida útil, como aqueles empregados no setor da construção civil.

Para futuros estudos é importante avaliar e aprimorar os itens elencados como limitações do estudo, principalmente o inventário utilizado e as premissas adotadas nos cenários de fim de vida, em especial a alternativa de reciclagem. Posteriormente, é interessante comparar o impacto de mudanças climáticas do bambu com produtos de madeira e aço e quando diferentes métodos e tipos de ACV são empregados.

REFERÊNCIAS

ANDREOLA, V. M., 2017. *Caracterização Física, Mecânica e Ambiental de Bio-Concretos de Bambu*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOINOVAÇÃO – ABBI, 2019. *A Bioeconomia*. 2019. Available from: <http://www.abbi.org.br/pt/bioeconomia/>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT., 2009. *NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura*. Rio de Janeiro: 2009.

CABEZA, L.F, RINCÓN, L., VILARIÑO, V., PÉREZ, G., CASTELL, A. 2014 Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: review. *Renew. Sus. Energy Rev.* 2014; 29, 394-416.

CALDAS, L. R., ABREU-HARBICH, L. V. DE, & HORA, K. E. R., 2020a Avaliação ambiental de alternativas construtivas de um edifício contêiner. *PARC Pesquisa Em Arquitetura E Construção*, 11, e020008. <https://doi.org/10.20396/parc.v11i0.8654887>

CALDAS, L.R, SARAIVA, A. B, ANDREOLA, V., TOLEDO FILHO, R.D., 2020b. Bamboo bio-concrete as an alternative for buildings' climate change mitigation and adaptation. *Construction and Building Materials*, v. 263, 10 December. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120652>

- CALDAS, L.R, SPOSTO, R.M., 2017. Emissões de CO₂ referentes ao transporte de materiais de construção no Brasil: estudo comparativo entre blocos estruturais cerâmicos e de concreto. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 91- 108, out./dez. 2017. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000400187>
- CUI, Junhe et al. Multiscale structural insights of load bearing bamboo: A computational modeling approach. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, p. 103743, 2020.
- DEMERTZI, M., SIERRA-PÉREZ, J., PAULO, J.A, ARROJA, L., DIAS, A. C., 2017. Environmental performance of expanded cork slab and granules through life cycle assessment. *J. Clean. Prod.* 2017; 145, 294 – 302.
- DRUMOND, P., WIEDMAN, G., 2017. *Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia*. Rio de Janeiro: Instituto Ciência Hoje, 2017.
- ESCAMILLA, E.Z, HABERT, G., 2014. Environmental impacts of bamboo-based construction materials representing global production diversity. *J. Cleaner Prod.* 2014; 69, 117-127.
- ESCAMILLA, E.Z, HABERT, G., WOHLMUTH, E. 2016. When CO₂ counts: Sustainability assessment industrialized bamboo as an alternative for social housing programs in the Philippines. *Build. Env.* 2016; 103, 44 – 53.
- ESCAMILLA, Edwin Zea et al. Industrial or traditional bamboo construction? Comparative life cycle assessment (LCA) of bamboo-based buildings. *Sustainability (Switzerland)*, v. 10, n. 9, 2018.
- FOUQUET, M., LEVASSEUR, A., MARGINI, M., LEBERT, A., LASVAUX, S., SOURY, B., BUHÉ, C., WOLOSZYN, M., 2015. Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment. *Build. Environ.* 2015; 90, 51 – 59.
- GHAVAMI K., 1995. Ultimate load behaviour of bamboo reinforced lightweight concrete beams. *Cement & Concrete Composites*, Elsevier Science Limited 0958-9465(95)0001-6, 1995, pp. 281–288.
- GÖSWEIN, V., GONÇALVES, A.B, SILVESTRE, J.D., FREIRE, F., HABERT, G., KURDA, R., 2018. Transportation matters – Does it? GIS-based comparative environmental assessment of concrete mixes with cement, fly ash, natural and recycled aggregates. *Resources Conservation Recycling*, 2018; 137, 1-10.1 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.021>
- GRECO, T.M, CROMBERG M., 2011. *Bambu – Cultivo e Manejo*. Florianópolis: Insular, 2011.184p.
- LEVASSEUR, A., LESAGE, P., MARGNI, M., DESCHÊNES, L., SAMSON, R., 2010. Considering time in LCA: dynamic LCA and its application to global warming impact assessments. *Environ. Sci. Technol.* 2010; 44, 3169-3174.
- LORENZO, Rodolfo et al. Determination of the physical and mechanical properties of moso, guadua and oldhamii bamboo assisted by robotic fabrication. *Journal of Wood Science*, v. 66, n. 1, p. 1-11, 2020.
- MARÇAL, V. H. S, CALDAS, L.R., SPOSTO, R. M., 2016. Avaliação do ciclo de vida de emissões de CO₂ para produção comercial de escoras de bambu, 2016. *Anais...II Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis*.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES. 2018. *Demanda futura por moradias: demografia, habitação e mercado* / Universidade Federal Fluminense; organização Gustavo Henrique Naves Givisiez, Elzira Lúcia de Oliveira. – 1a ed. – Niterói, RJ: UFF, Pró-reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação, 2018.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. 2018. [acessado: 03 jun. 2018]. Disponível: <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>
- MOGNON, F., 2015. *Avaliação Comportamental do Crescimento, Biomassa e Estoque de Carbono em Espécies de Bambu*. Tese de Doutorado, UFPR, Curitiba, PR, Brasil; 2015
- NETTO, L. G., 2009. *Avaliação de carga e custos ambientais em uma plantação comercial de bambu: estudos de alternativas de produto final e substituição de recursos*. /Luiz Ghelmandi Netto. – São Paulo, 2009.304 f. Dissertação de Mestrado, UNIP, São Paulo, SP, Brasil; 2009.

PEÑALOZA, D., ERLANDSSON, M., FALK, A., 2016. Exploring the climate impact effects of increases use of bio-based materials in buildings. *Constr. Build. Mater.* 2016; 125, 219-226.

PITTAU, F., KRAUSE, F., LUMIA, G., HABERT, G., 2018. Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls. *Build. Env.* 2018; 129, 117-129.

SALCIDO, J.C., RAHEEM, A. A., RAVI, S., 2016. Comparison of embodied energy and environmental impact of alternative materials used in reticulated dome construction. *Build. Env.* 2016; 96, 22-34.

SILVA, M. G. da; GOMES, V.; SAADE, M. R. M. The contribution of life-cycle assessment to environmentally preferable concrete mix selection for breakwater applications. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 413-429, abr./jun. 2018.

SILVEIRA, M., 2001. *A floresta aberta com bambu no sudoeste da Amazônia: padrões e processos em múltiplas escalas*. Tese de Doutorado, UNB, Brasília – DF; 2001. Simões E, de Sousa Junior WC, de Freitas DM, Mills M, Iwama AY, Gonçalves I, et al. *Reg Environ Change*; 2017. 17: 1739. doi: [10.1007/s10113-017-1133-5](https://doi.org/10.1007/s10113-017-1133-5).

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP, 2017. *Avaliação de Políticas Públicas para Redução da Emissão de Gases de Efeito Estufa em Edificações*. Budapeste, Hungria: Universidade da Europa Central, 2007.

VOGTLÄNDER, J., VAN DER LUGT, P., e BREZET, H., 2010. The sustainability of bamboo products for local and Western European applications. LCAs and land-use. Elsevier Science Limited. 2010. doi: 10.1016/j.jclepro.2010.04.015

XU, Qingfeng et al. Mechanical properties of structural bamboo following immersion in water. *Engineering Structures*, v. 81, p. 230-239, 2014.