



FERRAMENTA DE ANÁLISE DINÂMICA PARA AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE CARBONO EM EDIFICAÇÕES PELO USO DE BIOMATERIAIS

Lucas Rosse Caldas

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador(es): Romildo Dias Toledo Filho

Anna Karin Elisabeth

Bernstand Saraiva

Schott

Rio de Janeiro

Junho de 2020

FERRAMENTA DE ANÁLISE DINÂMICA PARA AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE
CARBONO EM EDIFICAÇÕES PELO USO DE BIOMATERIAIS

Lucas Rosse Caldas

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Anna Karin Elisabeth Bernstand Saraiva Schott

Aprovada por: Prof. Romildo Dias Toledo Filho

Prof. Anna Karin Elisabeth Bernstand Saraiva Schott

Prof. Oscar Aurelio Mendoza Reales

Prof. Suzana Kahn Ribeiro

Prof. Andrea Souza Santos

Prof. Michele Tereza Marques Carvalho

Prof. Paulo Roberto Lopes Lima

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2020

Caldas, Lucas Rosse

Ferramenta de análise dinâmica para avaliação da emissão de carbono em edificações pelo uso de biomateriais/ Lucas Rosse Caldas. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XXII, 194 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Anna Karin Elisabeth Bernstand Saraiva

Schott

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 17-20. p.44-61. p. 72-78. p.81-83. p. 94-96. p.126-133. p. 179-182. p. 187.

1.Avaliação do Ciclo de Vida. 2. Mudanças Climáticas. 3. Bioconcretos. I. Toledo Filho, Romildo Dias *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*“Eu vim de lá, eu vim de lá, pequenininho
Mas eu vim de lá, pequenininho
Alguém me avisou
Pra pisar neste chão devagarinho
Alguém me avisou
Pra pisar neste chão devagarinho”*

Dona Ivone Lara

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus e aos meus pais, Antônio Luciano Caldas e Adriana Rosse e meu irmão Vinícius Caldas, pelo apoio, confiança e carinho durante todos esses anos. A minha madrinha, Andreia Rosse, primos, Leonardo, Andressa e Alexandre, e avós, Ivonete Caetano e Luiza Caldas, por sempre me incentivarem e torcerem pelo meu sucesso.

Comecei minha carreira de pesquisador na Universidade Federal de Goiás (UFG) e assim tenho uma imensa gratidão aos professores, especialmente as professoras Kátia Saavaaedra que possibilitou minha primeira monitoria, Márcia Mascarenha, que deu minha primeira carta de recomendação que permitiu meu ingresso no mestrado e a professora Karla Hora que foi minha primeira orientadora e até hoje me auxilia como colega de pesquisa.

Parte muito importante da minha formação ocorreu na Universidade de Brasília (UnB), onde realizei meu mestrado. Agradecimento especial aos professores Rosa Sposto, Eugênia Silva, Michele Carvalho e Elton Bauer, que me ensinaram a ter um pensamento mais crítico e sistêmico e possibilitaram meu ingresso na COPPE/UFRJ e aos amigos de Brasília Malu, Matheus, Júlia e Wallison e Dyorgge.

Um agradecimento especial ao grupo de pesquisa NUMATS que me recebeu de braços abertos, especialmente aos colegas e amigos Anilé, Vanessa, Yassin, Dani, Rayane, Nathália, Giuseppe, Carol, Adriana, Camila, Fabrício, Nina e Rejane. Aos meus orientandos Ana, Leonardo e Lívia que me ensinaram mais que eu pude ensinar. À Claudinha que faz nosso café e mantém nossa sala organizada e ao restante do corpo técnico do NUMATS. À Luzi pela paciência, disponibilidade e organização para resolver diversos problemas burocráticos e do dia a dia.

Aos colegas da ETH Zurich, especialmente Francesco Pittau e o professor Guillaume Habert pelas longas conversas e discussões sobre este tema de pesquisa. Aos colegas, Esperanza e Rafael, e professores, Alexandre Sklo, André Lucena e Roberto Shaeffer, do Programa de Planejamento Energético (COPPE/PPE), que tive a oportunidade de trabalhar em conjunto, onde muito aprendi. À professora Suzana Kahn que possibilitou a pesquisa de trabalhos que foram muito importantes no contexto do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC). À professora Andrea Santos que conheci bem no final deste período de tese que também tive a oportunidade de trabalhar em conjunto e muito me ensinou.

Aos meus queridos amigos, que de certa forma sempre estiveram presentes para me alegrar nos momentos de tristeza e dificuldade, em especial Carlos, Miguel, Ronaldo, Léo (Hortêncio), Léo (Medeiros), Carlete, Renner, Neto, Sarah Lays, Salizza, Dyenys, Pamela, Vidigal, Sara e Rudiger.

A toda Faculdade Arquitetura de Urbanismo (FAU/UFRJ), onde tive a grande oportunidade de ser professor substituto por dois anos, que muito me ensinou! Agradecimento especial aos meus alunos, e aos amigos e colegas, Lu, Tathi, Thiago, Reila, Silvano e a professora Mônica Salgado.

E claro, não poderia deixar de agradecer aos meus queridos orientadores, professores Romildo Toledo Filho e Anna Saraiva pelo apoio, paciência e oportunidade de grande aprendizado e evolução durante esses anos. Agradecimento especial à banca de qualificação, os professores Oscar Reales e Ellen Pacheco e os professores Suzana Kahn, Andrea Santos, Michele Carvalho e Paulo Lima por aceitarem o convite e contribuírem para a melhoria do trabalho, em sua etapa final.

Agradecimento ao CNPq e a COPPETEC pelo apoio financeiro ao longo destes anos.

Finalmente, gostaria de agradecer à cidade do Rio de Janeiro (que tanto amo!) por todas as possibilidades e momentos de alegria (principalmente com suas belas paisagens, rodas de samba e blocos de carnaval) e aprendizado oferecidos e todos que estiveram presentes de alguma forma neste período (que foi um dos mais intensos e importantes da minha vida) e que porventura o nome não esteja aqui.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

FERRAMENTA DE ANÁLISE DINÂMICA PARA AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE CARBONO EM EDIFICAÇÕES PELO USO DE BIOMATERIAIS

Lucas Rosse Caldas

Junho/2020

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Anna Karin Elisabeth Bernstand Saraiva Schott

Programa: Engenharia Civil

A presente tese teve o objetivo de desenvolver uma Ferramenta de Análise Dinâmica Para Avaliação da Emissão de Carbono em Edificações (FADCE) pelo Uso de Biomateriais (FADCE). Posteriormente, a FADCE foi aplicada para avaliar o potencial do Bioconcreto de Bambu (BBC) como estratégia para mitigação (redução da emissão de carbono) e adaptação de edificações habitacionais brasileiras às mudanças climáticas em um contexto de economia circular. Foi utilizada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida Dinâmica (ACVd), com o escopo do berço ao túmulo, para calcular a emissão de carbono, considerando um inventário dinâmico ao longo do tempo. Foram avaliadas seis cidades de diferentes Zonas Bioclimáticas (ZB) brasileiras e cenários, sendo um considerando o aumento da temperatura média do planeta devido ao aquecimento global e outro com a descarbonização da matriz de energia elétrica. A FADCE mostrou ser mais robusta e sensível para avaliação de biomateriais, nesse caso o BBC. Constatou-se que o uso de BBC em fachadas de edificações habitacionais tem potencial de trazer ganhos de 15% a 43%, e são mais vantajosos que sistemas construtivos convencionalmente utilizados no Brasil (alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto) para as seis ZB e todos os cenários avaliados.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DYNAMIC ANALYSIS FRAMEWORK FOR CARBON EMISSION ASSESSMENT
IN BUILDINGS USING BIO-BASED MATERIALS

Lucas Rosse Caldas

June/2020

Advisors: Romildo Dias Toledo Filho

Anna Karin Elisabeth Bernstand Saraiva Schott

Department: Civil Engineering

This thesis aimed to develop a Dynamic Analysis Framework for Carbon Emission Assessment in Buildings (DAFCB) using Bio-based Materials. Subsequently, the DAFCB was applied to assess the Bamboo Bio-concrete (BBC) potential as a strategy for mitigation (reduction of carbon emissions) and adaptation of Brazilian housing to climate change, in the context of a circular economy. The Dynamic Life Cycle Assessment (DLCA) methodology was used, with the cradle-to-grave scope, to calculate the carbon emission, considering a dynamic inventory over time. Six cities in different Brazilian Bioclimatic Zones (BZ) and scenarios were evaluated, where one scenario considered the planet's average temperature increase due to global warming, and the other, the electricity grid matrix decarbonization. DAFCB proved to be more robust and sensitive for the evaluation of bio-based materials, in this case, the BBC. The use of BBC in building façades has the potential to bring gains of 15% to 43%, and it is more advantageous than conventional constructive systems (ceramic and concrete block masonry) in Brazil, for the six BZs and all the evaluated scenarios.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1. Contextualização	1
1.1. Contexto Atual e Futuro das Cidades e Edificações.....	1
1.2. Mudanças Climáticas, Economia Circular, Edificações e Biomateriais	4
2. Inovação da Tese	14
3. Justificativa e Relevância da Tese	14
4. Objetivos.....	16
4.1. Objetivos Gerais	16
4.2. Objetivos Específicos Referentes ao BBC	16
5. Limitações da Pesquisa.....	17
6. Organização da Tese.....	17
7. Referências	17
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA	22
1. Avaliação da Emissão de Carbono em Edificações: Mitigação e Adaptação	22
2. ACV Aplicada a Biomateriais de Construção: Avaliação dos Produtos Estudados	32
3. ACV Aplicada a Biomateriais de Construção: Avaliação de Aspectos Metodológicos	37
3.1. Metodologias de Cálculo de Emissão de Carbono	37
3.2. Escopos e Unidades Funcionais	39
3.3. Inventário do Ciclo de Vida.....	40
3.4. Carbono Biogênico	40
4. Conclusões do Capítulo	43
5. Referências	45
CAPÍTULO 3 – AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) APLICADA AO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	63
1. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	63
2. ACV Aplicada à Construção Civil	67
3. Avaliação do Carbono Biogênico.....	69
4. Avaliação da Carbonatação	70
5. ACV Dinâmica (ACVd).....	71
6. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida.....	72
7. Referências	73
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA	80
1. Introdução.....	80
2. Desenvolvimento da Ferramenta	81
3. Referências	82

CAPÍTULO 5 - FERRAMENTA DE ANÁLISE DINÂMICA PARA AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE CARBONO EM EDIFICAÇÕES PELO USO DE BIOMATERIAIS	85
1. Apresentação da Ferramenta	85
1.1. Organização geral	85
1.2. Avaliação do Carbono Biogênico no Tempo	87
1.3. Avaliação da Carbonatação no Tempo	88
1.4. Avaliação Material	90
1.5. Avaliação Elemento Construtivo.....	90
1.6. Avaliação Edificação	91
1.7. Biomaterial Projetado para Balanço Negativo da Emissão de Carbono	93
1.8. Análise de Sensibilidade e Incertezas.....	93
2. Limitações da Ferramenta	94
3. Referências	95
CAPÍTULO 6 - ESTUDO DE CASO PARA O BIOCONCRETO DE BAMBU: DADOS DE ENTRADA	98
1. Caracterização do Bioconcreto de Bambu.....	98
2. Definição do Escopo e Unidade Funcional	99
3. Inventário do Bioconcreto de Bambu.....	100
4. Quantificação do Carbono Biogênico dos Resíduos de Bambu no Tempo.....	105
5. Quantificação do CO ₂ Absorvido na Carbonatação do Bioconcreto de Bambu ..	106
6. Bioconcreto de Bambu Projetado para Balanço Negativo da Emissão de Carbono	107
7. Avaliação dos Sistemas Construtivos Convencionais.....	108
8. Análises de Sensibilidade	108
8.1. Alocação dos Resíduos de Bambu e da Cinza Volante	109
8.2. Origem da Partícula de Bambu.....	110
8.3. Combustível Para Calcinação do Metacaulim.....	112
8.4. Revestimento como Resina Acrílica.....	112
9. Relação da Distribuição Geográfica dos Insumos para a Produção do Bioconcreto em Diferentes Localidades do Brasil.....	113
10. Unidade Funcional Considerando Critérios de Desempenho Térmico e Acústico	115
10.1. Com base no Desempenho do Sistemas Construtivos Convencionais	115
10.2. Com base no Desempenho do Bioconcreto de Bambu.....	117
11. Avaliação do Desempenho Termoenergético de Edificações	119
11.1. Arquivos Climáticos Originais	119
11.2. Arquivos Climáticos Futuros	121
12. Avaliação para a Edificação	122

13.	Sumário do Capítulo.....	125
14.	Referências	128
CAPÍTULO 7 - ESTUDO DE CASO PARA O BIOCONCRETO DE BAMBU: RESULTADOS E DISCUSSÃO		136
1.	Avaliação dos Potenciais Impactos Ambientais dos Bioconcretos de Bambu Considerando o Volume Produzido (em m ³).....	136
2.	Avaliação da Emissão de Carbono dos Bioconcretos de Bambu Considerando a Área de Parede (em m ²).....	139
3.	Bioconcretos de Bambu Projetados para Balanço Negativo da Emissão de Carbono 141	
4.	Recomendações para Diminuição do Impacto de Mudanças Climáticas dos Bioconcretos de Bambu.....	143
5.	Comparação dos Bioconcretos de Bambu com Sistemas Construtivos Convencionais	144
6.	Análise de Sensibilidade.....	149
6.1.	Alocação dos Impactos de Mudanças Climáticas dos Resíduos de Bambu e Cinzas Volantes	149
6.2.	Origem da Partícula de Bambu.....	150
6.3.	A Influência das Incertezas Relativas ao Carbono Biogênico.....	152
6.4.	Combustível de Calcinação do Metacaulim	154
6.5.	Uso de Resina Acrílica como Revestimento	155
8.	Influência dos Critérios de Desempenho na Escolha da Unidade Funcional	160
8.1	Com base no Desempenho Térmico e Acústico dos Sistemas Construtivos Convencionais	160
8.2	Com base no Desempenho Térmico do Bioconcreto de Bambu	162
9.	Avaliação do Desempenho Termoenergético.....	165
9.1.	Arquivos Climáticos Originais	165
9.2.	Arquivos Climáticos Futuros.....	168
10.	Avaliação do Impacto de Mudanças Climáticas no..... Ciclo de Vida da Edificação	169
11.	Referências	181
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E PESQUISAS FUTURAS.....		185
1.	Conclusões.....	185
2.	Pesquisas Futuras.....	188
3.	Referências	189
CAPÍTULO 9 - APÊNDICES		190
1.	Produtos Originados a Partir da Pesquisa Desenvolvida..... na Tese.....	190
2.	Produtos Correlatos ao Tema de Pesquisa da Tese	192

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema conceitual do contexto atual e futuro que as cidades e edificações estão inseridas e desenvolvimento de bioconcretos.	3
Figura 2 - Principais países e blocos comerciais exportadores e importadores de produtos de bambu no ano de 2012. (A) Exportadores. (B) Importadores.	8
Figura 3 - Projetos de edificações com uso de produtos de bambu. (A) Fachada na Casa Passiva (Passivhaus) - França (B) Forro do Aeroporto de Madrid-Barajas - Espanha.(C) Estrutura do Edifício de Bambu Energicamente Eficiente - China. (D) Estrutura do Pavilhão Zero Carbon Bamboo (ZCB) - Hong Kong.....	9
Figura 4 - Distribuição geográfica de plantações de bambu no Brasil.....	10
Figura 5 – Bioconcreto de bambu avaliado (BBC). (A) Seção. (B) Corpos de prova moldados.....	13
Figura 6 – Análise quantitativa de estudos encontrados na literatura sobre ACV e biomateriais de construção.	32
Figura 7 – Identificação dos estudos, por tipo de biomaterial, segundo a localização das instituições de pesquisa. Realizado pelo autor (2019) a partir do mapa disponibilizado no ACADEMIC DATABASE ASSESSMENT TOOL (2012).....	33
Figura 8 - Estrutura e etapas da Avaliação do Ciclo de Vida. NBR 14040 (ABNT, 2009).....	64
Figura 9 – Etapas seguidas na metodologia.	82
Figura 10 – Tipos de produtos que podem ser avaliados com a FADCE.....	85
Figura 11 – Organização etapas do ciclo de vida de acordo com a EN 15804 (CEN, 2012) e produtos a serem avaliados.....	86
Figura 12 – Esquema simplificado do fluxo de carbono biogênico que pode ser adotado no modelo de plantação. (A) Biomaterial de rápido crescimento. (B) Madeira (PITTAU <i>et al.</i> , 2018). (C) Bambu (CALDAS <i>et al.</i> , 2019).	88
Figura 13 – Mapa conceitual de organização da FADCE.	89
Figura 14 – Etapas a serem consideradas em uma análise dinâmica da edificação na FADCE.	92
Figura 15 – Escopo e fronteiras avaliadas no estudo de caso do BBC.....	100
Figura 16 – Etapas de tratamento dos resíduos de bambu.....	101
Figura 17 –Carbono fixado anualmente nos colmos de diferentes espécies.	106
Figura 18 – Mapeamento dos principais insumos utilizados para a produção do BBC.	113
Figura 19 – Modelo tridimensional do projeto de edificação residencial unifamiliar avaliado no software DesignBuilder.	120
Figura 20 – Aplicação da FADCE para avaliação do BBC.....	127
Figura 21 – Emissão de Carbono (EC) para a produção dos diferentes traços de BBC utilizando o método ACVd. As barras de erros se referem as diferentes distâncias de transporte adotadas calculadas com base no desvio padrão.	136
Figura 22 – Comparação dos resultados de Emissão de Carbono (EC) e Indicadores de edificação normalizados pelo traço BBC 100/0/0.	137
Figura 23 – Potenciais impactos ambientais do BBC utilizando o método CML-IA. As barras de erros se referem as diferentes distâncias de transporte adotadas calculadas com base no desvio padrão. (A) Depleção da camada de ozônio. (B) Acidificação. (C) Eutrofização. (D) Formação de fotooxidantes. (E) Depleção abiótica de recursos – elementos. (F) Depleção abiótica de combustíveis fósseis.....	138

Figura 24 – Perfil ambiental dos impactos ambientais avaliados utilizando o método CML-IA. (A) BBC 100/0/0. (B) BBC 60/30/30. (C) BBC 50/30/20. (D) BBC 40/30/30. (E) BBC 30/30/40.....	139
Figura 25- Comparação da Emissão de Carbono (EC) com os métodos ACVd e IPCC comparando as diferentes espessuras de parede.....	140
Figura 26 – Comparação da Emissão de Carbono (EC) com os métodos ACVd e IPCC para as novas formulações de BBC.....	142
Figura 27 – Comparação do potencial aquecimento global dos BBC e sistemas construtivos convencionais utilizando os métodos ACVd e IPCC.....	145
Figura 28 – Comparação dos potenciais impactos ambientais dos BBC e sistemas construtivos convencionais. (A) Depleção da camada de ozônio. (B) Acidificação. (C) Eutrofização. (D) Formação de fotooxidantes. (E) Depleção abiótica de recursos – elementos. (F) Depleção abiótica de combustíveis fósseis.....	146
Figura 29 – Avaliação da Emissão de Carbono (EC) considerando a alocação em massa e econômica dos impactos ambientais. (A) 10 cm. (B) 20 cm.....	149
Figura 30 – Limite máximo que os resíduos de bambu podem ser transportados para ter o mesmo impacto que partículas de bambu originados de plantações virgens. (A) Sem alocação - transporte 100% Default. (B) Sem alocação - transporte 50% Empty. (C) Com alocação - transporte 100% Default. (D) Com alocação - transporte 50% Empty.....	151
Figura 31– Avaliação de diferentes fontes de incerteza na influência do carbono biogênico.....	152
Figura 32 – Aumento dos impactos ambientais com a adição da resina e diferentes vidas úteis normalizados pela alternativa sem revestimento. Avaliação para diferentes espessuras da parede de BBC. (A) 10 cm. (B) 20 cm.....	155
Figura 33 – Mapa de Emissão de Carbono (EC) do BBC 30/30/40 – 10 cm considerando um transporte mais eficiente.....	156
Figura 34 – Mapa de Emissão de Carbono (EC) do BBC 30/30/40 – 10 cm considerando um transporte menos eficiente.....	157
Figura 35 – Mapa de Emissão de Carbono (EC) do BBC 30/30/40 – 20 cm considerando um transporte mais eficiente.....	157
Figura 36 – Mapa de Emissão de Carbono (EC) do BBC 30/30/40 – 20 cm considerando um transporte menos eficiente.....	158
Figura 37 – Participação do transporte de cada insumo nas emissões de GEE totais do transporte.....	158
Figura 38 – Comparação do potencial aquecimento global do BBC utilizando o método ACVd considerando diferentes espessuras com base nos critérios de desempenho térmico e acústico.....	160
Figura 39 – Comparação da Emissão de Carbono (EC) BBC com espessura de 10 cm comparando com os usos de diferentes isolantes térmicos. (A) ACVd e (B) IPCC.....	162
Figura 40 – Comparação da Emissão de Carbono (EC) BBC com espessura de 20 cm comparando com os usos de diferentes isolantes térmicos. (A) ACVd e (B) IPCC.....	163
Figura 41 – Avaliação dos potenciais impactos ambientais considerando BBC com espessura de 10 cm comparando com os usos de diferentes isolantes térmicos. (A) Depleção da camada de ozônio. (B) Acidificação. (C) Eutrofização. (D) Formação de fotooxidantes. (E) Depleção abiótica de recursos – elementos. (F) Depleção abiótica de combustíveis fósseis.....	164
Figura 42 – Avaliação dos potenciais impactos ambientais considerando BBC com espessura de 20 cm comparando com os usos de diferentes isolantes térmicos. (A) Depleção da camada de ozônio. (B) Acidificação. (C) Eutrofização. (D) Formação de	

fotooxidantes. (E) Depleção abiótica de recursos – elementos. (F) Depleção abiótica de combustíveis fósseis.	164
Figura 43 – Consumo de energia para climatização artificial da edificação considerando arquivos climáticos originais e diferentes valores de absorvância (0,3 e 0,6).	166
Figura 44 – Consumo de energia para climatização artificial da edificação considerando arquivos climáticos futuros (resultados para absorvância 0,6).....	168
Figura 45 – Emissão de Carbono (EC) no ciclo de vida da edificação habitacional considerando os diferentes cenários e etapas de manutenção para o método de ACVd. (A) Cenário básico. (B) Mudanças Climáticas. (C) Descarbonização da Matriz de Energia. (D) Mudanças Climáticas e Descarbonização da Matriz de Energia.....	170
Figura 46 – Emissão de Carbono (EC) no ciclo de vida da edificação habitacional considerando os diferentes cenários e mesma etapas de manutenção para o método de ACVd. (A) Cenário básico. (B) Mudanças Climáticas. (C) Descarbonização da Matriz de Energia. (D) Mudanças Climáticas e Descarbonização da Matriz de Energia.	170
Figura 47 – Emissão de Carbono (EC) no ciclo de vida da edificação habitacional considerando os diferentes cenários e etapas de manutenção para o método do IPCC. (A) Cenário básico. (B) Mudanças Climáticas. (C) Descarbonização da Matriz de Energia. (D) Mudanças Climáticas e Descarbonização da Matriz de Energia.....	171
Figura 48 – Emissão de Carbono (EC) no ciclo de vida da edificação habitacional considerando os diferentes cenários e mesma etapas de manutenção para o método do IPCC. (A) Cenário básico. (B) Mudanças Climáticas. (C) Descarbonização da Matriz de Energia. (D) Mudanças Climáticas e Descarbonização da Matriz de Energia.....	171
Figura 49 – Forçamento radiativo instantâneo no ciclo de vida da edificação habitacional considerando os diferentes cenários para o método ACVd para as cidades de Curitiba e Teresina. (A) Cenário básico. (B) Mudanças Climáticas. (C) Descarbonização da Matriz de Energia. (D) Mudanças Climáticas e Descarbonização da Matriz de Energia.	176
Figura 50 – Participação da Emissão de Carbono (EC) incorporada e operacional para o método da ACVd. (A) Cenário básico. (B) Mudanças Climáticas. (C) Descarbonização da Matriz de Energia. (D) Mudanças Climáticas e Descarbonização da Matriz de Energia.....	178
Figura 51 – Participação da Emissão de Carbono (EC) incorporada e operacional para o método do IPCC. (A) Cenário básico. (B) Mudanças Climáticas. (C) Descarbonização da Matriz de Energia. (D) Mudanças Climáticas e Descarbonização da Matriz de Energia.....	178
Figura 52 – Inventário de GEE na participação das etapas incorporadas do ciclo de vida. (A) CO ₂ . (B) CH ₄ . (C) N ₂ O. (D) CO.	179

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Estratégias para mitigação e adaptação das edificações às mudanças climáticas.	27
Quadro 2 – Etapas do ciclo de vida de uma edificação consideradas pelas normas EN 15978 (CEN, 2011) e EN 15804 (CEN, 2012).	68
Quadro 3– Categorias de impactos ambientais segundo a EN 15804 (2012) que serão consideradas nesta pesquisa.	72
Quadro 4 – Itens a serem avaliados na análise de sensibilidade e incerteza de um sistema construtivo.	94
Quadro 5 – Traços dos BBC avaliados (em kg/m ³) por ANDREOLA <i>et al.</i> (2019).	98
Quadro 6 – Propriedades dos traços dos BCC avaliados por ANDREOLA <i>et al.</i> (2019).	99
Quadro 7 – Insumos e atividades considerados no inventário do ciclo de vida do BBC.	102
Quadro 8 – Insumos e atividades consideradas para a reciclagem das partículas de bambu	103
Quadro 9 – Distâncias de transporte consideradas no estudo de caso.	105
Quadro 10 – Dados de entrada para modelagem da carbonatação no estudo de caso.	107
Quadro 11 – Coeficientes de alocação utilizados na modelagem do estudo de caso calculados com base nas equações 3.6 e 3.7.	110
Quadro 12 – Atividades e insumos considerados na plantação de bambu.	111
Quadro 13 – Atividades consideradas na produção de partículas de bambu virgens.	111
Quadro 14 – Distâncias de transporte (A2) dos insumos das fábricas/locais de produção até a fábrica de BBC.	114
Quadro 15 – Dados para avaliação dos critérios de desempenho dos sistemas estudados.	116
Quadro 16 – Novas espessuras como unidade funcional considerando critérios de desempenho térmico e acústico.	117
Quadro 17 – Espessura de isolantes térmicos adicionados considerando diferentes espessuras da parede do BBC.	118
Quadro 18 – Insumos e atividades considerados na modelagem dos isolantes térmicos.	118
Quadro 19 – Dados de entrada utilizados na simulação computacional no DesignBuilder.	121
Quadro 20 – Cenários considerados para a quantificação do consumo de energia para climatização artificial da edificação.	123
Quadro 21 – Cenários considerados descarbonização da matriz de energia elétrica (LA ROVERE <i>et al.</i> , 2016).	123
Quadro 22 – Consumos anuais de energia elétrica para as seis cidades avaliadas e cenário de mudanças climáticas.	124
Quadro 23 – Traços de bioconcreto com potencial de EC negativa (em m ³).	142
Quadro 24 – Avaliação das categorias de impacto ambiental com base nos materiais, atividades e substâncias responsáveis.	147
Quadro 25 – Contribuição do metacaulim de acordo com o tipo de combustível utilizado na calcinação para as diferentes categorias de impacto ambiental.	154
Quadro 26 – Avaliação classificação das alternativas das outras categorias de impacto ambiental sendo 1 – mais vantajosa e 4 – menos vantajosa.	180

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	FADCE	Ferramenta de Análise Dinâmica para Avaliação da Emissão de Carbono em Edificações
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida	GEE	Gases de Efeito Estufa
ACVd	Avaliação do Ciclo de Vida Dinâmica	GWP	<i>Global Warming Potential</i>
ADP-e	Depleção Abiótica de Elementos	IEA	<i>International Energy Agency</i>
ADP-f	Depleção Abiótica de Combustíveis Fósseis	IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
AP	Acidificação	MMA	Ministério do Meio Ambiente
BAMB	<i>Buildings as Material Banks</i>	MME	Ministério de Minas e Energia
BBC	Bioconcreto de bambu	N₂O	Óxido Nitroso
BIM	<i>Building Information Modeling</i>	NDC	<i>Nationally Determined Contributions</i>
COP	Conferência das Partes	ODP	Depleção da Camada de Ozônio
CaCl₂	Cloreto de Cálcio	ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
CH₄	Metano	ONU	Organização das Nações Unidas
CO	Monóxido de Carbono	PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
CO₂	Dióxido de Carbono	POCP	Formação de Fotooxidantes
CO₂-eq	Dióxido de Carbono Equivalente	Rw	Índice de Redução Sonora Ponderada
Ct	Capacidade Térmica	VMA	Aditivo Modificador de Viscosidade
DSR	<i>Design Science Research</i>	U	Transmitância Térmica
EC	Emissão de Carbono	UN	<i>United Nations</i>
EP	Eutrofização	UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1. Contextualização

1.1. Contexto Atual e Futuro das Cidades e Edificações

As cidades são apontadas como os principais locais concentradores de consumo de recursos naturais, emissões dos Gases do Efeito Estufa (GEE) e geração de grandes quantidades de resíduos. Atualmente, cerca de 54% da população mundial vive nas cidades, e, espera-se que até 2050 esse número atinja 70%; sendo que o maior crescimento estará concentrado em países em desenvolvimento, pertencentes à Ásia, África e da América Latina (UNEP, 2017).

A Organização das Nações Unidas (ONU), em 2015, lançou os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), a fim de criar uma agenda comum entre os países participantes, para conseguir atingir metas desenvolvimento sustentável, através de 17 ODS. Essas metas são amplas e conectadas entre si e abrangem questões de desenvolvimento ambiental, social e econômico, como saneamento, energia, aquecimento global, pobreza, saúde, educação, igualdade de gênero, entre outras (UN, 2015). O ODS nº 11 trata especificamente de “Cidades e Comunidades Sustentáveis”, o que mostra a importância desse tema na agenda mundial e o ODS nº 13 de “Ação Contra a Mudança Global do Clima”.

Somado a isso está cada vez mais em evidência no mundo a importância de se pensar em uma economia circular, que priorize a reutilização e reciclagem de resíduos e a economia de recursos naturais, de uma forma integrada, colaborativa e inteligente. (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017). O ODS nº 12 que discorre sobre “Consumo e Produção Responsáveis” está diretamente relacionado a esse modelo econômico.

A indústria da construção civil é um dos setores industriais mais impactantes em termos de consumo de recursos naturais e geração de resíduos sólidos, já que a construção de obras de infraestrutura, como estradas, pontes, redes de água e esgoto e edificações são elementos essenciais para a qualidade de vida da população. Estima-se que a indústria de construção responde por cerca de 50% de todo o material extraído no planeta (EU,

2020). Dessa forma, é um dos setores que tem papel chave para atender os requisitos dos ODS e pensar de uma forma mais circular.

Para o Brasil, dados do relatório da FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (2018) mostram um déficit habitacional estimado superior a seis milhões de domicílios, localizados majoritariamente nas áreas urbanas (cerca de 90%), e concentrado nas regiões Sudeste e Nordeste. Neste sentido, espera-se que o setor da construção civil, principalmente o de edificações, o qual experimentou uma grave crise nos últimos anos, volte a crescer futuramente, aumentando o consumo de recursos naturais e geração de impactos ambientais, entre eles, a contribuição para o problema das mudanças climáticas.

As edificações possuem um longo ciclo de vida, que vai desde a extração de suas matérias primas para a confecção dos materiais utilizados, o transporte e construção, passando pelo uso e manutenção, até o momento de seu fim de vida. A etapa de uso, por ser a maior parcela no ciclo de vida de uma edificação, tende a ser a mais impactante, fruto principalmente do consumo de energia elétrica e outras fontes utilizadas diretamente como o gás natural para aquecimento e cocção (CABEZA *et al.*, 2014).

No mundo, as edificações foram responsáveis por cerca de 36% do consumo de energia final, e 39% emissão de dióxido de carbono (CO₂), considerando emissões diretas, indiretas e incorporadas (no ciclo de vida dos materiais e produtos de construção) para o ano de 2018 (UNEP, 2019). No Brasil, dados do Balanço Energético Nacional (MME, 2020), apontam que as edificações residenciais, públicas e comerciais consumiram 52 % de toda a energia elétrica produzida no país, no ano de 2019. Grande parte desse consumo de energia e emissão de CO₂ e outros GEE estão relacionados à climatização artificial para atendimento de questões de conforto térmico dos usuários das edificações.

Nessa ótica, esse cenário é mais preocupante, pois a temperatura global combinada da superfície terrestre e oceânica teve um aquecimento médio de 0,85 °C (0,65 a 1,06 °C) entre o período de 1880 a 2012, de acordo com os dados do Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas - IPCC (2014). Dessa forma, é de se esperar que haverá a elevação do consumo de energia nessas edificações, principalmente em países de climas tropicais e subtropicais. O relatório da Agência Internacional de Energia - IEA (2019) mostrou que o uso de ar condicionado foi o que mais cresceu (mais que triplicou), quando comparado a outros em usos finais; entre 1990 e 2016 continuará crescendo nas

próximas décadas, principalmente em países de clima quente e de elevado crescimento populacional, como é o caso do Brasil.

Neste contexto, o estudo e desenvolvimento de novos materiais e sistemas construtivos vem sendo alvo de diversos grupos de pesquisas nacionais e internacionais, como uma alternativa para a mitigação da emissão de CO₂, que é o principal GEE (IPCC, 2014), e adaptação no setor da construção civil, especialmente no uso das edificações, e agora com necessidade de atender às metas relacionadas aos ODS e com um pensamento de forma circular, com o incentivo para uso de recursos renováveis e mais inteligente. A Figura 1 resume qual o contexto atual e futuro em que as cidades e edificações precisam ser pensadas a fim de se ter um futuro sustentável e onde os biomateriais, e especialmente o bioconcreto (um dos objetos de pesquisa desta tese) estará inserido.

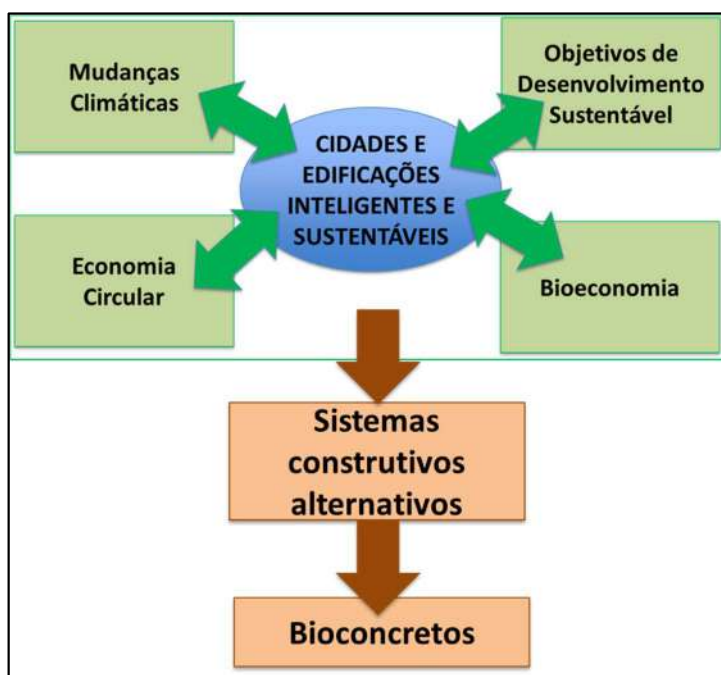


Figura 1 – Esquema conceitual do contexto atual e futuro que as cidades e edificações estão inseridas e desenvolvimento de bioconcretos.

Em 2015 na Conferência das Partes (COP), realizada em Paris, o Brasil ratificou o Acordo de Paris e se comprometeu a reduzir 37% das emissões de GEE até 2025 e 43% até 2030, tendo como base as emissões de 2005. Algumas das metas propostas, presentes no documento da “Contribuição Nacionalmente Determinada” (NDC, na sigla em inglês) foram a restauração de 12 milhões de hectares de florestas e a promoção do uso de tecnologias limpas no setor industrial (MMA, 2018). Dessa forma, o setor de construção civil que é um dos principais consumidores dos recursos naturais e com

grande contribuição nas emissões de GEE, precisa também ter estratégias e soluções para o enfrentamento às mudanças climáticas.

1.2. Mudanças Climáticas, Economia Circular, Edificações e Biomateriais

As mudanças climáticas podem ser consideradas um dos principais desafios e preocupações de diversos países desenvolvidos e em desenvolvimento do mundo. O entendimento das mudanças climáticas pode ser dividido principalmente em dois temas: (1) Mitigação e (2) Adaptação (IPCC, 2013), sendo que as edificações possuem relação direta com ambos.

Por um lado, as edificações são apontadas como um dos principais setores de emissão de GEE (UN, 2019), e portanto, com potencial de reduzir e mitigar as mudanças climáticas, caso ações sejam pensadas; ao mesmo tempo são os locais que necessitarão de modificações, ou seja, adaptações (conceituais, tecnológicas, construtivas, etc.) com o prosseguimento dos efeitos adversos das mudanças climáticas (aumento de temperatura, precipitações, velocidade do vento, etc.) até o final do século.

Nessa ótica, é cada vez mais importante que nos projetos de edificações estejam presentes diretrizes e estratégias que contemplem formas de mitigar e torná-las as edificações e os materiais utilizados adequados, mais circulares e resilientes às mudanças climáticas. Dentre os impactos que afetarão as edificações no futuro, de acordo com dados do IPCC (LUCON *et al.*, 2014), o aumento de temperatura, e, conseqüentemente o aumento do consumo de energia para climatização artificial deve ser um dos principais. É esperado que esse efeito seja observado principalmente em países de clima tropical, como é o caso do Brasil.

A partir desse contexto, diferentes estratégias podem ser pensadas para tornar as edificações ditas como de baixo carbono, como é apresentada por PONPONI e MONCASTER (2018) e GONZÁLEZ-MAHECHA *et al.* (2019), onde algumas são importantes para torná-las mais adaptadas às possíveis modificações futuras. Dentre essas alternativas, a adoção da solução construtiva mais adequada ocupa um lugar de destaque, tendo em vista que os sistemas construtivos a serem utilizados em uma edificação (por exemplo nas estruturas, nas fachadas e nas coberturas) tendem a perdurar por mais de 50 anos, enquanto que tecnologias (como equipamentos de iluminação e climatizadores) podem mudar com mais frequência.

Como já foi falado, ainda haverá um grande déficit habitacional, principalmente em países em desenvolvimento. Dessa forma, as edificações devem ser vistas não apenas como geradoras de impactos negativos, mas sim, como uma grande oportunidade, servindo de estoque, tanto para a utilização resíduos que até então seriam descartados no meio ambiente, como também estoque de carbono, principalmente com o uso crescente de biomateriais como apontam CHEN *et al.* (2020) e CHURKINA *et al.* (2020). O projeto europeu *Buildings as Material Banks* (BAMB, 2020) traz esse olhar, pois foi criado para pensar as edificações como banco de materiais, a fim de possibilitar o reaproveitamento dos materiais de construção quando chegarem em seu fim de vida, sendo, portanto, uma importante referência para o desenvolvimento de edificações circulares e mais sustentáveis.

Dentre os elementos de uma edificação, a envoltória, composta por fachadas, cobertura e piso, pode ser considerada como um dos mais importantes (IWARO; MWASHA, 2013), pois além de ser responsável por parcela importante dos impactos ambientais de produção dos materiais utilizados, ela possui papel fundamental para um bom desempenho da edificação e conforto dos usuários, como: térmico, acústico, lumínico, estanqueidade, durabilidade, etc. Como demonstra IVIDIATA e GHISI (2016) para cenários de aumento de temperatura do planeta, onde um projeto que considere características bioclimáticas, com soluções adequadas da envoltória será ainda mais importante.

Neste sentido, o maior desafio está na busca de materiais e tecnologias construtivas multifuncionais, que sejam adequadas as condições ambientais, atuais e futuras, em que a edificação está inserida e ao mesmo tempo, sejam de menor impacto ambiental e com potencial regenerativo. ROCK *et al.* (2020) chamam a atenção para o termo “investimento de baixo carbono”, que seria o uso de estratégias (ou investimentos tecnológicos) que consigam diminuir as emissões de GEE na operação da edificação, mas, que ao mesmo tempo possuam baixas emissões de GEE no seu ciclo de vida (produção, uso e fim de vida).

O termo emissão de carbono ou baixo carbono pode gerar confusões, principalmente se está se fazendo referência à contabilização de CO₂ ou CO₂-eq (CO₂ equivalente¹). Nesta tese, o termo emissão de carbono (EC) estará se referindo a somatória de GEE, medido em termos de CO₂-eq, de acordo com as normas de EC (ISO 14067:2018) e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de produtos de construção (EN 15804:2012). As próximas referências ao CO₂ estarão relacionadas a esse gás quando absorvido no processo de fotossíntese ou carbonatação ou devolvido de alguma forma à atmosfera. O CO₂-eq fará referência ao balanço entre os GEE que são emitidos (CO₂, CH₄, N₂O, etc.) e o CO₂ que é absorvido (seja pela fotossíntese ou carbonatação).

O emprego de biomateriais, como madeira, bambu e bioconcreto é uma prática que vem sendo incentivada principalmente por países europeus, no contexto de políticas de baixo carbono e consumo de energia, para o desenvolvimento de uma bioeconomia circular (RAMAGE *et al.*, 2017). No Brasil, a bioeconomia apresenta-se como um dos temas da Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação como forma de agregar valores aos recursos naturais e serviços ambientais, e contribuir para o desenvolvimento de soluções para diversos setores produtivos, inclusive o da construção civil (MCTI, 2019). Ainda neste contexto, a industrialização e desmaterialização da construção, a fim de se obter materiais e sistemas mais leves e de menor consumo de material, também têm sido desenvolvidas e incentivadas.

Bioconcretos em especial, são materiais mais leves que os convencionalmente, utilizados como concreto e cerâmica, além de poder oferecer um melhor desempenho térmico e energético para a envoltória das edificações, resultando em uma economia de energia durante sua operação (AMZIANE; SONEBI, 2016). No Brasil, tem sido desenvolvido bioconcretos com resíduos vegetais, como casca de arroz, serragem e partículas de bambu (CALDAS *et al.*, 2017), com o intuito de dar um destino mais nobre para esses resíduos, incentivando o desenvolvimento de produtos circulares, e ao mesmo tempo conseguir uma tecnologia mais eficiente (do ponto de vista térmico) para as edificações. Portanto, o uso de bioconcretos em edificações é uma alternativa capaz de

¹ É uma medida utilizada para comparar as emissões de vários GEE, baseada no Potencial de Aquecimento Global (GWP, sigla em inglês). O CO₂-eq é o resultado da multiplicação das toneladas emitidas de cada GEE pelo seu respectivo GWP, em que é normalmente utilizado o horizonte temporal de 100 anos – GWP100 (a saber, CO₂ = 1, CH₄ = 28, N₂O = 265, etc. de acordo com Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC) (IPCC, 2014).

atender os principais desafios da atualidade e futuros: as mudanças climáticas, os ODS e um pensamento mais circular.

Para que essa afirmação possa ser realizada, esses materiais precisam ainda ser avaliados do ponto de vista ambiental, principalmente em relação aos impactos das mudanças climáticas, ao longo de seu ciclo de vida. No entanto, a metodologia de ACV convencionalmente aplicada para o estudo de edificações e biomateriais não consegue ser sensível a muitos aspectos relacionados às mudanças climáticas, principalmente questões dinâmicas futuras relacionadas ao consumo de energia elétrica para climatização artificial e como o CO₂ absorvido pelos biomateriais será contabilizado (SU *et al.*, 2017; ROCK *et al.*, 2020). Nessa ótica, há a necessidade de alguma ferramenta mais robusta e sensível para a avaliação desses materiais, especialmente os bioconcretos, quando utilizados em edificações.

Dentre esses bioconcretos, o de bambu tende a ser bastante promissor tendo em vista que florestas e plantações de bambu possuem um rápido crescimento e elevada produtividade, e, conseqüentemente um importante papel como sumidouro de CO₂ atmosférico. Com a questão das mudanças climáticas cada vez mais em foco, o uso do bambu na construção civil tende a ser cada vez mais explorado, sendo uma estratégia potencial para a mitigação do aquecimento global no Brasil e no mundo (INBAR, 2014).

Adicionalmente, sabe-se que durante o processamento do bambu podem ser geradas grandes quantidades de resíduos, até 60% (ESCAMILLA; HABERT, 2014), fazendo o aproveitamento desse resíduo ser uma tarefa fundamental, indo ao encontro às diretrizes da economia circular, sendo a proposta do bioconcreto de bambu desenvolvido por ANDREOLA (2017).

Portanto, primeiramente é preciso entender como ocorre o uso do bambu no mundo e no Brasil, em termos de seu ciclo de vida até a geração dos resíduos que serão utilizados para a produção do bioconcreto, para que seja realizada uma avaliação ambiental desse material.

1.3. Bambu no Mundo e no Brasil

O bambu é classificado como uma gramínea, sendo que o desenvolvimento de florestas de bambu ocorre em regiões de clima tropical, subtropical e temperado, podendo ser verificado nos continentes da Oceania, Ásia, África e Américas, (INBAR, 2012).

Em 1997, foi criada a organização *International Network for bamboo and Rattan* (INBAR), que consta atualmente com 43 membros, e que nos últimos 20 anos vem realizando estudos e discussões relevantes para o incentivo ao uso e desenvolvimento de produtos de bambu ao redor do mundo (INBAR, 2018).

O valor de exportação total de produtos de bambu atingiu, em 2012 US\$ 1.881 milhões (INBAR, 2012), sendo que os principais países e blocos comerciais exportadores e importadores de produtos de bambu para esse ano foram os apresentados na Figura 2.

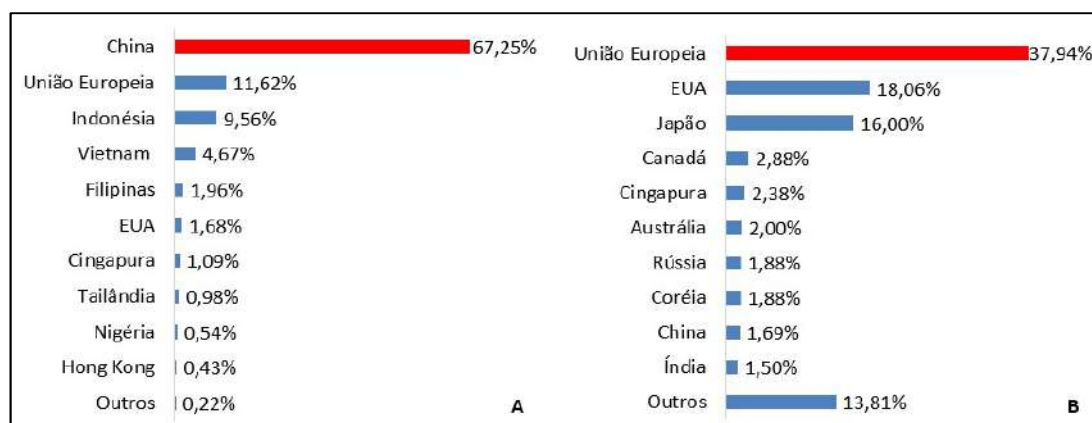


Figura 2 - Principais países e blocos comerciais exportadores e importadores de produtos de bambu no ano de 2012. (A) Exportadores. (B) Importadores. Inbar (2012).

Observa-se que a China se destaca como maior exportadora e os países da União Europeia os maiores importadores de produtos industrializados de bambu. Os produtos industrializados, como laminados, tecidos de bambu e mobiliário ocuparam 70% dos produtos comercializados.

Especificamente na construção civil tem se verificado cada vez mais o emprego de produtos industrializados de bambu, podendo os mesmos serem aplicados em fachadas, pisos, mobiliário, esquadrias e estruturas, para diversas tipologias de edificação e em diferentes países (Figura 3).

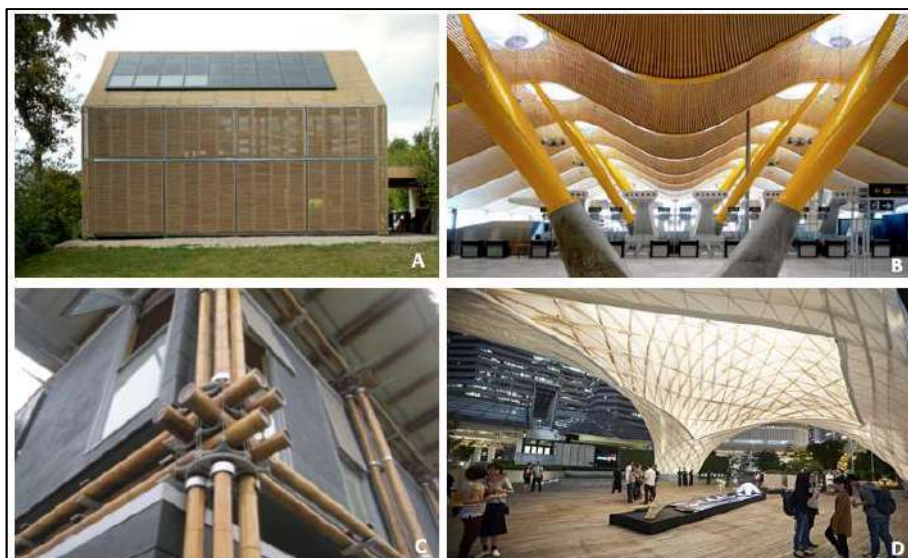


Figura 3 - Projetos de edificações com uso de produtos de bambu. (A) Fachada na Casa Passiva (Passivhaus) - França (B) Forro do Aeroporto de Madrid-Barajas - Espanha.(C) Estrutura do Edifício de Bambu Energicamente Eficiente - China. (D) Estrutura do Pavilhão Zero Carbon Bamboo (ZCB) - Hong Kong

Fonte: <https://www.archdaily.com.br>

Desta forma, países que possuem condições favoráveis, em termos territoriais e climáticos, e aqueles que possuem capacidade de desenvolvimento tecnológico podem ser futuros investidores da cadeia de Bambu, como é o caso do Brasil. O rápido crescimento e a capacidade de armazenar grandes quantidades de carbono tem também feito esse material receber atenção especial frente a políticas para mitigação e adaptação das mudanças climáticas (INBAR, 2014).

Diferentemente da China, o Brasil possui pouca experiência com a produção de plantações e produtos de bambu, mas por outro lado, o país possui condições adequadas para a exploração desse material, dado as condições climáticas favoráveis e áreas disponíveis. De todos os países da América Latina, o Brasil é o que possui a maior diversidade de espécies (GRECO; CROMBERG, 2011). Na Figura 4 é apresentado o mapa da distribuição de plantações de bambu no Brasil. O bambu pode ser localizado em quase todas regiões brasileiras, Norte, Nordeste, Sudeste e Sul (FIALHO, 2005).



Figura 4 - Distribuição geográfica de plantações de bambu no Brasil.
Adaptado de FIALHO *et al.* (2005).

A produção brasileira de bambu está voltada principalmente para o setor de mobiliário e artesanato, sendo que também existem plantações comerciais para produção de sacarias de cimento, como por exemplo, a do grupo João Santos no Nordeste e produção de energia em termoeletricas (GUARNETTI, 2013; ANDREOLA, 2017). No entanto, o uso do bambu no Brasil pode se dar em diversos outros segmentos, como o da construção civil, papel e celulose, biorrefinaria, energia renovável, madeireiro e de biotecnologia. O uso do bambu também é viável e recomendado para áreas degradadas (SANTI, 2015).

Nos últimos anos foram sendo formados importantes grupos de pesquisa e associações nacionais que têm o objetivo de estudar e impulsionar o uso do bambu no Brasil, entre eles a Rede Brasileira do Bambu (RBB), a Associação Brasileira dos Produtores de Bambu (APROBAMBU) e, a Associação Catarinense do Bambu (BambuSC), que também possuem importantes dados e informações sobre o bambu no país.

A comercialização de produtos de bambu mais industrializados e de alto desempenho pode vir a preencher uma demanda interna do país, principalmente para a produção de laminados e painéis, em substituição à produtos de madeira e produção de colmos para a utilização em estruturas, como também ser alvo de exportação, principalmente para países europeus, que são os maiores consumidores de produtos industrializados de bambu no mundo (INBAR, 2012).

Como a matriz de energia elétrica brasileira é composta de uma parcela significativa de fontes renováveis (cerca de 80% para o ano de 2018), de acordo com o Balanço Energético Nacional (MME, 2020) a confecção de produtos industrializados de bambu no Brasil tem uma potencialidade maior de ter uma baixa emissão de carbono, sendo uma alternativa bastante interessante para a questão das mudanças climáticas.

No entanto, os reais benefícios em termos de impactos ambientais e emissão de carbono, na plantação e uso de produtos de bambu nesses setores, e principalmente na construção civil brasileira, devem ser mensurados e comparados com materiais comercialmente já utilizados no país. A metodologia de ACV, que tem sido utilizada para quantificar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de um processo, produto ou serviço, com o uso cada vez mais difundido no setor da construção civil, se mostra como uma ferramenta de grande potencial (ANAND; AMOR, 2017).

A ACV aplicada a biomateriais de construção civil, ainda é um tema pouco explorado (quando comparada aos outros materiais), principalmente quando direcionada a produtos de bambu. Internacionalmente alguns estudos merecem destaque, em particular, ESCAMILLA e HABERT (2014) e ESCAMILLA *et al.* (2016) que aplicaram a ACV para quantificar os impactos ambientais de produtos de bambu em edificações.

No Brasil, estudos de ACV sobre produtos de bambu ainda são muito escassos, sendo encontrados os estudos de NETTO e GIANNETTI (2009), e MARÇAL *et al.* (2016), ambos com foco somente em emissão de carbono, sem a contabilização de outros impactos ambientais e com foco em produtos específicos, como escoras para a construção, sem levar em consideração o impacto do uso desses produtos em uma edificação.

1.4.Cadeia Produtiva de Bambu e Geração de Resíduos

DRUMOND e WIEDMAN (2017) apontam que no território brasileiro está presente o maior índice de florestas endêmicas de bambu da América Latina. Estima-se que existam mais de 17 gêneros e mais de 130 espécies de bambus espalhadas pelos estados do Paraná, Santa Catarina, Minas Gerais, São Paulo, Bahia e Acre.

Nos últimos anos, a discussão sobre o problema do aquecimento global e mudanças climáticas tem despertado o interesse por alternativas para a redução das emissões de CO₂ e formas de sequestro e armazenamento desse gás. O bambu devido as suas características de rápido crescimento e elevada produtividade, tem chamado a atenção como uma possível solução de curto prazo e baixo custo, podendo ser aplicado principalmente em regiões vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas (INBAR, 2014).

Quando se pensa no potencial de sequestro de CO₂ por plantações de bambu, dois itens merecem destaque: (1) a produtividade da floresta, ou seja, a quantidade de biomassa produzida em uma certa área, normalmente expressa por tonelada de matéria seca por hectare por ano (GRECO; CROMBERG, 2011); (2) o teor de carbono presente na espécie plantada. DELGADO (2011) aponta a produtividade de plantações de bambu variando de 40 a 60 toneladas de matéria seca/ha. ano, enquanto o eucalipto chega a valores que variam de 30 a 50 toneladas de matéria seca/ha. ano e o pinus entre 25 e 35. DALLAGNOL (2012) avaliou o teor de carbono em diferentes espécies de bambu, *Guadua chacoensis*, *Merostachys skvortzovii*, *Dendrocalamus asper*, *Bambusa vulgaris*, *Bambusa oldhamii*, e chegou a valores médios de carbono variando de 42 a 47 % em relação à massa seca de bambu. Desta forma, plantações com elevadas produtividades e maiores teores de carbono são as mais eficientes em termos de sequestro de CO₂.

O uso do bambu na forma de colmos pode ser considerado o mais simples, dentre as diferentes opções existentes para a construção civil, pois não precisa de nenhum processo industrial muito elaborado, como por exemplo o que ocorre para produção de laminados e painéis de bambu. Em edificações, eles podem ser empregados como elementos estruturais, por exemplo, pilares. No entanto, como os bambus são materiais heterogêneos, e colmo não tem o mesmo diâmetro em todo seu comprimento, normalmente para o uso como elemento estrutural, suas pontas são cortadas, podendo gerar perdas de até 30%, segundo dados de um projetista/construtor da região do Rio de Janeiro. Quando se pensa em formas mais industrializadas, como é o caso de tecidos, chapas ou laminados colados, as perdas são maiores, podendo chegar até 60% (RASTREPO *et al.*, 2016).

Pensando nas diferentes opções de uso de bambu, é possível concluir que na maioria dos produtos há uma geração expressiva de resíduos, esses que normalmente são queimados e muitas das vezes sem aproveitamento energético.

No entanto, quando queimados deixam de ser uma importante fonte de sumidouro de carbono, pois devolverão o CO₂ estocado para atmosfera. Neste sentido, pensando em uma cadeia que preze pelo estoque de CO₂, é mais interessante que esses resíduos sejam incorporados em algum produto, de preferência inerte e com uma elevada durabilidade, a fim de armazenar indefinidamente esse gás que foi absorvido durante a fotossíntese na plantação. Pensando neste problema específico, surgiu o bioconcreto de bambu (*Bamboo Bio-Concrete* - BBC), que é um material cimentício que utiliza resíduos de bambu como insumo.

1.5. Bioconcretos de Bambu

O BBC (Figura 5) é um material cimentício produzido em laboratório, desenvolvido por ANDREOLA (2017), que utiliza resíduos de bambu, de diferentes tamanhos. A matriz cimentícia é composta de cimento Portland CPV, metacaulim e cinza volante. São misturados com os resíduos, aditivos químicos, como acelerador de pega, cloreto de cálcio (CaCl₂), e modificador de viscosidade (VMA) e água.

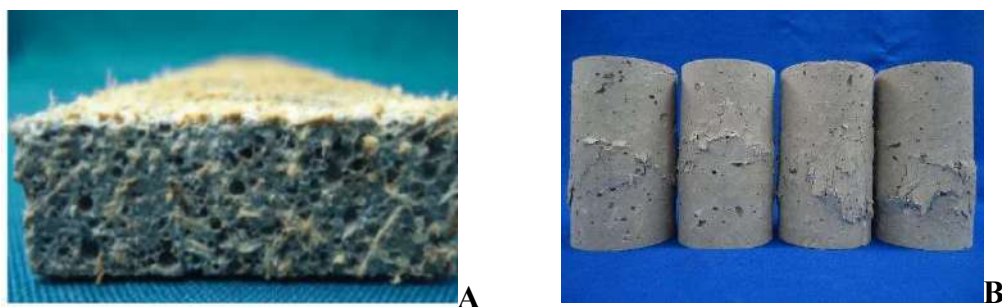


Figura 5 – Bioconcreto de bambu avaliado (BBC). (A) Seção. (B) Corpos de prova moldados.

Fonte: ANDREOLA *et al.* (2017).

Esse material tem como vantagem as seguintes características: (1) utiliza resíduos de bambu como matéria prima, sendo, portanto, uma alternativa para a destinação final desses resíduos; (2) tem potencial de estocar carbono biológico por um período longo, contribuindo assim para a mitigação das Mudanças Climáticas; (3) é um material mais leve que concretos convencionais, facilitando o transporte e execução durante a construção; (4) tem diversidade de usos podendo ser utilizado como fechamentos

verticais (fachada e divisórias), fechamentos horizontais, elementos de sombreamento e mobiliário urbano; (5) tem um bom desempenho térmico, com potencial de trazer ganhos de eficiência energética nas edificações, inclusive para cenários de aumento de temperatura, ou seja, podendo ser uma estratégia de adaptação das edificações (ANDREOLA, 2017).

Embora o BBC tenha esses potenciais credenciais ambientais é necessário que elas sejam medidas e avaliadas de forma quantitativa. Nessa ótica, a ACV pode ser empregada a fim de avaliar o desempenho ambiental desse material, como também apontar formas e estratégias de melhoria.

2. Inovação da Tese

A presente tese trás duas inovações: (1) a proposição de uma “Ferramenta de Análise Dinâmica para Avaliação da Emissão de Carbono em Edificações pelo uso de Biomateriais”, e (2) a sua aplicação para o estudo do BBC que também é um material inovador.

3. Justificativa e Relevância da Tese

A presente pesquisa se justifica por propor uma ferramenta com potencial de mensurar, de forma objetiva, e mais sensível, os potenciais benefícios ambientais, especialmente em relação à emissão de carbono, quando biomateriais de construção são utilizados em comparação com materiais convencionalmente utilizados em edificações. Dessa forma, quando essa ferramenta é empregada ela pode auxiliar à tomada de decisão em relação à mitigação e adaptação de projetos de edificações às mudanças climáticas, como contribuir para o desenvolvimento de uma estratégia de construção circular. Para o caso específico do BBC, como ele é um material inovador, essas informações ainda não estão disponíveis.

Na União Europeia é cada vez mais discutida e incentivada a chamada bioeconomia circular, definida como um desenvolvimento econômico mais sustentável, de ciclo fechado, que considera a substituição gradativa de recursos fósseis por recursos renováveis, de origem biológica, com máximo aproveitamento de recursos e minimização da geração de resíduos. Ela leva em consideração soluções que combinem o crescimento econômico com a responsabilidade global pela nutrição mundial, pela proteção ambiental e do clima. As diretrizes desse tipo de desenvolvimento podem e

devem ser difundidas nos setores chave da economia de um dado país, entre eles: automobilístico, construção, química, energia, agricultura e floresta, engenharia mecânica, alimentação, farmacêutica, bens de consumo e têxtil (BMBF, 2015).

Relatórios das Nações Unidas apontam que tecnologias que fazem uso de recursos naturais tendem a ser os mais competitivos para a mitigação e adaptação das mudanças climáticas, sendo que o investimento em florestas, para absorção e estoque de CO₂ é considerado como um dos mais eficientes dentre as alternativas existentes, ocupando cerca de 2/3 de todas as alternativas naturais existentes no planeta, seguida do fim do desmatamento e manejo sustentável das florestas existentes (SENGUPTA, SIKAMAKI, 2018). O último Relatório do Status Global de Edifícios e Construção das Nações Unidas (UNEP, 2019) coloca como uma das recomendações globais o incentivo e o uso de produtos de construção de baixo carbono e circulares. O Relatório especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) sobre biomateriais de construção e mudanças climáticas (PBMC, 2018) ressalta a importância desses materiais para a mitigação e adaptação das edificações às mudanças climáticas.

Devido a disponibilidade na maior parte dos países europeus, a principal biomassa tratada nos estudos sobre bioeconomia é a madeira, existindo pouco desenvolvimento com o bambu, o que pode ser visto como um desperdício de oportunidade. Assim como na China, o bambu pode vir a se tornar um importante ator para o desenvolvimento da bioeconomia brasileira, abastecendo tanto o mercado interno como o mercado de exportação.

Caso essa cadeia produtiva de bambu venha a se desenvolver no Brasil, sabe-se que serão gerados grande quantidade de resíduos de bambu durante o processamento. Neste sentido, o desenvolvimento de um bioconcreto que aproveite e agregue valores a esses resíduos, e ao mesmo tempo consiga estocar CO₂ melhorando as propriedades desse material, pode vir a ser uma estratégia bastante promissora. Mas para isso, é preciso avaliar ambientalmente esse novo material, principalmente relacionado ao seu potencial de mitigar o aquecimento global.

O entendimento e quantificação dos benefícios ambientais do BBC é um requisito básico e pode auxiliar o setor da construção a ir de encontro aos três desafios globais

que o Brasil e o restante dos países precisam se adequar: cumprimento dos ODS, Economia ou Bioeconomia Circular, Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas.

O uso de uma abordagem dinâmica científica nessa avaliação, com base na chamada ACV dinâmica, tornam os achados dessa pesquisa ainda mais sensíveis e robustos. Isso se dá pelo fato dessa metodologia conseguir mensurar de forma mais precisa os diferentes fluxos de GEE, e, conseqüentemente os impactos referentes às mudanças climáticas ao longo do ciclo de vida de edificações que façam uso de biomateriais, especialmente do BBC.

Espera-se que os resultados apresentados nesta pesquisa sirvam de embasamento para fortalecer o desenvolvimento desse novo material de construção, a respeito de informações sobre seus impactos ambientais, além da ferramenta desenvolvida aqui, poder ser aplicada e adaptada para o estudo de outros biomateriais, especialmente outros bioconcretos, estimulando o desenvolvimento de uma bioeconomia circular no setor de construção.

4. Objetivos

4.1. Objetivos Gerais

- Proposição de uma Ferramenta de Análise Dinâmica para Avaliação da Emissão de Carbono em Edificações (FADCE) pelo Uso de Biomateriais;
- Aplicação da ferramenta para o estudo do BBC, em que serão buscados alguns objetivos específicos.

4.2. Objetivos Específicos Referentes ao Estudo do BBC

- Comparar impacto de emissão de carbono (potencial de mitigação em relação às mudanças climáticas) e outros impactos ambientais no ciclo de vida do BBC em relação a outros sistemas construtivos convencionalmente utilizados em edificações no Brasil.
- Apresentar estratégias para redução dos impactos ambientais no ciclo de vida do BBC.
- Propor novas formulações de BBC para que o balanço da emissão de carbono seja neutro ou negativo.

- Avaliar como diferentes aspectos metodológicos, ex. transporte (distâncias de transporte e eficiência) e alocação do impacto nos resíduos utilizados no BBC influenciam os resultados considerando um contexto de economia circular.
- Avaliar o desempenho termoenergético quando o BBC é utilizado na fachada de edificações habitacionais brasileiras, considerando cenário atual e futuros, e cidades de diferentes zonas bioclimáticas (potencial de adaptação em relação às mudanças climáticas).
- Investigar a influência de escolhas metodológicas nos resultados, aplicando ACV atribucional convencional e ACV dinâmica.

5. Limitações da Pesquisa

Como o BBC é um material inovador e que ainda se encontra em desenvolvimento, a sua avaliação se restringiu a seu desempenho ambiental, térmico e acústico (sendo que para esse requisito foi realizada uma avaliação de forma simplificada), tendo em vista que já existem dados disponíveis para a modelagem.

Adicionalmente, o desempenho térmico está diretamente relacionado à climatização artificial das edificações, e, conseqüentemente tem maior influência na questão da emissão de carbono e mudanças climáticas. Não foram considerados outros requisitos de desempenho, como estrutural, segurança ao fogo, durabilidade, etc. Nessa ótica, se assumiu que o BBC pode ser empregado em edificações habitacionais brasileiras.

6. Organização da Tese

A presente tese foi organizada em nove capítulos: (1) Introdução; (2) Revisão da Literatura; (3) Avaliação do Ciclo de Vida Aplicada ao Setor da Construção Civil; (4) Metodologia; (5) Ferramenta para Análise Dinâmica para Avaliação da Emissão de Carbono em Edificações pelo Uso de Biomateriais; (6) Estudo de Caso Para o Briococoncreto de Bambu: Dados de Entrada; (7) Estudo de Caso Para o Briococoncreto de Bambu: Resultados e Discussão; (8) Conclusões e Pesquisas Futuras e os (9) Apêndices.

7. Referências

Amziane, S.; Sonebi, M.; 2016. Overview on bio-based building material made with plant aggregate .RILEM Technical Letters, 2016, 1 (31–38).

Anand, C. K., Amor, B., 2017. Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renew. Sus. Energy Rev.* 67, (1), 408-416.

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

BAMB, 2020. Buildings as Materials Banks. Disponível em: <<https://www.bamb2020.eu/>>. Acesso em 02 de mai. 2020.

Brasil, 2011. LEI Nº 12.484, Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu – PNMCB. Brasília, 2011.

Brasil, 2017. Decreto Nº 5.809, Plano Estadual de Desenvolvimento do Bambu. Rio Branco, Acre, 2017.

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 : A review. *Renew. Sus. Energy Rev.* 29, 394-416.

Caldas, L. R., da Gloria., M. Y., Santos D. J., Andreola, V., Pepe, M., Toledo Filho, R. D., 2017. Carbon footprint of bamboo particles, rice husk and wood shavings-cement composites. 2nd International Conference on Bio-based Building Materials & 1st Conference on ECOlogical valorisation of GRAnular and FIlbrous materials. June 21th - 23th 2017 Clermont-Ferrand, France.

Chen, S., Chen, B., Feng, K., Liu, Z., Fromer, N., Tan, X., Alsaedi, A., Hayat, T., Weisz, H., Schellnhuber, H.J., Hubacek, K., 2020. Physical and virtual carbon metabolism of global cities. *Nat. Commun.* 11, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13757-3>

Churkina, G., et al., 2020. Buildings as a global carbon sink. *Nature sustainability*, 2020.

De Paula, R. R. Avaliação do Ciclo de Vida (AVC) de Argamassa e Concretos produzidos com Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

Delgado, P. S. O bambu como material eco-eficiente : caracterização e estudos exploratórios de aplicações. 2011. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

Drumond, P. M.; Wiedman, G (Org.). *Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia*. 1. ed. - Rio de Janeiro : ICH, 2017. 655 p.

Ellen MacArthur Foundation, 2017. Uma economia circular no Brasil: Uma abordagem exploratória inicial.

https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/Uma-Economia-Circular-no-Brasil_Uma-Exploracao-Inicial.pdf

Escamilla, E. Z., Habert, G., 2014. Environmental impacts of bamboo-based construction materials representing global production diversity. *J. Cleaner Prod.* 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.* 103, 44 – 53.

European Committee for Standardization. EN 15804: sustainability of construction works: environmental product declarations: core rules for the product category of construction products. Brussels, 2012.

Federal Ministry of Education and Research (BMBF). Bioeconomy in Germany Opportunities for a bio-based and sustainable future. Alemanha, 2015.

Fialho, E. G., Da Silva, A. L. P., Tonholo, J., 2005, Desenvolvimento da cadeia produtiva do bambu: uma oportunidade para empreender, v. 1, n. 1.

Fundação João Pinheiro, 2018. Déficit Habitacional no Brasil | 2015. Belo Horizonte, Brazil. 2018.

González-Mahecha, R.E. et al., 2019. Greenhouse gas mitigation potential and abatement costs in the Brazilian residential sector. *Ene. Build.* 184,1, p. 19-33.

Greco T. M., Cromberg, M. Bambu – cultivo e manejo. Florianópolis: Insular, 2011. 184 p.

IEA, 2019. The Future of Cooling Opportunities for energyefficient air conditioning. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/download/direct/1036>> Acesso em: 17 de jun. 2020.

International Network for Bamboo and Rattan (INBAR). Bamboo: A strategic resource for countries to reduce the effects of climate change. Beijing. 2014. 28p. Disponível em: <<http://inbarlive.fclcloud.com/bamboo-strategic-resource-countries-reduce-effects-climate-change-0>> Acesso em 15 de ago. 2017.

_____. Disponível em: <<http://www.inbar.int/about-inbar/#2>> Acesso em 20 de abr. 2018.

_____. International Trade of Bamboo and Rattan. Inbar, 2012.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp

ISO 14067 Greenhouse Gases. Carbon Footprint of Products. Requirements and Guidelines for Quantification (ISO 14067:2018).

Iwano, J., Mwasha, A., 2013. The impact of sustainable building envelope design on building sustainability using Integrated Performance Model. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2. p. 153-171.

Krause, J. Q., Silva, F. A.; Ghavami, K.; Gomes, O. F. M., Toledo Filho, R. D., 2016. On the influence of *Dendrocalamus giganteus* bamboo microstructure on its mechanical behavior. *Cons. Build. Mat.*, 127, 199-209.

Krause, J. Q., Silva, F. A.; Ghavami, K.; Gomes, O. F. M., Toledo Filho, R. D., 2016. On the influence of *Dendrocalamus giganteus* bamboo microstructure on its mechanical behavior. *Cons. Build. Mat.*, 127, 199-209.

Lucon O., D. Ürge-Vorsatz, A. Zain Ahmed, H. Akbari, P. Bertoldi, L. F. Cabeza, N. Eyre, A. Gadgil, L. D. D. Harvey, Y. Jiang, E. Liphoto, S. Mirasgedis, S. Murakami, J. Parikh, C. Pyke, And M. V. Vilariño, 2014: Buildings. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

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. João Pessoa, Brasil.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). 2018. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em: 03 de jun. 2018.

Ministério do Minas e Energia (MME). Balanço Energético Nacional. Relatório Síntese ano base 2018. Brasília-DF, 2020.

Ohrnberger, D., 1999, The bamboos of the world: annotated nomenclature and literature of the species and the higher and lower taxa. Elsevier

PBMC, 2018. Ribeiro, S. K.; Santos, A. A [Ed.] Silva, L. C.; Caldas, L. R.; Paiva, R. L. M.; Toledo Filho, R. D. Role of Bio-based Building Materials in Climate Change Mitigation: Special Report of the Brazilian Panel on Climate Change. Rio de Janeiro: Brazilian Panel on Climate Change, 2018 (Special Report of the Brazilian Panel on Climate Change).

Ramage, M. H. et al. The wood from the trees: The use of timber in construction. Renewable and Sustainable Energy Reviews. v.68, p.333-359, 2017.

Rock, M. et al., 2020. Embodied GHG emissions of buildings -The hidden challenge for effective climate change mitigation Applied Energy, 258 (2020), pp. 114107.

Santi, T. C. O Potencial do Bambu, Revista Mensal de Tecnologia em Celulose e Papel, Ano LXXVI, nº 4, Abril, 2015.

Seixas, M. A.; Ripper, J.; Ghavami, K., 2016. Prefabricated Bamboo Structure and Textile Canvas Pavilions. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 57, 179-188.

Sengupta, S.; Siikamaki, J. Protecting climate by protecting nature. Climate 2020 – Degrees of devastation. UNA UK, 2018.

Su, S., Li, X., YiminZhu, Y., Lin, B., 2017. Dynamic LCA framework for environmental impact assessment of buildings. Ener. Build. 149, 310-320.

UN, 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development». United Nations – Sustainable Development knowledge platform.

UNEP, 2017. Environment and International Energy Agency, 2017. Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector.

UNEP, 2019. Global Status Report for Buildings and Construction. Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector, 2019. Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector.

União Europeia (UE), 2020. Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe, 2020.

World Resources Institute (WRI). 2018. Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories. An Accounting and Reporting Standard for Cities. C40. www.resourcecentre.c40.org.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentada a Revisão da Literatura. Ele foi dividido nas seguintes etapas: (1) Avaliação da Emissão de Carbono em Edificações: Mitigação e Adaptação; (2) ACV Aplicada a Biomateriais de Construção: Avaliação dos Produtos Estudados; (3) ACV Aplicada a Biomateriais de Construção: Avaliação de Aspectos Metodológicos.

1. Avaliação da Emissão de Carbono em Edificações: Mitigação e Adaptação

Como as edificações têm sido apontadas como umas das principais geradoras dos GEE e pelo fato de grande parte da população residir nesses ambientes, muita pesquisa tem sido realizada com foco em estratégias de mitigação da Emissão de Carbono (EC) das edificações. No entanto, as pesquisas relacionando as edificações e as mudanças climáticas ainda são recentes, se for considerado que a intensificação das publicações ocorreu em meados do ano 2000 (DE WILDE; TIAN, 2011).

Antes o maior interesse dessas pesquisas estava na emissões de GEE causadas pelo consumo de energia da edificação, ou seja, grande parte delas olhando formas de mitigar essas emissões. Com o decorrer do tempo, principalmente com o avanço das ferramentas computacionais de simulação termoenergética das edificações, o objetivo passou a ser como avaliar e quantificar o comportamento das edificações frente a um futuro com o aumento da temperatura do planeta, em outras palavras, como as edificações precisarão se adaptar a essas alterações climáticas (CASAGRANDE; ALVAREZ, 2013).

Dentre as metodologias de avaliação de impactos ambientais existentes, a ACV tem sido a mais utilizada para quantificar e avaliar o potencial de aquecimento global no ciclo de vida das edificações (CABEZA *et al.*, 2014; CHAU *et al.*, 2015; ANAND; AMOR, 2017). A partir da ACV é possível entender quais etapas do ciclo de vida e quais os elementos da edificação que mais contribuem para as mudanças climáticas (*hotspots*), e, assim, poder pensar em estratégias para a redução desse impacto, como também verificar como o aumento de temperatura irá contribuir para o aumento de emissões de GEE.

Alguns autores tem buscado definir parâmetros e benchmarkings de projeto para edificações de baixo carbono, como DE WOLF *et al.* (2017), mostrando que existe uma grande variação nos estudos presentes na literatura, por exemplo de 200–1700 kgCO₂-eq/m². Essa variação se deve a uma série de fatores, como abrangência do escopo, tipo de banco de dados, métodos de avaliações, entre outros. CALDAS *et al.* (2017) propôs diferentes estratégias de baixo carbono para edificações de interesse social no Brasil, por meio da ACV, mostrando que as etapas de produção e uso são as mais críticas.

POMPONI e MONCASTER (2016) realizaram uma revisão da literatura e identificaram dezessete medidas para mitigação das emissões de carbono nas edificações: (1) uso de materiais com baixo carbono incorporado (materiais naturais, biomateriais, etc.); (2) projeto de melhor qualidade; (3) redução, reuso e recuperação de materiais de alto carbono incorporado (ex. metais, cerâmicas, etc.); (4) ferramentas e metodologias para avaliação; (5) responsabilidades governamentais (políticas e regulamentos); (6) reforma e retrofit de edificações existentes; (7) descarbonização da matriz de energia; (8) inclusão de resíduos e coprodutos na especificação de materiais; (9) uso de materiais locais; (10) políticas e regulamentação do setor da construção civil; (11) mudanças dos envolvidos do setor da construção (projetistas, construtores, fornecedores de materiais usuários, etc.); (12) processos e tecnologias de construção mais eficientes; (13) precificação do carbono; (14) sequestro de carbono (carbonatação acelerada, uso de biomateriais, etc.); (15) aumento da vida útil da edificação; (16) emprego de materiais pré-fabricados e mais industrializados; (17) formas de destinação final (ex. desconstrução e reaproveitamento dos materiais).

Na parte de especificação de materiais e sistemas construtivos muitas pesquisas têm se debruçado em estudar e comparar tecnologias, normalmente utilizados na envoltória, como PITTAU *et al.* (2018), PITTAU *et al.* (2019), ou estruturas, como FOUQUET *et al.* (2015), SALCIDO *et al.* (2016). Essa atenção se deve pelo fato desses elementos serem os que mais contribuem para as emissões de GEE, seja na produção dos materiais ou ainda na fase de uso da edificação, se forem consideradas envoltórias energeticamente eficientes. A maioria dos estudos aponta que sistemas compostos de biomateriais como madeira e bambu, tem um maior potencial de mitigação que sistemas convencionais de concreto e cerâmica, principalmente devido ao processo de captura e armazenamento de CO₂ que ocorre nas florestas e plantações.

Outro material que tem despertado grande interesse é a terra natural (ou solo), principalmente por ter baixo processamento, sem necessidade de queima, atóxico, normalmente de elevada disponibilidade e boas propriedades higrotérmicas (ARRIGONI *et al.*, 2017; MELIÁ *et al.*, 2014). Quando comparados a materiais mais industrializados, eles podem ser considerados de baixo carbono, como apontam MARTINS *et al.* (2018). No entanto, questões relacionadas à durabilidade e necessidades de manutenção devem ser avaliadas, como apresentam CALDAS *et al.* (2019).

O uso de cores claras nas fachadas também é uma estratégia importante pois trazem considerável redução do consumo de energia, podendo chegar a mais de 40% entre uma cor clara – com absorvância de 0,3 e uma cor escura – absorvância de 0,9, especialmente para cidades de climas quentes e materiais de elevada condutividade térmica. CALDAS *et al.* (2020a) avaliaram edificações containers para o Brasil e verificaram grande redução nos impactos ambientais do ciclo de vida da edificação quando diferentes cores são utilizadas nas fachadas (absorvâncias de 0,3, 0,6 e 0,9), principalmente se a edificação está localizada em Teresina ou Rio de Janeiro.

No item de descarbonização da matriz de energia, tem se apostado no uso de tecnologias de produção de energia no local, principalmente utilizando painéis fotovoltaicos (PV), para a produção de edificações energia zero (*net zero energy buildings* – NZEB), como é apresentado por HARKOUSS *et al.* (2019). O uso de PV para *retrofit* de edificações tem se mostrado como uma alternativa promissora como demonstra MARTINOPOULOS (2018), que os impactos de produção dos PV podem ser recuperados durante dois anos de operação da edificação. Para climas quentes como o Brasil, o uso de PV resulta em um decréscimo dos impactos de operação da edificação, como apontam GOMES *et al.* (2018). Em cenários que a eficiência de operação da edificação é aumentada em conjunto com a geração de energia local, por exemplo utilizando PVs, as emissões de GEE incorporadas (relacionadas a produção, ao transporte, a manutenção e ao fim de vida da edificação), passam a ser mais importantes, como demonstram ROCK *et al.* (2020) que avaliaram 650 estudos de casos de ACV aplicada às edificações em diversos países.

Tendo em vista que existem diferentes estratégias de projeto para a mitigação e adaptação das edificações às mudanças climáticas, foi elaborado um quadro resumo

(Quadro 1- Estratégias para mitigação e adaptação das edificações às mudanças climáticas.), apontando quais as estratégias devem ser prioritárias, com base na revisão da literatura realizada, sendo embasada principalmente nos estudos de LUCON *et al.* (2014), CABEZA *et al.* (2014), INVIDIATA e GHISI (2016), POMPONI e MONCASTER (2016), CALDAS *et al.* (2017), DE WOLF *et al.* (2017), PITTAU *et al.* (2018) e ROCK *et al.* (2020). A classificação em relação à prioridade das estratégias apresentadas foi definida com base nos achados da literatura.

Dentre as estratégias existentes percebe-se que grande parte delas e as mais críticas estão ligadas ao projetista, setor público e posteriormente ao usuário. O primeiro grupo será o responsável por grande parte das decisões importantes de especificação da edificação, e o segundo pode contribuir em um primeiro momento por políticas de comando e controle, por exemplo, na forma de legislações e obrigações projetuais referentes a projetos de edificações mais eficientes do ponto de vista energético e de baixo carbono. Nesse sentido, já existe a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). A ENCE classifica as edificações em faixas, que vai desde “A” (mais eficiente) a “E” (menos eficiente) (PBE, 2019). Atualmente ela só é uma medida obrigatória para edificações públicas e tem o foco somente para a operação das edificações. Espera-se que ocorra uma evolução desse programa nos próximos anos, com a adoção de métricas relacionadas aos GEE e incorporação dos impactos do ciclo de vida, que pode ser realizado utilizando a metodologia de ACV.

Finalmente, o grupo dos usuários está relacionado ao uso adequado das edificações e decisões importantes como tempo de manutenção, compra de equipamentos utilizados, entre outros. Pois, sabe-se que embora muitas das vezes os usuários mesmo com informações nos projetos e Manuais de uso e Operação não seguem de forma correta ou por falta de conhecimento dessas informações ou por questões econômicas (por exemplo comprar equipamentos de menor custo, sem pensar no consumo operacional) ou preferências específicas (LOURENÇO *et al.*, 2019). Embora tenha sido colocado o setor público como responsável em só uma das alternativas, ele tem papel fundamental, de forma direta ou indireta, para o embasamento e incentivo de medidas de mitigação e adaptação das edificações às Mudanças Climáticas.

Foi possível verificar também que existem algumas soluções que tem papel tanto para mitigação como adaptação das edificações, principalmente para as estratégias relacionadas à envoltória e desempenho térmico. Pois uma melhoria nesse quesito leva a uma redução de energia para climatização artificial e as emissões relacionadas e em um futuro com temperaturas maiores será ainda mais importante para o conforto dos usuários.

Pensando em um desenvolvimento mais sustentável, é ideal que essa alternativa seja ainda de baixo impacto ambiental, economicamente viável e socialmente adequada. Nessa ótica, o bioconcreto figura como uma potencial alternativa, pois é capaz de ser utilizado na envoltória, é um biomaterial, que utiliza resíduos, que até então seriam descartados (de baixo custo), com baixa EC, como é apresentado por CALDAS *et al.* (2019) e possui um melhor desempenho térmico quando comparado com os sistemas construtivos convencionalmente utilizado no país.

Do ponto de vista social pode também trazer benefícios pois como o uso do BBC foi pensado em processo construtivo de forma similar ao concreto convencional, ele pode gerar e transferir empregos de forma direta e indireta, já que o setor da construção, e, especificamente a cadeia de concreto, emprega grande parte do setor na economia brasileira e vários países do mundo.

Quadro 1- Estratégias para mitigação e adaptação das edificações às mudanças climáticas.

Estratégia	Etapa do ciclo de vida da edificação	Atores responsáveis	Atua na Mitigação? Como?	Atua na Adaptação? Como?	Recomendação	Classificação de prioridade
Projeto bioclimático (forma, orientação, volumetria, ventilação natural, iluminação natural, etc)	Projeto e uso	Projetista e Setor Público	Sim. Projeto com o uso de diretrizes bioclimáticas tendem a reduzir o consumo de energia operacional e conseqüentemente as emissões relacionadas. Por utilizar muitas estratégias passivas, podem trazer ganhos consideráveis sem impactos de produção.	Sim. Em cenários onde a temperatura do planeta irá aumentar, é ainda mais importante ter estratégias de projeto melhorem o conforto térmico.	Elaboração de projeto bioclimático adaptado a região e clima local	Alta
Uso de sistemas construtivos de desempenho térmico eficiente na envoltória	Projeto e uso	Projetista e Setor Público	Sim. Redução das emissões de GEE relacionadas à climatização artificial.	Sim. Em cenários onde a temperatura do planeta irá aumentar ainda mais, é essencial ter sistemas construtivos (principalmente na envoltória) que possuam um melhor desempenho térmico.	Sistemas construtivos com transmitância e capacidade térmica adequados as diferentes zonas bioclimáticas	Alta
Uso de sistemas construtivos de baixa emissão de carbono	Projeto	Projetista e Setor Público	Sim. Redução das emissões de GEE no ciclo de vida (produção, transporte, construção, manutenção e fim de vida) desses sistemas construtivos.	Não.	Sistemas construtivos à base de materiais naturais (ex. terra) como biomateriais (ex. madeira, bambu, bioconcreto) que absorvem CO ₂ durante seu ciclo de vida. Atentar para a manutenção preventiva e durabilidade na escolha dos sistemas.	Alta
Uso de cores claras	Projeto e Uso	Projetista e Usuário	Sim. Redução das emissões de GEE relacionadas à climatização artificial.	Sim. Em cenários onde a temperatura do planeta irá aumentar ainda mais, é essencial ter sistemas construtivos (principalmente na envoltória) que possuam um melhor desempenho térmico.	Utilizar cores claras (com absorvância inferior a 0,3) e atentar para manutenção.	Alta
Uso de sombreamento	Projeto e Uso	Projetista e Usuário	Sim. Redução das emissões de GEE relacionadas à climatização artificial.	Sim. Em cenários onde a temperatura do planeta irá aumentar, é ainda mais importante ter sistemas construtivos (principalmente na envoltória) que possuam um melhor desempenho térmico	Utilizar sombreamento móveis que possam ser adaptados para condições de verão e inverno e iluminação natural	Média-alta
Uso de equipamentos eficientes (iluminação,	Projeto e Uso	Projetista e Usuário	Sim. Redução das emissões de GEE relacionadas à climatização artificial.	Sim. Em cenários futuros, onde é esperado maiores dificuldades econômicas da população e maior	Utilizar equipamentos mais eficientes. No Brasil utilizar como guia	Média - alta

Estratégia	Etapa do ciclo de vida da edificação	Atores responsáveis	Atua na Mitigação? Como?	Atua na Adaptação? Como?	Recomendação	Classificação de prioridade
eletrodomésticos, computadores, etc.)				tempo nas residências é interessante que haja economia nos gastos residenciais.	equipamentos com selo Procel Nível A.	
Uso de tecnologias de produção de energia renovável	Projeto e Uso	Projetista e Usuário	Sim. Redução das emissões de GEE	Sim. Como a energia (ou parte dela) é gerada localmente, há menor dependência da energia que vem da rede, essa que pode ser comprometida em cenários de catástrofes naturais.	Uso de painéis fotovoltaicos. Existem diferentes opções e locais para ser instalados (cobertura, fachadas, brises e pisos). Espera-se que a tecnologia evolua (principalmente com aumento de eficiência) nos próximos anos.	Média - alta
Uso de materiais locais	Execução	Construtor	Sim. Redução das emissões de GEE para o transporte dos materiais	Sim. Para cenários de eventos extremos em que o transporte possa ser dificultado, essa pode ser uma estratégia importante	Priorizar materiais locais, mas que atendam aos requisitos de desempenho e durabilidade	Baixa - média
Desmaterialização da construção	Projeto	Projetista e Usuário	Sim. Redução das emissões de GEE pois haverá uma redução do consumo de materiais.	Não.	É recomendada para materiais com EC positiva, já que o aumento do consumo de materiais leva a um aumento de emissões de GEE. Para biomateriais, com EC negativa, um aumento de consumo de materiais leva a uma oportunidade de absorver e estocar CO ₂ . Atentar para o atendimento de	Baixa - média
Construção industrializada	Projeto e Execução	Projetista/Construtor	Sim. Diminuição das emissões de GEE na etapa de construção da edificação, por ser uma estratégia para reduzir perdas e aumentar a qualidade do produto final.	Sim. Facilidade de construir de forma mais rápida em eventos emergenciais.	Priorizar construção racionalizada e industrializada a medida que existirem fábricas disponíveis e condições compatíveis	Baixa - média
Projeto para desconstrução	Fim de Vida	Projetista e Usuário	Sim. Redução das emissões de processos mais intensos como a demolição. Possibilita a geração de materiais que poderão ser reutilizados.	Não	Pensar em projetos industrializados com existência de encaixes para ligação	Baixa
Descarbonização da matriz de energia	Todas	Setor público	Diminuição das emissões de GEE na operação da edificação.	Sim. Maior possibilidade de descentralização da geração de energia.	Caso a matriz de energia da rede tenha maior participação de fontes renováveis, o uso de tecnologias de produção local de fontes renováveis pode ser otimizado	Alto

Observações: Um sistema construtivo de baixa EC pode ser caracterizado por possuir menor emissão de GEE ao longo do seu ciclo de vida (produção materiais, transporte, construção, uso e fim de vida), quando comparado com outro sistema construtivo similar. Como a etapa de operação de uma edificação é responsável por parcela significativa do consumo de energia, devido principalmente à climatização artificial para atender questões de conforto térmico, um sistema construtivo de desempenho térmico eficiente tende a reduzir significativamente a EC de uma edificação (CABEZA *et al.*, 2014; ROCK *et al.*, 2020). No entanto, para esse sistema ser considerado de baixo carbono, além do seu bom desempenho térmico, ele precisa ter também baixa EC no seu ciclo de vida.

As linhas marcadas em cor verde clara representam características já verificadas para o BBC. As linhas em verde escuro representam estratégias potenciais que podem ser utilizadas para melhorar o desempenho ambiental desse bioconcreto.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em LUCON *et al.* (2014), CABEZA *et al.* (2014), INVIDIATA e GHISI (2016), POMPONI e MONCASTER (2016), CALDAS *et al.* (2017), DE WOLF *et al.* (2017), PITTAU *et al.* (2018), CALDAS *et al.* (2020a), CALDAS *et al.* (2020b) e ROCK *et al.* (2020).

Alguns estudos, como AGUSTÍ-JUAN e HABERT (2017) e AGUSTÍ-JUAN *et al.* (2017) vêm mostrando que a construção industrializada, em especial a fabricação digital, utilizando a impressão 3D, tem potencial de mitigar os impactos ambientais das edificações, especialmente quando se há interesse de construir produtos de grande complexidade e com características de multifuncionalidade. A industrialização da construção tende a reduzir as perdas existentes durante o processo construtivo, sejam elas materiais ou laborais, como demonstraram WEN *et al.* (2015) que comparam um sistema convencional com outro industrializado como na Malásia. CALDAS *et al.* (2020b) avaliaram ganhos ambientais consideráveis (chegando a mais de 30%) com o uso de argamassas executadas com processos mais racionais (processo projetado) em comparação ao processo convencional.

A questão do fim de vida das edificações, principalmente pensando em formas mais inteligentes e que possam auxiliar um processo circular, como a desconstrução podem auxiliar a mitigação como apontam DIYAMANDOGLU e FORTUNA (2015) e CHAU *et al.* (2017). Ambos autores avaliam sistemas construtivos passíveis de serem desconstruídos, sendo o primeiro uma estrutura de madeira e o segundo de concreto pré-fabricado. Por outro lado, de acordo com CABEZA *et al.* (2014) e CHAU *et al.* (2015), os impactos do fim de vida de uma edificação são pouco expressivos (menor que 5% em muitos casos) em comparação às outras etapas do ciclo de vida da edificação. Nessa ótica, o maior benefício da desconstrução está na possibilidade de gerar materiais que possam ser reincorporados em outras edificações, evitando assim a produção de novos materiais, indo de encontro aos princípios da economia circular. No entanto, essa alternativa pode não ser tão fácil de ser implementada na prática, devido a questões de logística (por exemplo, longas distâncias de transporte), incompatibilidades construtivas e o fato do material já ter alcançado sua vida útil ou seu desempenho não ser mais satisfatório para uma dada aplicação.

Referente à adaptação das edificações, estudos, como CASAGRANDE e ALVAREZ (2013), INVIDIATA e GHISI (2016), CHAN (2011), WANG e CHEN (2014), WANG *et al.* (2017), SÁNCHEZ-GARCÍA *et al.* (2019) tem olhado para cenários futuros, tentando entender como um aumento na temperatura média do planeta afetará as estratégias de projeto normalmente utilizadas no campo da arquitetura e engenharia, e quais as possíveis soluções que podem ser desenvolvidas ou aprimoradas. Normalmente nesses estudos são utilizados modelos climáticos que transformam dados climáticos

existentes (produzidos com base em séries históricas) em dados climáticos futuros, baseados em previsões de aumento de temperatura previstas nos relatórios do IPCC.

Uma das metodologias mais famosas é a *morphing*, publicada pela *Chartered Institution of Building Services Engineers* (CIBSE), que foi desenvolvida com o objetivo de converter arquivos climáticos atuais *Test Reference Year* (TRY) em arquivos climáticos futuros. Nessa metodologia os dados climáticos horários do arquivo TRY são modificados para representar uma possível condição futura através dos valores mensais de algumas variáveis climáticas (como mudanças de temperatura, pressão do ar, ventos, chuvas) (CASAGRANDE; ALVAREZ, 2013). JENTSCH *et al.* (2008), com base na metodologia *morphing*, desenvolveram uma ferramenta chamada de *Climate Change World Weather File Generator*, que possibilita a integração de arquivos de extensão *EnergyPlus/EPWs Weather* (EPW) ao modelo climático *global Hadley Centre Coupled Model* (HadCM3), elaborado para o Terceiro Relatório do IPCC (CASAGRANDE; ALVAREZ, 2013). Essa ferramenta foi utilizada na presente pesquisa para avaliação do uso do bionconcreto para cenários futuros de mudanças climáticas.

A partir da revisão da literatura é possível verificar que, o mesmo é um tema de pesquisa que tem recebido cada vez mais interesse dada a importância das Mudanças Climáticas nas agendas ambientais de muitos países. Verificou-se que a maior parte dos estudos relacionados às edificações estão mais voltados para estratégias relacionadas à questão da mitigação, sendo muito deles com foco em questões de eficiência energética do projeto. As edificações do tipo NZEB parecem ser as mais desejadas, com a tendência de zerar as emissões relacionadas à operação. Em termos da adaptação os estudos tem se debruçado em tentar quantificar como o aumento de temperatura devido às mudanças climáticas irá impactar questões de conforto térmico e consumo de energia das edificações. O uso de ferramentas de simulação computacional termoenergética em conjunto com a ACV, com foco na EC, é bastante recorrente nos estudos, sendo que as modelagens realizadas estão se tornando cada vez mais complexas, com a incorporação de aspectos dinâmicos, como mudança da matriz de energia, padrão de consumo, uso de dados climáticos futuros, etc. A partir em que as edificações vão se tornando mais eficientes do ponto de vista de sua operação, os impactos das mudanças climáticas acabam sendo transferidos (ocorrendo um *trade-off*) para as etapas de produção dos materiais, transporte, construção e manutenção. Nesse sentido, o estudo e utilização de

materiais e tecnologias construtivas de menor impacto tendem a ganhar maior importância, quando o ciclo de vida da edificação é avaliado.

2. ACV Aplicada a Biomateriais de Construção: Avaliação dos Produtos Estudados

Nesta seção são avaliados os estudos onde a ACV foi aplicada para analisar o desempenho ambiental, com foco na EC, de diferentes biomateriais de construção. Os biomateriais pesquisados foram divididos em: madeira, bambu e concreto de cânhamo.

Nas Figuras 6 e 7 é apresentada uma análise quantitativa dos estudos de ACV sobre biomateriais avaliados (entre os anos de 2010 e 2019).

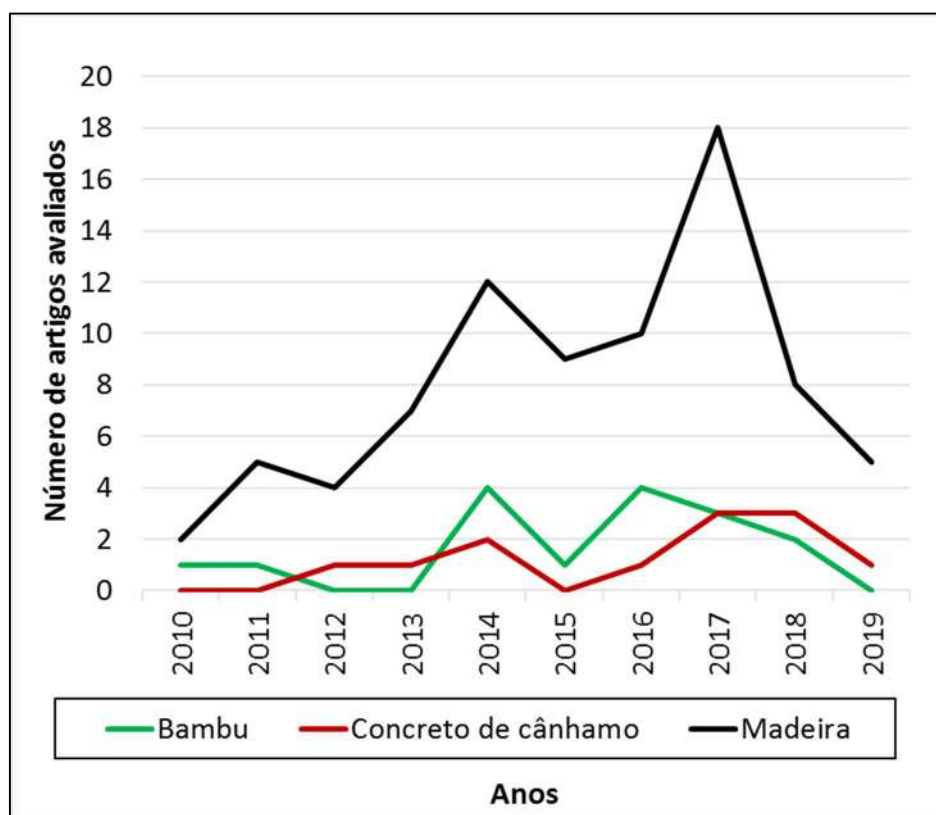


Figura 6 – Análise quantitativa de estudos encontrados na literatura sobre ACV e biomateriais de construção.

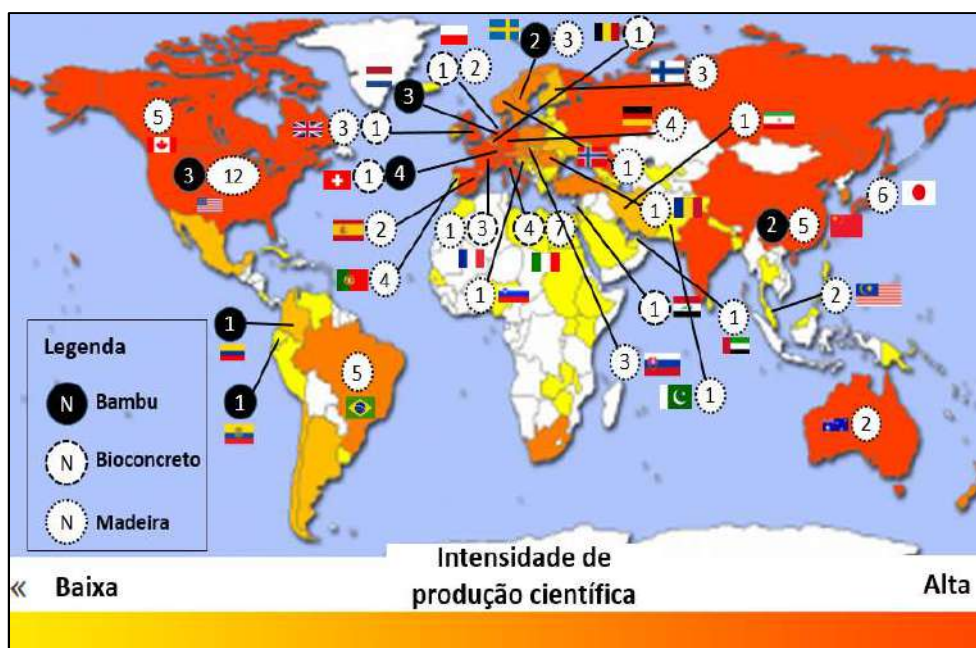


Figura 7 – Identificação dos estudos, por tipo de biomaterial, segundo a localização das instituições de pesquisa. Realizado pelo autor (2019) a partir do mapa disponibilizado no ACADEMIC DATABASE ASSESSMENT TOOL (2012).

Observa-se que produtos de madeira foram os mais estudados, o que se deve principalmente ao fato de ser o biomaterial mais utilizado na construção civil. A predominância em países norte americanos, como Estados Unidos e Canadá pode ter relação com o grande uso da madeira como elemento estrutural, como o sistema construtivo *wood framing*, nesses países. Os estudos encontrados no Brasil são sobre chapas e painéis de madeira (OSB, MDF, etc.), de fábricas localizadas nas regiões Sul e Sudeste do país.

Foram verificados poucos estudos sobre bambu que pode estar relacionado ao fato de ser um material mais utilizado principalmente em países asiáticos e alguns da América Latina, como a Colômbia. A maioria dos estudos encontrados sobre bambu embora tenha sido realizado por instituições localizadas na Europa, principalmente da Suíça, os produtos avaliados são originados e produzidos na China.

Em relação ao concreto de cânhamo a baixa quantidade de estudos pode estar relacionada ao fato de ser ainda um material novo no mercado e todos os estudos foram realizados por instituições europeias, onde esse material está sendo mais utilizado. Por fim, observa-se que os estudos normalmente estão localizados em países de elevada produção científica.

PAWELZIK *et al.* (2013) realizaram um estado da arte sobre os aspectos críticos observados nos estudos de ACV de bio-materiais, principalmente em relação a contabilização do carbono biogênico, abordando as diferenças entre as principais metodologias de EC existentes, entre elas: GHG Protocol, ISO 14067, ILCD Handbook e PAS 2050. ROYNE *et al.* (2016), avaliaram diferentes estudos de ACV aplicados a biomateriais com foco na quantificação de carbono biogênico, mostrando que diferentes premissas e formas de contabilização podem levar a resultados bastante diferentes. ASDRUBALI *et al.* (2017) fazem uma revisão de diferentes produtos de madeira utilizados na construção civil, mostrando propriedades físicas, mecânicas, térmicas, acústicas e ambientais. Do ponto de vista ambiental os produtos de madeira avaliados pelo estudo apresentam EC negativa, devido a contabilização do carbono biogênico.

Diferentes produtos de bambu foram avaliados, desde estruturas como nos estudos de YU *et al.* (2011) e SALCIDO *et al.* (2016), e a maioria com interesse em produtos industrializados como laminados e painéis, como o de VAN DER LUGT e VOGTLÄNDER (2010), ESCAMILLA e HABERT (2014), ESCAMILLA *et al.* (2016), RASTREPO *et al.* (2016) e SALZER *et al.* (2016). Para os estudos de produtos industrializados, como laminados colados, verificou-se que as etapas de prensa e colagem das lâminas são as mais críticas em termos de impactos ambientais, quando comparadas com as etapas de plantação e corte dos bambus, e que dependendo do tipo de insumo energético utilizado, por exemplo energia elétrica ou gás natural, os impactos podem aumentar ou diminuir.

Muitos, como YU *et al.* (2011), SALZER *et al.* (2016), ESCAMILLA *et al.* (2016), SALCIDO *et al.* (2016), ESCAMILLA *et al.* (2018) compararam o impacto de potencial de aquecimento global de produtos de bambu com produtos convencionais utilizados na construção como cerâmica, concreto e aço, mostrando melhores resultados para os produtos de bambu. Eles verificaram uma diferença superior a 80% entre um sistema de bambu laminado em comparação a um sistema de alvenaria de tijolos cerâmicos e estrutura de concreto. Observou-se que na maioria dos casos os produtos de bambu foram mais vantajosos devido ao fato de ter um processamento menos poluente que o da produção de cimento e cerâmica e a contabilização do carbono biogênico com valor negativo.

Dos estudos de madeira e produtos avaliados, verificou-se que eles se enquadram em três principais grupos: (1) avaliação dos impactos ambientais de produtos específicos, na sua maioria painéis de particulados e cortiça, como o de GARCIA e FREIRE (2014), SILVESTRE *et al.* (2016) e DERMETZI *et al.* (2017) ou produtos específicos utilizados na construção civil, como portas, COBUT *et al.* (2015), janelas, TARANTINI *et al.* (2011), e estruturas de telhado, como MAXINEASA *et al.* (2018); (2) avaliação de edificações que utilizam madeira como estrutura ou elemento de fechamento, como PAJCHROWSKI *et al.* (2014), PEÑALOZA *et al.* (2016), RØYNE *et al.* (2016) e BALASBANEH e MARSONO (2017). Todos esses estudos mostraram a vantagem do uso de madeira quando comparado com sistemas construtivos de cerâmica, aço ou concreto, principalmente em relação a redução dos potenciais impactos de aquecimento global; (3) Estudos relacionados com o desempenho térmico do material a fim de trazer melhor conforto do usuário e economia de energia durante o uso da edificação, como MONTEIRO e FREIRE (2012), BABAIZADEH *et al.* (2015) e FOUQUET *et al.* (2016).

Para os bioconcretos, grande parte dos estudos tem tido o foco na avaliação de suas propriedades e desempenho higrotérmico, e nos últimos anos tem aparecido a preocupação de quantificar o potencial de redução de emissões de CO₂.eq com a utilização desse material, como pode ser verificado por IP e MILLER (2012), PRETOT *et al.* (2014), ARRIGONI *et al.* (2017), FLORENTIN *et al.* (2017), PITTAU *et al.* (2018).

Em todos os estudos foi verificado a contabilização do carbono biogênico com valor negativo na EC do material. Alguns estudos, como o de PRETOT *et al.* (2014), ARRIGONI *et al.* (2017) e PITTAU *et al.* (2018), contabilizam, além do carbono biogênico o CO₂ absorvido pelo processo de carbonatação que ocorre de forma mais acentuada em matriz de cal. PITTAU *et al.* (2019), utilizaram a metodologia desenvolvida no estudo de PITTAU *et al.* (2018) para avaliar o potencial de estoque de CO₂ em diferentes sistemas construtivos para o *retrofit* do estoque de edificações da Europa, sendo alguns de biomateriais puros como à base de palha e madeira e outros como o concreto de cânhamo. Biomateriais de rápido período de rotação como a palha e o cânhamo se mostraram os mais vantajosos, quando comparados ao de madeira e de concreto sem o uso de biomateriais.

Em termos dos elementos construtivos pesquisados, verificou-se ainda que na maioria desses estudos foi avaliada uma parede, em que a unidade funcional adotada foi o m², considerando a resistência térmica dela. Isso pode ser explicado pelo fato de que uma das principais aplicações e vantagens do uso de bioconcreto de cânhamo é o seu bom desempenho térmico e emprego para a melhoria da eficiência energética das edificações.

Quando se olha para a comparação entre resíduos e materiais virgens, percebe-se que ainda é um tema pouco explorado para o setor da construção civil. Desses estudos a maioria tem sua aplicação para a avaliação de chapas de particulados de madeira, como DEMERTIZI *et al.* (2017), WILSON *et al.* (2010), MERRILD e CHRISTENSEN (2009) e RIVELA *et al.* (2006). Esses autores verificaram que os impactos ambientais tendem a se concentrar no processo de produção principalmente no consumo de energia e resina ou adesivo utilizado para a colagem das partículas. Também não é realizada a alocação dos resíduos, eles entram na modelagem sem os impactos do processo que o geraram.

HOSSAIN e POON *et al.* (2018) avaliaram diferentes formas de reaproveitamento e reciclagem do uso de resíduos de madeira, como produção de painéis de madeira particulada, painéis de bioconcreto e queima para geração de energia. Concluíram que o uso de madeira reciclada traz poucos benefícios em termos de redução de EC e consumo de combustíveis fósseis. Esses autores não contabilizaram a alocação dos impactos e os benefícios relacionados aos impactos evitados e o carbono biogênico associado ao uso de resíduos de madeira.

Dessa forma, é possível concluir que a avaliação de resíduos quando é realizada nos estudos de ACV encontrados não é muito diferente de produtos convencionais, sendo a principal diferença é que o resíduo entra sem nenhum impacto (sem alocação) para a maioria dos estudos. E finalmente em relação à avaliação de bioconcreto ou materiais similares são dificilmente encontrados, sendo que isso é explicado provavelmente pelo fato de ser um tipo de material relativamente novo na indústria da construção.

É ainda importante ressaltar que a maioria dos estudos que avaliaram o uso de resíduos vegetais (REED *et al.*, 2012; HOSSAIN *et al.*, 2016; HOSSAIN *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2010; KATERS *et al.*, 2012) estão voltados para o setor energético e não de construção e quantificaram os impactos evitados relacionados à sua queima para a

geração de energia (principalmente energia elétrica). Essa tendência pode ser explicada pelo fato de normalmente a destinação de resíduos vegetais se dá para a geração energia, já que existe incentivos, principalmente em termos da redução das emissões de GEE (para casos que utilizam fontes fósseis) e em alguns episódios a determinação pela própria legislação, como apresentam JARRE *et al.* (2020). Provavelmente com a maior difusão da bioeconomia e incentivo para uma maior eficiência do uso da biomassa, por exemplo, em processos do tipo cascata, produtos da construção civil com o uso de resíduos de biomassa ganhem espaço.

3. ACV Aplicada a Biomateriais de Construção: Avaliação de Aspectos Metodológicos

Como um dos objetivos desta tese é explorar aspectos metodológicos importantes da ACV aplicada aos biomateriais, parte da revisão da literatura foi direcionada para este objetivo, sendo observado os seguintes itens: (1) Metodologias de EC; (2) Escopos e unidades funcionais; (3) Inventário do ciclo de vida; (4) Carbono Biogênico; (5) Métodos de Avaliação e Categorias de Impacto Ambiental; (6) Alocação; (7) Considerações sobre desempenho e durabilidade. Esses itens foram adotados conforme as principais etapas definidas na ABNT NBR 14040:2009, ABNT NBR 14044:2009 e EN 15084:2012. Os estudos foram organizados em uma planilha eletrônica (Quadro A1), que está apresentada no Apêndice 2A.

3.1. Metodologias de Cálculo de Emissão de Carbono

Nos estudos de ACV e metodologias de contabilização EC o horizonte temporal mais utilizado é o de 100 anos, como é apresentado por LEVASSEUR *et al.* (2010) e BRANDÃO *et al.* (2013).

Neste sentido, como defendem PAWELZIK *et al.* (2013), o armazenamento do carbono biogênico em materiais tem um potencial de ser uma estratégia interessante para a mitigação das mudanças climáticas, quando dois fatores são considerados: (1) o carbono permanece armazenado no material por um longo período de tempo; e (2) quando esse carbono armazenado retornar (caso ele retorne de fato) a atmosfera possua menores concentrações de CO₂ do que a situação atual.

Pensando no primeiro fator, os materiais e sistemas de construção civil, como vedações verticais (paredes, fachadas e divisórias) e estruturas parecem ser uma boa alternativa

para o armazenamento desse carbono biogênico, tendo em vista que são produtos duráveis. No Brasil, para que a NBR 15575 (ABNT, 2013) seja atendida, os sistemas de vedações verticais precisam ter uma vida útil mínima de 40 anos e os sistemas de estruturas de 50 anos. Dessa forma, nota-se que os produtos da construção civil, principalmente voltados para vedações verticais e estruturas, são produtos de longa vida útil e sabe-se que existem construções com bem mais de 1000 anos em diferentes países no mundo.

Outro item que confere vantagem aos produtos de construção, especificamente aqui, produtos compostos por materiais inertes, como cimento e cal, é o tipo de destinação final desses materiais. Diferentemente de madeiras, que tendem a ter como fim de vida a incineração para fins energéticos, em que todo carbono biogênico armazenado retorna à atmosfera, os materiais cimentícios tem duas opções principais de destinação final: o aterramento e a reciclagem para reaproveitamento. Essas duas alternativas acabam por preservar a maior parte do carbono biogênico armazenado, devido as baixas taxas de decomposição, ainda mais quando se considera que o biomaterial está aglutinado ao material ligante. GARCIA e FREIRE (2014) consideraram que 98,7% do carbono biogênico fica armazenado em painéis de madeira particulados e DEMERTZI *et al.* (2017) consideraram que 98,0% do carbono absorvido fica armazenado em lajes de cortiça, isso é, quando considerado um cenário de aterramento. No primeiro estudo foi utilizada a metodologia da ISO 14067:2014 e no segundo a do ILCD (2011).

Esses dois estudos consideraram o carbono biogênico para produtos constituídos majoritariamente de madeira (acima de 90% em massa), enquanto o BBC a ser estudado nesta tese tem uma fração inferior (aproximadamente 25% em massa), sendo assim, esse carbono armazenado no bioconcreto e contabilizado na ACV tem potencial de ter até uma maior quantidade. Desta forma, baseado na hipótese de GARCIA e FREIRE (2014) e DEMERTZI *et al.* (2017), foi adotado para o BBC, que 98% desse carbono biogênico ficará armazenado, sendo assim uma estimativa mais pessimista, mas a favor da segurança. Fazendo uma comparação 1 m³ de madeira consegue armazenar uma média de 1283 kg CO₂ (assumindo uma massa específica de 700 kg/m³ e teor de carbono de 50%) que equivale a queima de 608 L de gasolina (assumindo um fator de 2,11 kgCO₂/L de gasolina). Enquanto que para o BBC, com 236 kg de partículas de bambu, um 1m³ tem potencial de armazenar 389 kgCO₂ (assumindo um teor de carbono do bambu de 45%). Essa quantidade equivale a queima de 184 L de gasolina.

Em relação ao segundo fator, há uma maior incerteza, pois mesmo com todas as medidas que vem sendo tomadas na direção da redução das emissões antropogênicas em diversos países, ainda não é possível afirmar se as metas de redução propostas serão cumpridas e como estará a concentração atmosférica de GEE no futuro. No entanto, como os materiais estudados tendem a armazenar a maior parte do carbono biogênico indefinidamente, esse fator diminui sua importância.

Tellnes et al. (2017) compararam diferentes normativas para realizar estudos de EC, entre elas: ISO 14067(2014), PAS-2050 (2011), EN 15804 (2012), EN 16485 (2014) – traz regras para PCR (*Product Category Rules*) de produtos de madeira, etc. Todas consideram de alguma forma o carbono biogênico, mas nem todas dão créditos a ele, em termos de redução de impactos de mudanças climáticas. A partir da avaliação dessas metodologias, percebe-se que a contabilização do carbono biogênico de biomateriais é um tema polêmico e que possui diferentes formas de contabilização e apresentação nos resultados da EC de dado produto ou processo.

3.2. Escopos e Unidades Funcionais

A maior parte dos estudos se restringe as etapas de produção dos materiais ou sistemas, sendo classificados como do tipo do “berço ao portão”, nos módulos de A1-A3 (de acordo com a EN 15804:2012), com a indicação do tipo de fim de vida, quando o carbono biogênico é contabilizado. Alguns estudos, como SILVESTRE *et al.* (2016) e PITTAU *et al.* (2018) avaliam os estágios de fim de vida enquanto outros apenas dizem qual seria a destinação final dos materiais, como é feito por DEMERTZI *et al.* (2017). Alguns estudos, no entanto, não deixam claro qual o possível fim de vida do material, como é o caso de IP e MILLER (2012) e PRETOT *et al.* (2014).

Quando edificações são avaliadas, alguns estudos consideraram as etapas de manutenção (B4) consumo de energia da edificação (B6), como pode ser visto em MONTEIRO e FREIRE (2012) e PEÑALOSA *et al.* (2016). O detalhamento dessas etapas do ciclo de vida, seus módulos e suas nomenclaturas, de acordo com a EN 15804:2012, como “berço ao portão” e “berço ao túmulo” serão apresentados no Capítulo 3.

Em relação às unidades funcionais, quando são avaliados materiais como concretos e painéis de bambu e madeira, a unidade mais utilizada é o volume (em m³) enquanto que

para sistemas, como fechamentos verticais, predomina a área unitária do fechamento (em m²). Em alguns estudos, como o de PRETOT *et al.* (2014) e PITTAU *et al.* (2018) são informados parâmetros de desempenho térmico dos sistemas, como por exemplo a transmitância térmica. Espera-se que nos estudos de ACV, aplicados ao setor da construção civil, parâmetros de desempenho, como mecânico, térmico, acústico, de durabilidade, entre outros, sejam incorporados, pelo menos na forma de indicadores ambientais (VAN DEN HEEDE; DE BELIE *et al.*, 2012; CELIK *et al.*, 2015).

3.3. Inventário do Ciclo de Vida

A maior parte dos estudos, utiliza dados mistos de inventário de ciclo de vida, sendo que a maior parte são dados secundários, normalmente empregando a base dados do Ecoinvent. Alguns utilizaram dados primários de indústrias como SALCIDO *et al.* (2016), SILVESTRE *et al.* (2016), PIEKARSKI *et al.* (2017) e FERRO *et al.* (2018). Essa constatação é uma prática comum na maioria dos estudos de ACV dada a dificuldade de se encontrar dados primários de indústrias (devido questões de segredo industrial).

3.4. Carbono Biogênico

Percebeu-se um número crescente de estudos que tem optado por contabilizar o carbono biogênico (CO₂ biológico) presente na biomassa dos produtos avaliados. Quando essa opção é considerada, o processo de fim de vida se torna importante, já que ele define o horizonte temporal do armazenamento do carbono biogênico nos produtos. Dessa forma, foi observado que muitos estudos avaliaram como diferentes tipos de fim de vida do material ou sistema construtivo tem uma grande influência na quantidade do carbono biogênico, devendo ser, portanto, um tipo de análise sensibilizada a ser realizados nos estudos de ACV de biomateriais. O fim de vida em aterros se mostrou o mais vantajoso em termos de redução de emissões de CO₂-eq, como pode ser visto em GARCIA e FREIRE (2014), PEÑALOZA *et al.* (2016) e DEMERTZI *et al.* (2017). Isso pode ser explicado pelo fato desses autores considerarem que o carbono biogênico fica indefinidamente armazenado, sendo contabilizada somente a fração que é decomposta na forma de metano, que é menor que 5% (para todos esses estudos). Enquanto que para o cenário de queima com ou sem aproveitamento energético todo o CO₂ absorvido na fotossíntese retorna à atmosfera. Quando o aproveitamento energético é contabilizado em termos das emissões de GEE evitadas para a produção de eletricidade, há um maior

benefício para os países onde a matriz de energia elétrica é mais “suja” em termos da participação de GEE.

Outros estudos como DEMERTZI *et al.* (2017) e PITTAU *et al.* (2018) investigaram o fim de vida de reciclagem, que também influencia no carbono biogênico, pois dependendo da taxa de reciclabilidade do material há uma perda do carbono biogênico armazenado, normalmente devido algum tipo de tratamento. A redução das emissões de CO₂.eq torna-se mais significativa quando são contabilizadas as emissões evitadas devido a não utilização de novas matérias primas.

Percebeu-se que em todos os estudos onde o carbono biogênico foi contabilizado, o percentual de carbono da biomassa (proveniente do sequestro de CO₂ durante a fotossíntese da planta) utilizado foi obtido da literatura e não experimentalmente. Como ele tem uma grande influência nos impactos de aquecimento global, é opinião do autor que a quantificação experimental do teor de carbono das biomassas avaliadas, a fim de avaliar se os dados da literatura são compatíveis.

3.5. Métodos de Avaliação e Categorias de Impacto Ambiental

A categoria de EC (Aquecimento Global) é a que mais se destaca nos estudos avaliados. Alguns motivos levam a este resultado: (1) as mudanças climáticas é um impacto de magnitude global, diferentemente de outros como acidificação e eutrofização que são mais regionais; (2) é um dos problemas ambientais tido como uma das prioridades na maioria das agendas ambientais dos países; e (3) e o fato de uma das principais justificativas de se utilizar biomateriais está no armazenamento e estocagem das emissões atmosféricas, na forma de carbono biogênico.

Em relação a esse carbono, diferentes métodos têm sido utilizados (já discutidos anteriormente neste capítulo), com um crescimento de estudos que utilizam a modelagem pela ACV dinâmica, proposta por LEVASSEUR *et al.* (2010). Alguns estudos realizaram a quantificação das emissões de CO₂.eq e consumo de energia, como o de FLORENTIN *et al.* (2017).

O método de AICV CML foi o mais utilizado na maioria dos estudos avaliados, provavelmente devido a influência da norma EN 15804:2012 que o recomenda. Por exemplo, ARRIGONI *et al.* (2017) avaliaram as sete categorias de impacto ambiental

recomendadas por esse método. O método TRACI 2.1 foi utilizado para estudos norte-americanos, já que é um método que foi desenvolvido, considerando as características dos EUA e Canadá.

3.6. Alocação

Quando a alocação de impactos é realizada, normalmente entra como uma análise de sensibilidade no estudo, como os estudos de GARCIA e FREIRE (2014) e PRETOT *et al.* (2014). Embora as normas ISO 14040 e 14044, para os casos onde a alocação seja necessária, sugerem três tipos de alocação (massa, energia e econômica), como uma forma de simplificação, foram verificados nos estudos somente a alocação por massa (majoritariamente) e econômica. A alocação deve ser considerada principalmente para os casos em que o material, normalmente a biomassa, pode ser oriunda de outros processos produtivos, e passando a ser um coproduto. Quando os impactos alocados são contabilizados nestes estudos, eles tendem a modificar os resultados consideravelmente, principalmente quando é realizada por massa. Segundo as normas de ACV a alocação utilizando relações físicas entre *input e output*, como por exemplo a massa, é a forma recomendada nos casos em que processos com coprodutos são difíceis de se justificar. Esse fato pode explicar o motivo da maior parte dos estudos optar por esse tipo de alocação.

3.7. Considerações sobre Desempenho e Durabilidade

Os estudos que fazem alguma referência a desempenho e durabilidade normalmente usam critérios de desempenho térmico, com a transmitância térmica para a definição da unidade funcional. Esses estudos são normalmente para países europeus, onde esse critério é importante para questões de eficiência energética relacionado à diminuição do aquecimento das edificações. Em alguns estudos a vida útil dos sistemas é considerada, no entanto, de forma arbitrária ou considerando diferentes valores de vida útil, sem um embasamento experimental mais aprofundado. Alguns estudos tem um foco maior nesses aspectos como FUFA *et al.* (2013) e GRANT *et al.* (2014). Ambas pesquisas mostraram que diferenças na vida útil dos materiais tem grande importância nos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida.

Quando se pensa no uso do material, esse é um dos pontos que merece maior atenção, ainda mais quando se pensa em biomateriais, que normalmente tendem a ter o processo

de degradação, e, conseqüentemente perda de desempenho, mais rápido que materiais inorgânicos, como por exemplo, cerâmica e concreto. Desta forma, estudos de ACV que explorem a relação entre impactos ambientais, durabilidade e degradação é um item que merece atenção especial nas pesquisas futuras.

5.1 ACV com abordagem consequencial

Estudos que aplicaram a ACV com a abordagem consequencial na construção civil são raros. ARRIGONI *et al.* (2017) avaliou os impactos ambientais de misturas de terra compactada com resíduos utilizando a ACV atribucional e consequencial. Eles verificaram que nas misturas com maior teor de resíduos, os resultados entre as duas abordagens tiveram as maiores diferenças e apontaram que o fato da abordagem consequencial depender de questões do mercado, dificulta chegar a resultados mais precisos.

4. Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foram revisados na literatura científica diferentes pesquisas divididas nos seguintes temas: avaliação da EC em edificações (mitigação e adaptação) e uso da ACV para o estudo de biomateriais.

Em relação ao estudo do impacto das mudanças climáticas nas edificações foi observado que a maior parte das pesquisas estão direcionadas para estratégias de mitigação (como envoltórias mais eficientes, uso de materiais de baixo carbono, estratégias bioclimáticas, etc.). Em termos da adaptação há a avaliação com uso de simulações termoenergéticas, com o emprego de dados climáticos futuros para verificar como o aumento de temperatura causada pelas mudanças climáticas irá impactar climatização artificial, consumo de energia e emissões de GEE nas edificações. Verificou-se que a ferramenta *Climate Change World Weather File Generator* é uma das mais utilizadas e também será empregada na presente tese.

Constatou-se que o uso dos bioconcretos está sendo estimulado principalmente por questões ambientais, entre elas: menor impacto ambiental para produção, uma alternativa para eficiência energética das edificações, em substituição de isolantes à base de petróleo, como o EPS, o fato de utilizarem o material renovável e por conseguirem estocar CO₂, podendo, portanto, ser considerado um exemplo de material circular e de baixo carbono. Dentre as propriedades avaliadas percebe-se que a maioria dos estudos

estão focados em questões de desempenho mecânico e térmico. Sendo que são propriedades antagônicas, pois à medida que se melhora o desempenho térmico há uma perda das propriedades mecânicas. Pouca ênfase tem sido dada ao desempenho acústico e durabilidade desses materiais.

Verificou-se que estudos sobre a ACV de biomateriais se concentram em materiais à base de madeira, seguido de bambu e posteriormente os de bioconcreto, sendo a maioria de cânhamo. Do ponto de vista metodológico da aplicação da ACV para o estudo de biomateriais os pontos que receberam mais destaque foram: (1) os impactos relacionados ao aquecimento global foram os mais pesquisados; (2) o uso da ACV dinâmica parece ser uma tendência para o estudo de biomateriais; (3) a quantificação e contabilização do carbono biogênico é uma etapa crítica para estudo desses materiais; (4) os estudos adotam diferentes cenários de fim de vida e concluem que o fim de vida, para biomateriais, tem um grande impacto nos resultados de potencial de aquecimento global; (5) aspectos de desempenho e durabilidade são raramente considerados, a não ser o desempenho térmico.

Quando os biomateriais são comparados com materiais convencionais, à base de cerâmica e concreto, apresentam maior potencial de redução do impacto de mudança climática. Essa constatação foi verificada em todos os estudos encontrados. Entre os biomateriais, aqueles que possuem um menor período de rotação, como sistemas construtivos com uso de palha e bioconcreto de cânhamo tendem a ser os mais vantajosos do ponto de vista do impacto de mudanças climáticas. Esses resultados mostram que o BBC, mesmo sendo diferente dos bioconcretos encontrados na literatura, tem um potencial de diminuir a EC. Foram encontrados poucos estudos que avaliaram o uso de resíduos de origem biológica, e muitos deles não contabilizaram questões relacionadas a impactos evitados e questão de alocação desses resíduos, que são pontos importantes do ponto de vista da economia circular. Sendo, portanto, uma lacuna importante a ser preenchida.

Notou-se que a aplicação de ACV para os biomateriais e produtos circulares ainda está na sua fase inicial de desenvolvimento e que tais incertezas em relação ao carbono biogênico ainda precisam ser mais estudadas. Sabendo que esses materiais tendem a ser cada vez mais explorados como potenciais materiais para a mitigação do aquecimento global e incentivo da economia circular, a metodologia de ACV e EC devem seguir em

desenvolvimento, com melhorias, de forma paralela. Essas divergências levaram a dificuldade de comparar os resultados de diferentes estudos.

5. Referências

Agustí-Juan, I., Habert, G., 2017. Environmental design guidelines for digital fabrication. *J. Clean. Prod.* 142 (4), 2780-2791.

Agustí-Juan, I., Müller, F., Hack, N., Wangler, T., Habert, G., 2017. Potential benefits of digital fabrication for complex structures: Environmental assessment of a robotically fabricated concrete wall. *J. Clean. Prod.* 154 (15), 330-340.

Akkaoui, A., Caré, S., Vandamme, M., 2017. Experimental and micromechanical analysis of the elastic properties of wood-aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 134, 346-357.

Alavez-Ramirez, R., Chiñas-Castillo, F., Morales-Dominguez, V. J., Ortiz-Guzman, M., 2012. Thermal conductivity of coconut fibre filled ferrocement sandwich panels. *Constr. Build. Mater.* 37, 425–431.

Amizane, S., Arnaud, L., 2013. (Ed.) *Bio-aggregate based Building materials: applications to hemp concretes*. ISTE Ltd and John Wiley and Sons, 2013.

Amizane, S., Sonebi, M., 2016. Overview on bio-based building material made with plant aggregate. *RILEM Technical Letters*, 1, 31–38.

Anand, C. K., Amor, B., 2017. Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renew. Sus. Energy Rev.* 67, (1), 408-416.

Andreola, V. M., Gloria, M. Y., Toledo Filho, R. D., 2017. Behaviour under bending loads of workable bamboo bio-concrete. In: *17th International Conference - NOCMAT 2017 - Non-conventional Materials and Technologies*, 2017, Mérida. 2017. v. 1. p. 66-78.

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

Arehart, J. H. Nelson, W., Srubar, W. V., 2020. On the theoretical carbon storage and carbon sequestration potential of hempcrete. *J. Clean. Prod. Journal Pre-proof*, 2020.

Arrigoni, A., Beckett, C., Ciancio, D., Dotelli, G., 2017. Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilized rammed earth. *Con. Build. Mat.* 142, 128-136.

Arrigoni, A., Pelosato, R., Melià, P., Ruggieri, G., Sabbadini, S., Dotelli, G., 2017. Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks. *J. Clean. Prod.* 149, 1051– 1061.

Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., , C. Guattari, C., , Evangelisti L., Graziesch, G., 2017. A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Build. Environ.* 114, 307-332.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

Babaizadeh, H., Haghghi, N., Asadi, S., Broun, R., Riley, D., 2015. Life cycle assessment of exterior window shadings in residential buildings in different climate zones. *Build. Env.* 90, 168-177.

Balashbaneh, A., T., Marsono, A. K. B., 2017. Strategies for reducing greenhouse gas emissions from residential sector by proposing new building structures in hot and humid climatic conditions. *Build. Env.* 124, 357-368.

Benachio, G. L., Freitas, M. C. D., STavares, S. F. Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *J. Clean. Prod.* V. 260, 1 July 2020, 121046.

Bovea, M. D., Powell, J., 2016. Developments in life cycle assessment applied to evaluate the environmental performance of construction and demolition wastes. *Waste Manag.* 50, 151-172.

Brandão, M., Levasseur, A., Kirschbaum, M., Weidema, B., Cowie, A., Jørgensen, S., et al., 2013. Key issues and options in accounting for carbon sequestration and temporary storage in life cycle assessment and carbon footprinting. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 230-240.

British Research Establishment (BRE), 2013 Product category rules for type III environmental product declaration of construction products to EN 15804:2012, 2013, (36-37).

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: A review. *Renew. Sus. Energy Rev.* 29, 394-416.

Caldas, L. R. et al., 2019. Avaliação ambiental de revestimentos de terra: análise da influência da vida útil no ciclo de vida. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 13., 2019, Goiânia. Anais [...] Porto Alegre: ANTAC, 2019. pp. 1922-1934.

Caldas, L. R., Pittau, F., Andreola, V., Habert, G., Saraiva, A. Toledo Filho, R. D., 2019. Dynamic life cycle carbon assessment of three bamboo bio-concretes in Brazil. 3rd International Conference on Bio-based Building Materials & 1st Conference on ECOlogical valorisation of GRANular and FIBrous materials. June 21th - 23th 2019 Clermont-Ferrand, France.

Caldas, L. R.; Carvalho, M. T. M.; Toledo Filho, R. D., 2020b. Avaliação de estratégias para mitigação dos impactos ambientais de revestimentos argamassados no Brasil. *Ambiente Construído*, v. 20, n. 3, p. 343-362, 2020.

Caldas, L. R.; Lira, J. S. De M. M.; Melo, P. C. De.; Sposto, R. M., 2017. Life cycle carbon emissions inventory of brick masonry and light steel framing houses in Brasilia: proposal of design guidelines for low-carbon social housing. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 17, n. 3, p. 71-85, jul./set. 2017.

Caldas, L.R, Abreu-Harbich, L. V., Hora, K. E. 2020a. Avaliação ambiental de alternativas construtivas de um edifício contêiner. *PARC Pesquisa Em Arquitetura E Construção*, 12, e019011.

Casagrande, B. G., Alvarez, C. E. de, 2013. Preparação de arquivos climáticos futuros para avaliação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edificações. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 173-187, jul./set. 2013.

Celik, K.; Meral, C.; Gursel, A. P.; Mehta, P. K.; Horvath, A.; Monteiro, P. J. M.; Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of selfconsolidating concrete mixtures made with blended Portland cements containing fly ash and limestone powder. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 56, (59–72).

Chan, A. L. S., 2011. Developing Future Hourly Weather Files For Studying the Impact of Climate Change on Building Energy Performance in Hong Kong. *Energy and Buildings*, v. 43, p. 2860- 2868.

Chang, F. C., 2018. Environmental benefit of utilizing bamboo material based on life cycleassessment. *J. Clean. Product*. 204, (60-69).

Chau, C. K., Leung, T. M., Ng, W. Y., 2015. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. *App. Energy*. 143, 395-413.

Chau, C. K., Xu, J. M., Leung, T. M., Ng, W. Y., 2017. Evaluation of the impacts of end-of-life management strategies for deconstruction of a high-rise concrete framed office building. *App. Energy*. 185, 1595-1603.

Chennouf, N. et al., 2018. Hygrothermal characterization of a new bio-based construction material: Concrete reinforced with date palm fibers. *Const. Build. Mat.*, v. 192, 348-352.

Cheshire, David. 2016. *Building Revolutions: Applying the Circular Economy to the Built Environment*. Newcastle Upon Tyne: RIBA Publishing.

Cobut, A., Beauregard, R., Blanchet, P., 2015. The environmental footprint of interior wood doors in non-residential buildings e part 1: life cycle assessment. *J. Clean. Prod*. 109, 232-246.

Confederação Nacional da Indústria (CNI), 2018. *Economia circular : oportunidades e desafios para a indústria brasileira / Confederação Nacional da Indústria. – Brasília : CNI, 2018. 64 p. : il. ISBN 978-85-7957-166-4*

Cooper, H. M., Hedges, L. V., Valentine, J. C., 2009. *The handbook of research synthesis and meta-analysis*. United Kingdom: Russell Sage Foundation Publications. 2009. Cap. 1, p. 1-14.

Costa, B. L. C., 2012. *Quantificação das Emissões de CO2 Geradas na Produção de Materiais Utilizados na Construção Civil no Brasil*. Dissertação de Mestrado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Costa, E. B., 2013. Aproveitamento do Resíduo de Anodização do Alumínio na Produção do Cimento Sulfoaluminato de Cal Belítico. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

Da Gloria, M.Y.R., Toledo Filho, R.D.F., 2016. Influence of the wood shavings/cement ratio on the thermo-mechanical properties of lightweight wood shavings-cement based composites. In: 6th Amazon..., 2016, Cali. April 27- 29th, 2016.. Cali: Track Comunicación, 2016. p. 365-374.

Da Gloria, Y. M. R., 2015. Desenvolvimento e Caracterização de Painéis Sanduiches de concreto com Núcleo leve e Faces em Laminados reforçados com Fibras longas de Sisal. Dissertação (Mestrado). Programa de Engenharia Civil, COPPE, UFRJ.

Damineli, B., L. 2013. Conceitos para Formulação de Concretos com Baixo Consumo de Ligantes: Controle Reológico, Empacotamento e Dispersão de Partículas. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, USP, São Paulo, SP, Brasil.

De Wilde, P.; Tian, W, 2011. Towards Probabilistic Performance Metrics For Climate Change Impact Studies. *Energy and Buildings*, v. 43, n. 11, p. 3013-3018.

De Wolf, C., Pomponi, F., Moncaster, A., 2017. Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice. *Ener. Build.* 140, 68-80.

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.* 145, 294 – 302.

Diyamandoglu, Fortuna, L. M., 2015. Deconstruction of wood-framed houses: Material recovery and environmental impact. *Res. Cons. Rec.*, v. 100, 2015, 21-30.

Dresche, A., Lacerda, D.P., Antunes Jr., J.A.V., 2015. Systematic Literature Review Method adapted to Design Science Research. In: _____. *Design Science Research: A Method for Science and Technology Advancement*. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer. 2015. p. 153-156.

EC. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. First Edition November 2011. EUR 24571 EN. EC – European Commission. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2011.

Escamilla, E. Z., Habert, G., 2014. Environmental impacts of bamboo-based construction materials representing global production diversity. *J. Cleaner Prod.* 69, 117-127.

Escamilla, E. Z., Habert, G., Daza, J. F. C., Archilla, H. F., Fernandez, J. S. E., Trujillo, D. 2018. Industrial or traditional Bamboo Construction? Comparative Life Cycle Assessment of Bamboo-Based Buildings. *Sustainability*. 3096, 1-14.

Escamilla, E. Z., Habert, G., López, M. L. F., 2014. Environmental savings potential from the use of bahareque (mortar cement plastered bamboo) in Switzerland. *Key Eng. Materials*. 600, 21 – 33.

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.* 103, 44 – 53.

Fairbairn, E. M. R.; Paula, T. P.; Cordeiro, G. C.; Americano, B. B., 2012. Avaliação da substituição parcial de clínquer por cinza de bagaço de cana: redução de emissão de CO₂ e potencial de créditos de carbono. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais.* 5 (2), 229-251.

Ferrari, J., Crigny, A., Dupré, B., 2015. Environmental impacts of agro sourced materials compared to traditional materials into building. In: S. Amziane, M. Sonebi. *Proceedings PRO 99 First International Conference on Bio-based Building Materials*, France: RILEM Publications S.A.R.L.(599-603), ISBN: PRO 99: 978-2-35158-154-4.

Foster, G., 2020. Circular economy strategies for adaptive reuse of cultural heritage buildings to reduce environmental impacts. *Resour. Conserv. Recycl.* 152, 104507. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104507>

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.* 90, 51 – 59.

Fufa, S. M., Jelle, B. P., Hovde, P J., 2013. Durability, reaction to fire properties, and environmental impact of treated and untreated wooden claddings. *Wood Mat. Sci. Eng.* 8, 175-187.

Gallego-Schmid, A., Chen, H.M., Sharmina, M., Mendoza, J.M.F., 2020. Links between circular economy and climate change mitigation in the built environment. *J. Clean. Prod.* 260, 121115

Garcia, C.A., Hora, G., 2017. State-of-the-art of waste wood supply chain in Germany and selected European countries. *Waste Manag.* 70, 189–197.

Garcia, R., Freire, F., 2014. Carbon footprint of particleboard: a comparison between ISO/TS 14067, GHG Protocol, PAS 2050 and Climate Declaration. *J. Clean. Prod.* 66, 199 – 209.

Ghisellini, P., Ripa, M., Ulgiati, S., 2018. Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review. *J. Clean. Prod.* 178, 618–643.

Gomes, V., Saade, M., Lima, B., Silva, M., 2018 Exploring lifecycle energy and greenhouse gas emissions of a case study with ambitious energy compensation goals in a cooling-dominated climate. *Energy and Buildings.* 173, 302-314.

Gough, D., Thomas, J., 2012. Commonality and diversity in reviews. In: Gough, D.; Oliver, S.; Thomas, J. (Eds.). *An introduction to systematic reviews*. London: Sage Publications Ltd. 2012, p. 35–65.

Grant, A., Ries, R., Kibert, C., 2014. Life Cycle Assessment and Service Life Prediction. *J. Indus. Eco.* 18, 187-200.

- Gursel, A. P., Maryman, H., Ostertag, C., 2016. A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash. *J. Clean. Prod.*112, 823 – 836.
- Harkouss, F., Fardoun, F., Biwole, P. H., 2019. Optimal design of renewable energy solution sets for net zero energy buildings. *Energy*. 179, 1155-1175.
- Head, M., Levasseur, A., Beauregard, R., Margni, M, 2020. Dynamic greenhouse gas life cycle inventory and impact profiles of wood used in Canadian buildings. *Build Env.* 173. 106-751
- Hossain, M. U., Leu, S. Y., Poon, C. S., 2016. Sustainability analysis of pelletized bio-fuel derived from recycled wood product wastes in Hong Kong. *J. Clean. Prod.*, 113 400-410.
- Hossain, U. M., Poon, C. S., 2018. Comparative LCA of wood waste management strategies generated from building construction activities. *J. Clean. Prod.* 177, 387-397.
- Hossain, U. M., Poon, C. S., Lo, I. M. C., Cheng, J. C. P., 2017. Comparative LCA on using waste materials in the cement industry: a Hong Kong case study *Resour. Conserv. Recycl.*, 120, 199-208.
- Invidiata, A., Ghisi, E., 2016. Life-cycle energy and cost analyses of window shading used to improve the thermal performance of houses. *J. Clean. Prod.*133, 1371–1383.
- Ip, K., Miller, A., 2012. Life cycle greenhouse gas emissions of hemp–lime wall constructions in the UK. *Res. Cons. Recyc.*69, 1-9.
- Jarre, M., Petit-Boix, A., Priefer, C., Meyer, R., Leipold, S., 2020. Transforming the bio-based sector towards a circular economy - What can we learn from wood cascading? *Energy Build.* 110, 1-12.
- Jarre, M., Petit-Boix, A., Priefer, C., Meyer, R., Leipold, S., 2020. Transforming the bio-based sector towards a circular economy - What can we learn from wood cascading? *For. Policy Econ.* 110, 101872. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.01.017>.
- Katers, J. F., Snippen, A. J., Puettmann, M. E., 2012; Life cycle inventory of wood pellet manufacturing and utilization in Wisconsin *For. Prod. J.*, 62 (4), 289-295.
- Klein, D., Wolf, C., Schulz, C., Weber-Blaschke, G., 2016. Environmental impacts of various biomass supply chains for the provision of raw wood in Bavaria, Germany, with focus on climate change. *Sci. Total Environ.* 539, 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.087>
- Korjenic, A., Zach, J., Hroudová, J., 2016. The use of insulating materials based on natural fibers in combination with plant facades in building constructions. *Energy Build.* 116, 45–58.
- La Rosa, A. D., Recca, A., Gagliano, A., Summerscales, J., Latteri, A., Cozzo, G., Cicala, G., 2014. Environmental impacts and thermal insulation performance of innovative composite solutions for building applications. *Constr. Build. Mater.* 55, 406 – 414.

- La Rosa, A. D., Recca, A., Summerscales, J., Latteri, A., Cozzo, G., Cicala, G., 2014. Bio-based versus traditional polymer composites. A life cycle assessment perspective. *J. Clean. Prod.* 74, 135 – 144.
- Lee, S. H., Park, W., Lee, H., 2013. Life cycle CO₂ assessment method for concrete using CO₂ balance and suggestion to decrease LCCO₂ of concrete in South-Korean apartment. *Ener. Build.* 58, 93 – 102.
- 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.* 44, 3169-3174.
- Li, M., Khelifa, M., Ganaoui, M. E., 2017. Mechanical characterization of concrete containing wood shavings as aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6, 587-596.
- López Ruiz, L.A., Roca Ramón, X., Gassó Domingo, S., 2020. The circular economy in the construction and demolition waste sector – A review and an integrative model approach. *J. Clean. Prod.* 248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119238>
- Lourenço, P., Pinheiro, M. D., Heitor, T., 2019. Light use patterns in Portuguese school buildings: User comfort perception, behaviour and impacts on energy consumption. *J. Clean. Prod.* 228 (10), 990-1010.
- Lucon O., D. Üрге-Vorsatz, A. Zain Ahmed, H. Akbari, P. Bertoldi, L. F. Cabeza, N. Eyre, A. Gadgil, L. D. D. Harvey, Y. Jiang, E. Liphoto, S. Mirasgedis, S. Murakami, J. Parikh, C. Pyke, And M. V. Vilariño, 2014: Buildings. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Malmqvist, T. et al., 2020. Circularity in the built environment – a call for a paradigm shift. In: Brandão et al. (2020). *Handbook of the Circular Economy*. Edward Elgar Publishing Ltd
- Martinopoulos, G., 2018. Life Cycle Assessment of solar energy conversion systems in energetic retrofitted buildings. *J. Build. Eng.* 20, 256-263.
- Martins, A.; Caldas, L. R.; Paiva, R. M.; Toledo Filho, R. D. Avaliação do ciclo de vida de compósitos solo cimento-fibras de sisal considerando diferentes distâncias de transporte. In: *CONGRESSO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO COM TERRA NO BRASIL*, 7, 2018. Anais [...]. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2018.
- Maxineasa, S. G., Entuc, I., Taranu, N., Florenta, I., Secu, A., 2018. Environmental performances of different timber structures for pitched roofs. *J. Clean. Prod.* 175, 164-175.
- Melià, P.; Ruggieri, G.; Sabbadini, S.; Dotelli, D., 2014. Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters. *Journal of Cleaner Production*, v. 80, p. 179 – 186.

- Merrild, H., Christensen, T. H., 2009. Recycling of wood for particle board production: accounting of greenhouse gases and global warming contributions *Waste Manag. Res.*, 27, 781-788.
- Monteiro, H., Freire, F. 2012. Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods. *Ener. Build.* 47, 572 – 582.
- Nazareth, A. P. 2019. How close is the built environment to achieving circularity?. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 225 (2019) 012070.
- Ng, R., Shi, C.W.P., Tan, H.X., Song, B., 2014. Avoided impact quantification from recycling of wood waste in Singapore: An assessment of pallet made from technical wood versus virgin softwood. *J. Clean. Prod.* 65, 447–457. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.053>
- Oliveira, F. R. M. 2013. Integração de indicadores de desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico de sistemas estruturais verticais em concreto. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Unicamp, São Paulo, SP, Brasil.
- Oliveira, F. R. M., Silva, M. G., Silva, V., 2013. Indicadores de sustentabilidade com base em ciclo de vida para sistemas estruturais em concreto. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais.* 6 (5), 832-843.
- Oliveira, V. C. H. C., Damineli, B. L., Agopyan, V., John, V. M., 2014. Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. *Ambiente Construído.* 14 (4), 167-181.
- Olsoon, O., et al., 2016. Cascading of woody biomass: definitions, policies and effects on international trade. *IEA Bioenergy. IEA Bioenergy Task 40.*
- Pajchrowski, G., Noskowiak, A., Lewandowski, A., Strykowski, W., 2014. Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings. *Constr. Build. Mater.* 52, 428-436.
- Park, H. S., Lee, H., Kim, Y., Hong, T., Choi, S. W., 2014. Evaluation of the influence of design factors on the CO₂ emissions and costs of reinforced concrete columns. *Energ. Build.* 82, 378– 374.
- Passuello, A. C. B., Oliveira, A. F., Costa, E. B., Kirchheim, A. P, 2014. Aplicação da avaliação de ciclo de vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos. *Ambiente Construído.* 14 (4), 7-20.
- Pawelzik, P., Carus, M., Hotchkiss, J., Narayan, R., Selke, S., Wellisch, M., Weiss, M., Wicke, B., Patel, M. K., 2013. Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials – Reviewing methodologies and deriving recommendations. *Res. Cons. Recyc.* 73, 211-228.
- Peñaloza, D., Erlandsson, M., Falk, A., 2016. Exploring the climate impact effects of increases use of bio-based materials in buildings. *Constr. Build. Mater.* 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.* 129, 117-129.
- Pittau, F., Lumia, G., Heeren, N., Iannaccone, G., Habert, G., 2019. Retrofit as a carbon sink: The carbon storage potentials of the EU housing stock. *J. Clean. Prod.* 214, 365-376.
- Pomponi, A., Moncaster, A., 2016. Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment. What does the evidence say?. *J. Env. Manag.* 181, 687-700.
- Pretot, S., Collet, C., Garnier, C., 2014. Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating. *J. Clean. Prod.* 72, 223 – 231.
- Prusty, J. K., Patro, S. K., 2015. Properties of fresh and hardened concrete using agro-waste as partial replacement of coarse aggregate – A review. *Cons. Build. Mat.* 82, 101-113.
- Prusty, J. K., Patro, S. K., Basarkar, S. S., 2016 Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment – A review. *International Journal of Sustainable Built Environment.* 5, 312-333.
- Rahim, M., Douzane, O., Tran Le, A. D., Langlet, T., 2016. Effect of moisture and temperature on thermal properties of three bio-based materials. *Constr. Build. Mater.* 111, 1119–1127.
- Randl, N., Steiner, T., Ofner, S., Baumgartner, E., 2016. Development of UHPC mixtures from an ecological point of view. *Cons. Build. Mat.* 67, 373 – 378.
- Reed, D., Bergman, R., Kim, J. W., Taylor, A., Harper, A., Jones, D., Knowles, C., Puettmann, M. E., 2012. Cradle-to-gate life-cycle inventory and impact assessment of wood fuel manufacturing from hardwood flooring residues in the South eastern United States *For. Prod. J.*, 62 (4), 280-288.
- Rivela, B., Moreira, M. T., Munoz, I., Rieradevall, J., Feijoo, G., 2006. Life cycle assessment of wood wastes: a case study of ephemeral architecture *Sci. Total Environ.*, 357, 1-11.
- Rocha, T. M. S., Miranda, L. F. R., Parchen, C. F. A., 2019. Influência da composição granulométrica das partículas de resíduos de madeira nas propriedades de compósitos minerais: parte 1 - cimento-madeira. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 113-126, jul./set.
- Rock, M. et al., 2020. Embodied GHG emissions of buildings -The hidden challenge for effective climate change mitigation *Applied Energy*, 258 (2020), pp. 114107.
- Røyne, F., Peñaloza, D., Sandin, G., Berlin, J., Svanstrom, M., 2016. Climate impact assessment in life cycle assessment of forest products: implications of method choice for results and decision-making. *J. Clean. Prod.* 116, 90 – 99.
- Saade, M. R. M., 2013. Influência da alocação de impactos na indústria siderúrgica sobre a avaliação de ciclo de vida de cimentos. *Dissertação de Mestrado*, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

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.* 96, 22-34.

Salzer, C., Wallbaum, H., Ostermeyer, Y., Kono, J., 2017. Environmental performance of social housing in emerging economies: life cycle assessment of conventional and alternative construction methods in the Philippines. *Int. J. Life Cycle Assess.* 22, 1785-1801.

Samani, P., Mendes, A., Leal, V., Guedes, J. M., Correia, N., 2015. A sustainability assessment of advanced materials for novel housing solutions. *Build. Environ.* 92, 182-191.

Sánchez-García, D., Rubio-Bellido, C., Río, J. J. M., Pérez-Fargallo, A., 2019. Towards the quantification of energy demand and consumption through the adaptive comfort approach in mixed mode office buildings considering climate change. *Ene. Build.* 187, 173-185.

Santos, D. J., 2020. Desenvolvimento de Paineis Sanduíches Leves com Faces em Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras Curtas de Sisal e Núcleo de Bioconcreto de Casca de Arroz. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Santos, D. O. J., Da Gloria, M. Y., Andreola, V. M., Pepe, M., Toledo Filho, R. D., 2017. Compressive stress strain behavior of workable bio-concretes produced using bamboo, rice husk and wood shavings particles. In: 2nd International Conference on Bio-Based Building Materials, RILEM, 2017, p. 211-217.

Sassoni, E., Manzi, S., Motori, A., Montecchi, M., Canti, M., 2014. Novel sustainable hemp-based composites for application in the building industry: Physical, thermal and mechanical characterization. *Energy Build.* 77, 219-226.

Serres, N., Braymand, S., Feugeas, F., 2016. Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment. *J. Build. Eng.* 5, 24 – 33.

Silva, A. O. 2014. Estudo comparativo do ciclo de vida e custo de pilar com diferentes traços de concreto. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, UFSM, Santa Maria, RS, Brasil.

Silva, E. J., et al. 2018. Compósito cimentício com elevado teor de fibra de coco tratada: propriedades físicas e durabilidade. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23(3), e12165. Epub October 18, 2018.

Silvestre, J. D., Pargana, N., Brito, J., Pinheiro, M., 2016. Insulation Cork Boards—Environmental Life Cycle Assessment of an Organic Construction Material. *Mater.* 9, 394, 1-16.

Son, N. K., et al. 2017. Investigation of Agro-concrete using by-products of Rice Husk in Mekong Delta of Vietnam. *Proc. Engineering.* 171, 725-733.

- Tae, S., Cheonghoon, B., Shin, S., 2011. Life cycle CO evaluation on reinforced concrete structures with high-strength concrete. *Env. Imp. Assess. Rev.* 31, 253 – 260.
- Taoukil, D. et al., 2013. Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood–concrete composite. *Cons. Build. Mat.* 48, 104-115.
- Tarantini, M., Loprieno, A. D., Porta, P. L., 2011. A life cycle approach to Green Public Procurement of building materials and elements: A case study on windows. *Energy.* 36, 2473-2482.
- Teixeira, E. R., Mateus R., Camões, A. F., Bragança, L., Branco, F., 2016. Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material. *J. Clean. Prod.* 112, 2221 – 2230.
- Tellnes, L. G. F., 2017. Comparative assessment for biogenic carbon accounting methods in carbon footprint of products: a review study for construction materials based on forest products. *iForest.* 10, 815-823.
- Turk, J., Cotic, Z., Mladenovic, A., Šajna, A., 2015. Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. *Waste Manag.* 45, 2231 – 2242.
- Van Den Heede, P., De Belie, N., 2012. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations". *Cem. Conc. Comp.* 34 (4), 431–442.
- Van der Lugt P.; Vogtländer J. The environmental impact of industrial bamboo products. Delft: INBAR International Network For Bamboo and Rattan, Technical University Delft; 2015.
- Wang, H., Q. Chen, Q., 2014. Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States. *Energy Build*, 82 (2014), pp. 428-436.
- Wang, L., Liu, X., Brown, H., 2017. Prediction of the impacts of climate change on energy consumption for a medium-size office building with two climate models. *Ener. Build.* 157, 218-226.
- Wen, T. J., Siong, H. C., Noor, Z. Z. Assessment of embodied energy and global warming potential of building construction using life cycle analysis approach: Case studies of residential buildings in Iskandar Malaysia. *Ene. Build.* 93 (15), 295-302.
- Williams, J., Lawrence, M., Walker, P., 2016. A method for the assessment of the internal structure of bio-aggregate concretes. *Cons. Build. Mat.* 116, 45-51.
- Wilson., J. B., 2010. Life-cycle inventory of particleboard in terms of resources, emissions, energy and carbon *Wood Fiber Sci.*, 42 90-106
- Yang, K. H., Seo, E. A., Tae, S. H., 2014. Carbonation and CO₂ uptake of concrete. *Env. Impc. Assess. Rev.* 46. 43 – 52.

Yin, S., Tuladhar, R., Sheehan, M., Combe, M., Collister, T., 2016. A life cycle assessment of recycled polypropylene fibre in concrete footpaths. *J. Clean. Prod.* 112. 2231 – 2242.

Yu, D., Tan, H., Ruan, Y., 2011. A future bamboo-structure residential building prototype in China: Life cycle assessment of energy use and carbon emission. *Ener. Build.*, 43, 2638-2646.

Zhang, Y., Mckechnie, J. Y., Cormier, D., Lyng, R., Mabee, W., Ogino, A., Maclean, H.L., 2010. Life cycle emissions and cost of producing electricity from coal, natural gas, and wood pellets in Ontario, Canada *Environ. Sci. Technol.*, 44 (2010), 538-544.

Apêndice 2A

Quadro A1 – Lista dos principais estudos avaliados conforme diferentes aspectos metodológicos da ACV.

Autores	Produto estudado	Unidade funcional (UF)	Estágios do ciclo de vida ¹	Inventário	Normas de ACV ²	Método AICV	Consideração carbono biogênico	Fim de vida	Alocação	Análise de sensibilidade	Aspectos de desempenho	Emissão de carbono
Bambu												
VOGTLÄNDER <i>et al.</i> (2010)	Produtos de bambu	Diferentes produtos (uma viga, painéis e colmo de bambu)	A1-A4	Dados primários e Ecoinvent	-	Idemat - Eco-costs	Não	-	-	-	-	-
YU <i>et al.</i> (2011)	Estrutura de bambu para edificação	m ² área de piso	A1-A3, A4, B6, C1, D	Literatura	-	-	Não	Aterramento e reciclagem	-	Utilização de critérios certificação LEED e conteúdo de materiais reciclados	Desempenho térmico	168,9 kgCO ₂ -eq/m ²
ESCAMILLA e HABERT (2014)	Produtos de bambu	1m ³	A1-A3	Literatura, entrevista com especialistas e Ecoinvent	-	IMPACT 2002+	Não	-	-	Dados de diferentes produtores	Não	-
ESCAMILLA <i>et al.</i> (2014)	Sistema Bahareque	1m ² de parede e Resistência térmica	A1-A4	Dados primários e Ecoinvent		Ecological Scarcity 2006, IMPACT 2002, (CED), IPCC100	Não	-	-	Diferentes cenários de manutenção	Desempenho térmico	-

Autores	Produto estudado	Unidade funcional (UF)	Estágios do ciclo de vida ¹	Inventário	Normas de ACV ²	Método AICV	Consideração carbono biogênico	Fim de vida	Alocação	Análise de sensibilidade	Aspectos de desempenho	Emissão de carbono
VOGTLÄNDER <i>et al.</i> (2014)	Painel laminado de bambu	1kg	A1-A3, D	Primário e Literatura	-	ILCD e Desenvolvimento de um método próprio	Sim	Incineração com aproveitamento energético	-	Diferentes eficiências de incineração e inclusão da mudança no uso do solo	Não	-0,61 a -1,13 kgCO ₂ .eq/kg
ESCAMILLA <i>et al.</i> (2016)	Edificação de bambu	37.000 edificações por ano	A1-A3, C1-D	Literatura e Ecoinvent	-	IPCC 100a	Sim	Incineração com aproveitamento energético	-	Vida útil da edificação, destinação final resíduos. Matrizes de eletricidade	Vida útil da edificação	-10 ⁸ tCO ₂ .eq/130 anos
RESTREPO <i>et al.</i> (2016)	Painel de bambu	1 painel de bambu	A1-A3	Literatura e Ecoinvent	-	IPCC 100a	Não	-	-	Tipo de combustíveis nos fornos (resíduos de bambu e gás natural)	Não	-117 kgCO ₂ .eq/painel - 381kgCO ₂ .eq/painel
SALCIDO <i>et al.</i> (2016)	Domo de bambu	A estrutura de um domo reticulado	A1-A3	Literatura e GaBi	-	TRACI 2.1	Sim	-	-	Uso do Athena Impact Estimator	Desempenho estrutural (módulo de elasticidade,	-839,79 kgCO ₂ .eq/domo
CHANG <i>et al.</i> (2018)	Bambu laminado colado	1 painel de bambu de dimensões 2440x1220x20 mm	A1-A3	Literatura e Ecoinvent	-	IMPACT 2002	Sim	-	-	-	-	-1000 kgCO ₂ .eq/painel
ESCAMILLA <i>et al.</i> (2018)	Bambu natural Bambu laminado colado	Área construída da edificação (m ²)	A1-A5	Literatura e Ecoinvent	EN 15978: 2011	IPCC	Sim	-	-	-	-	Bambu natural: -40 a Bambu laminado colado: 25 kgCO ₂ .eq/m ²
Bioconcreto de cânhamo												

Autores	Produto estudado	Unidade funcional (UF)	Estágios do ciclo de vida¹	Inventário	Normas de ACV²	Método AICV	Consideração carbono biogênico	Fim de vida	Alocação	Análise de sensibilidade	Aspectos de desempenho	Emissão de carbono
IP e MILLER (2012)	Bioconcreto de cânhamo	1 parede de bioconcreto de cânhamo	A1-A5	Dados primários, literatura e Ecoinvent	PAS2050	IPCC 100a	Sim	-	-	Distâncias de transporte, fertilizantes, quantidade de cal na mistura, diferentes acabamentos	Desempenho térmico	-36,08 kgCO ₂ -eq/m ²
PRETOT <i>et al.</i> (2014)	Bioconcreto de cânhamo	1m ² de parede e Resistência térmica	A1-A5, B5, C2	Ecoinvent	EN 15804:2012	CML 2002	Sim	Aterro	Sim. Massa e econômica	Alocação.	Desempenho térmico	-1,6 kgCO ₂ -eq/m ²
ARRIGONI <i>et al.</i> (2017)	Bioconcreto de cânhamo	1m ² de parede e Resistência térmica	A1-A5, B5, B5	Dados primários e Ecoinvent	EN 15804:2012	CML 2002	Sim	-	Sim. Massa e econômica	Alocação, distâncias de transporte, proporção dos constituintes na mistura	Desempenho térmico	-26,01 kgCO ₂ -eq/m ²
PITTAU <i>et al.</i> (2018)	Bioconcreto de cânhamo	1m ² de parede e Resistência térmica	A1-A5, B4, C1-C4, D	Literatura e Ecoinvent	EN 15804:2012	ACV dinâmica	Sim	Aterramento, incineração com aproveitamento energético e reciclagem	Sim. Massa	Diferentes opções de fim de vida	Desempenho térmico, estrutural e vida útil	-
PITTAU <i>et al.</i> (2019)	Bioconcreto de cânhamo	1m ²	A1-A5, B4, C1-C4, D	Literatura e Ecoinvent	EN 15804:2012	ACV dinâmica	Sim	Reciclagem, queima com aproveitamento energético e aterro	Sim. massa	Diferentes opções de fim de vida	Desempenho térmico	-
AREHART <i>et al.</i> (2020)	Bioconcreto de cânhamo	1m ² de parede e Resistência térmica	A1-A3, B1(Carbonatação)	Literatura	EN 15804:2012	IPCC	Sim	-	-	Tipo de ligantes do hempcrete (cal, cimento, pozolanas) e densidade (baixa, média e alta).	Desempenho térmico	-13 a -16 kgCO ₂ -eq/m ²

Autores	Produto estudado	Unidade funcional (UF)	Estágios do ciclo de vida ¹	Inventário	Normas de ACV ²	Método AICV	Consideração carbono biogênico	Fim de vida	Alocação	Análise de sensibilidade	Aspectos de desempenho	Emissão de carbono
Madeira												
BOLIN (2011)	Madeira serrada tratada para deck	Superfície do deck para 1 ano de uso	A1-A3, B4, C3	Dados primários e literatura	-	TRACI 2.1	Não	Aterramento	-	Espessura da madeira serrada, frequência de aplicação do verniz, utilização de produtos reciclados	-	26-114 lb-kgCO ₂ .eq/ano
GONZÁLEZ-GARCÍA (2011)	Madeira rolada	1m ³	A1-A3, B4, B6, C2	Dados primários, literatura e Ecoinvent	-	IPCC 100a	Não	-	-	-	-	23,2 kgCO ₂ .eq/m ³
TARANTINI <i>et al.</i> (2011)	Janela de madeira	1 janela de referência	A1-A3	Dados primários e IVAM LCA database	-	IPCC 100a, CML 2001	Não	Aterramento e reciclagem	-	Diferentes fins de vida	Vida útil	-
GARCIA e FREIRE (2014)	Painel de particulados de madeira	1m ³	A1-A3, C1-D	Dados primários e Ecoinvent	ISO 14067: 2014	De acordo com cada norma	Sim, para diferentes metodologias de EC	Aterro e incineração	Sim. Massa e econômica	Alocação e diferentes fins de vida do material.	Não	-837 a 20 kgCO ₂ .eq/m ³
COBUT <i>et al.</i> (2015)	Portas de madeira	Fechamento e separação de dois ambientes, com um porta de 0,9 m x 2,1m	A1-A5, B1, B2, C1-C3	Dados primários e Ecoinvent	-	Impact 2002+, ReCiPe Midpoint	Não	Aterro	Sim. Massa.	Variação das distâncias de transporte e matriz de eletricidade	Vida útil da porta	-
POMMIER <i>et al.</i> (2016)	Laminado de madeira	1m ² de laminado de madeira	A1-A3	Dados primários e Ecoinvent	ILCD Handbook	ReCiPe Midpoint	Não	-	Não	-	Durabilidade e resistência à abrasão	9,0-23,8 kgCO ₂ .eq/m ²

Autores	Produto estudado	Unidade funcional (UF)	Estágios do ciclo de vida¹	Inventário	Normas de ACV²	Método AICV	Consideração carbono biogênico	Fim de vida	Alocação	Análise de sensibilidade	Aspectos de desempenho	Emissão de carbono
SIERRA-PEREZ <i>et al.</i> (2016)	Painel de cortiça isolante	1m ² de parede e Resistência térmica	A1-A3	Dados primários e Ecoinvent	EN 15804: 2012	CML 2002	Sim	Aterramento, incineração com aproveitamento energético e reciclagem	Sim. Massa .	Diferentes cenários, de fim de vida	Desempenho térmico	-5,42 - 4,70 kgCO ₂ .eq/m ²
SILVESTRE <i>et al.</i> (2016)	Painel de cortiça	1m ³	A1-A3, C1-D	Dados primários e Ecoinvent	EN 15804: 2012 BRE (2013)	CML 2002	Sim	Aterro e reciclagem	Sim. Massa e econômica	Alocação e diferentes fins de vida do material.	Não	-435 a 40,2 kgCO ₂ .eq/m ³
KOUCHAKI-PENCHA H <i>et al.</i> (2016)	Painel de MDF	1m ³	A1-A3	Dados primários e Ecoinvent	-	CML 2002	Não	-	-	Utilização de combustíveis alternativos ao gás natural	Não	834,4 kgCO ₂ .eq/m ³
DEMERTZI <i>et al.</i> (2017)	Painel de cortiça	1m ² de parede e Resistência térmica	A1-A3, C3	Dados primários e Ecoinvent	ILCD	ILCD	Sim	Incineração, aterro e reciclagem	Sim. Massa e econômica	Alocação, vida útil e diferentes fins de vida do material.	Vida útil do material. Desempenho térmico	-2,18 a -455,73 kgCO ₂ .eq/m ³
PIEKARSKI <i>et al.</i> (2017)	Painel de MDF	1m ³	A1-A3	Dados primários e Ecoinvent	-	CML 2002 e USEtox	Não	-	-	Mudanças no consumo de gás natural, da resina, eletricidade e serragem	Não	239,6 kgCO ₂ .eq/m ³
ECKELMAN e MONTAZERI (2018)	Verniz biológico	1m ² do lugar de aplicação do verniz	A1-A3	Dados primários e Ecoinvent	-	TRACI 2.1	Sim	-	Sim. Econômica	Mudança na composição do material	Durabilidade	-
FERRO <i>et al.</i> (2018)	Painel de OSB	1m ³	A1-A3	Dados primários	-	ReCiPe Midpoint	Não	-	-	Mudanças nos químicos utilizados	Não	127 kgCO ₂ .eq/m ³

Autores	Produto estudado	Unidade funcional (UF)	Estágios do ciclo de vida ¹	Inventário	Normas de ACV ²	Método AICV	Consideração carbono biogênico	Fim de vida	Alocação	Análise de sensibilidade	Aspectos de desempenho	Emissão de carbono
				e Ecoinvent								
HOSSAIN <i>et al.</i> (2018)	Chapa de particulos de madeira e cimento madeira	1 tonelada	A1-A3	Dados primários e Ecoinvent	-	IMPACT 2002+	Não	Aterramento	-	Diferentes cenarios, considerando a madeira como residuos e a cura por carbonatação acelerada	Desempenho estrutura	873 a 957 kgCO ₂ -eq/t
MAXINEAS <i>et al.</i> (2018)	Estruturas de madeira para telhado	A estrutura do telhado	A1-A5, B1, B2, C1-C3, D	Dados primários e Ecoinvent	EN 15804: 2012	ReCiPe, ILCD, IPCC 100a, CML 2002, USEtox	Sim	Incineração e reciclagem	-	Três diferentes casos	-	-376.8734 a - 487.7381 kgCO ₂ -eq/estrutura
Nakano <i>et al.</i> (2018)	Madeira rolada	1m ³ de madeira	A1-A3	Dados primários e Ecoinvent	-	IDEA	Sim	-	Sim. Massa e econômica	Com base na alocação e contabilização do carbono estocado	-	-666 a 23 kgCO ₂ -eq/m ³
HEAD <i>et al.</i> (2020)	Diferentes produtos (OSB, laminados, lenhas, etc.)	1m ³ de madeira	A1-A4, C1-C4, D		EN 15804: 2012	ACVd	Sim.	Incineração, reciclagem e aterramento	Não	Sim. custo de carbono do ecossistema		-6000 a 4000 kgCO ₂ -eq/m ³

¹ Os estágios do ciclo de vida foram organizados conforme e EN 15804:2012.

² Normas além da ISO 14040:2006 e 14044:2006.

CAPÍTULO 3 – AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) APLICADA AO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Neste capítulo será apresentado como a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) aplicada a qualquer produto ou processo é dividida e organizada, primeiramente com base nas normas NBR 14040 (ABNT, 2009) e NBR 14044 (ABNT, 2009). Posteriormente, será mostrado como a ACV dirigida especificamente para o setor da construção civil é organizada, conforme as normas europeias EN 15978 (CEN, 2011) e EN 15804 (CEN, 2012) serão apresentados itens importantes a serem considerados quando biomateriais são avaliados.

Conforme a revisão da literatura apresentada no Capítulo 2 foi possível definir como a ACV deve ser realizada, conforme as normas citadas, e verificou-se uma tendência dos estudos seguirem o método proposto por LEVASSEUR *et al.* (2010), ou outras metodologias que contabilizem créditos relacionados ao carbono biogênico para a avaliação da Emissão de Carbono (EC), que é mais adequado para o estudo de biomateriais.

1. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A ACV pode ser definida como uma metodologia de avaliação das entradas e das saídas mais importantes relacionadas aos potenciais impactos ambientais causados por um sistema de produção do produto durante todo seu ciclo de vida, que vai desde a extração da matéria prima, passando pelas etapas de transporte, fabricação, montagem, uso e destinação final. A ACV pode subsidiar a identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental de produtos, o nível de informação dos tomadores de decisões nos diversos setores do país, a seleção de indicadores de desempenho ambiental relevantes, o marketing, a rotulagem ambiental e a elaboração de uma declaração ambiental de produto – DAP (ABNT NBR ISO 14044, 2009).

De acordo com NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) a ACV é dividida em quatro fases: definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação (Figura 8).

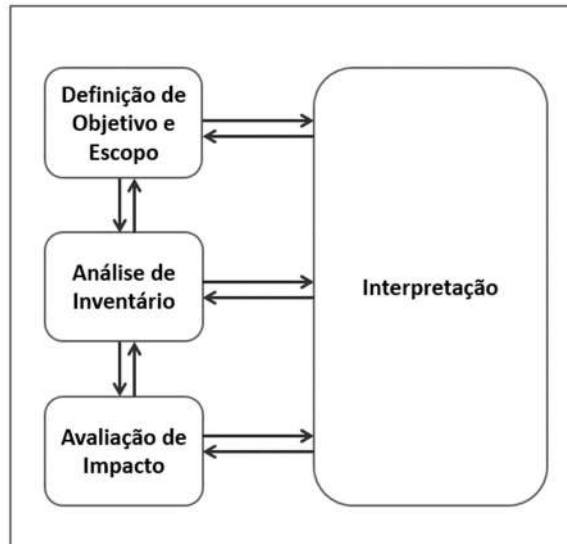


Figura 8 - Estrutura e etapas da Avaliação do Ciclo de Vida. NBR 14040 (ABNT, 2009).

2.1 Definição do Objetivo, do Escopo e Unidade Funcional

De acordo com FRENETTE *et al.* (2010), o objetivo e escopo devem englobar o sistema do produto que será estudado, as funções do sistema de produto, a unidade funcional, os limites e as fronteiras do sistema, os procedimentos de alocação, as categorias de impacto selecionadas, juntamente com a metodologia de avaliação de impacto, seguidas pelas interpretações a serem realizadas, os dados necessários e as suposições feitas para o estudo.

Segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) a unidade funcional (UF) pode ser definida como a unidade de referência em um estudo de ACV. O principal objetivo da UF é proporcionar referências para relacionar as entradas e saídas do sistema adotado e possibilitar a comparação entre diferentes estudos.

2.2 Análise de Inventário

Nesta fase ocorre a coleta de dados e a escolha dos procedimentos de cálculo utilizados para contabilizar as entradas (*inputs*) e as saídas (*outputs*) do sistema. Ela consiste em um processo iterativo, em que podem ser acrescentados novos requisitos ou limitações a partir do momento em que se vai conhecendo de forma mais aprofundada o sistema estudado. Em alguns casos, devido às condições do sistema, são realizadas revisões do objetivo e escopo do estudo. Na coleta de dados devem ser contabilizadas as entradas de energia, matéria – prima e entradas auxiliares importantes; as saídas em forma de

produtos, resíduos sólidos, efluentes líquidos, emissões atmosféricas e outros aspectos ambientais considerados importantes (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

Como forma de facilitar essa etapa foram desenvolvidas ao longo dos anos ferramentas computacionais, entre eles os mais utilizados: SimaPro, Gabi, Umberto, OpenLCA e banco de dados específicos, como: o Ecoinvent, o Gabi, o *European Reference Life-Cycle Database* (ELCD), entre outros. O banco de dados consiste em um conjunto de dados ambientais de processos e produtos, que foram coletados segundo uma metodologia própria (SILVA; MASONI, 2016). Como o Brasil não possui um banco de dados de ciclo de vida consolidado, principalmente para o setor da construção civil, nesta tese foi utilizado o banco de dados do Ecoinvent v. 3.3, com as adaptações necessárias à realidade brasileira e dentro das limitações desta pesquisa. Foram utilizados os processos com modelo de sistema do tipo “*Cut-off*” para se manter a coerência entre todos os dados de entrada, ser normalmente o modelo recomendado pelos PCRs e mais frequentemente encontrado na literatura.

2.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

A etapa de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) tem como objetivo estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, com base nos resultados do inventário. Em geral, esse processo envolve associar dados de inventário com as categorias de impacto ambiental selecionadas, tentando entender tais impactos (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

Existem diferentes metodologias de AICV, podendo ser citados, alguns mais antigos: Ecoindicator 99, EDIP 97/2003, CML-IA, TRACI, EPS 2000, IMPACT 2002+; e outros mais novos: ReCiPe 2008 e o IMPACT World+. As categorias de impacto utilizadas nessas metodologias, como mudanças climáticas, acidificação, eutrofização, etc; podem ser agrupadas com base no nível de avaliação utilizado, sendo eles *midpoint*, *endpoint* ou metodologias híbridas. Na metodologia de avaliação *midpoint* todas as categorias de impacto ambiental baseiam-se em avaliações de ponto médio ou impacto potencial direto das emissões, como por exemplo: EC, depleção da camada de ozônio, acidificação, depleção abiótica de combustíveis fósseis, enquanto que na abordagem *endpoint* as categorias de impacto se enquadram em danos na saúde humana, ecossistema e recursos. Na abordagem híbrida, as categorias de impacto são combinadas em *midpoint* e *endpoint*. Exemplos de metodologias *midpoint* são: CML-IA, EDIP

97/2003 e TRACI. Métodos *endpoint*: Ecoindicator 99 e EPS 2000. Metodologias híbridas: Impact 2002+ e ReCiPe 2008 (BUENO *et al.*, 2016).

Outro item importante referente aos métodos de AICV, está na abrangência de aplicação das categorias de impactos avaliadas, chamada de validade regional no ILCD Handbook (EC-JR, 2010). Alguns dos métodos como o ReCiPe 2008 e o Eco indicator 99 são direcionadas para o contexto europeu, enquanto outras como a TRACI está voltada para o contexto dos Estados Unidos. Já a metodologia CML-IA possui uma validade mais global, para a maioria das suas categorias de impacto, excetuando a formação de foto-oxidantes e acidificação, sendo assim uma das principais justificativas para sua grande utilização nos estudos de ACV.

Cada método de AICV possui basicamente seus próprios métodos de caracterização para traduzir os dados do inventário para diferentes categorias de impacto ambiental, sendo que algumas como EC e depleção da camada de ozônio, são comuns em quase todos os métodos. Os fatores de caracterização utilizados em cada um podem resultar em avaliações finais divergentes entre si (para uma mesma categoria de impacto ambiental), como apresentam BUENO *et al.* (2016). Cabe então, ao praticante deixar claro qual o método de AICV foi utilizada e se esse está adequado ao objetivo, escopo e contexto de seu estudo, com as devidas justificativas.

2.4 Interpretação

Essa etapa tem como objetivo estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, com base nos resultados do inventário. Em geral, esse processo envolve associar dados de inventário com as categorias de impacto ambiental selecionadas, tentando entender tais impactos (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

É muito importante que as conclusões estejam amarradas no objetivo inicial e no escopo estudado, ressaltando as limitações do estudo e quais as incertezas existentes. Ao final, com base nos resultados obtidos e interpretados é interessante que o estudo mostre as limitações do estudo, etapas críticas e a apresentação de recomendações a fim de diminuir os impactos ambientais do produto ou processo avaliado.

2. ACV Aplicada à Construção Civil

Estudos no âmbito da construção civil, seja para materiais, sistemas construtivos, ou edificações, tem se direcionado para o emprego da ACV como forma de avaliar seus potenciais impactos ambientais. Essa tem sido considerada internacionalmente como a ferramenta mais confiável para avaliação dos impactos ambientais de produtos ou processos (CABEZA *et al.*, 2014; SOARES *et al.*, 2017).

A ACV aplicada ao setor da construção civil tem sido uma área de pesquisa extensivamente estudada na última década devido aos grandes impactos ambientais desse setor. No entanto, a tomada de decisão baseada na ACV está limitada principalmente à pesquisa e ainda não é amplamente adotada por profissionais de construção. Isso ocorre devido a alguns fatores chave, entre eles: a falta de integração da ACV com as ferramentas de construção que normalmente são utilizadas, a falta de experiência e até conhecimento dos profissionais sobre a ACV, e também o fato dessa metodologia ainda não ser uma preocupação das partes interessadas (ANAND; AMOR, 2017).

Outro problema comum nos estudos de ACV aplicada às edificações é a falta de padronização entre eles (CABEZA *et al.*, 2014; CHAU *et al.*, 2015; BUYLE *et al.*, 2013). Bueno *et al.* (2016) destacam diversos fatores que contribuem para essa dispersão nos resultados, entre eles: os limites do sistema considerado, o uso de diferentes medidas de energia e dados de entrada, metodologias de análises de inventário e de avaliação de impactos, fronteiras temporais, geográficas e tecnológicas dos dados, entre outros.

Como uma tentativa de sanar essa dificuldade, foi publicada em 2011 e 2012 e posteriormente revisada em 2013, pela Comissão Europeia de Normatização (CEN), as normas EN 15978 (CEN, 2011) e EN 15804 (CEN, 2012), respectivamente, que fazem parte de um conjunto de normas para a avaliação da sustentabilidade dos materiais de construção e do setor de edificações, com o intuito que os estudos e trabalhos nesta temática sejam elaborados com base em um referencial comum, permitindo, que diferentes estudos, realizados dentro de um mesmo contexto geográfico e temporal, sejam passíveis de serem comparados. Ambas fazem uso da abordagem da ACV para a avaliação dos impactos ambientais das edificações. A primeira norma traz os procedimentos de cálculo dos impactos ambientais para o setor da construção e a

segunda apresenta a estrutura e diretrizes ambientais para os produtos e serviços de construção. Percebeu-se na literatura internacional pesquisada, que essas normas estão sendo cada vez mais empregadas nos estudos de ACV para o setor da construção civil, e, desta forma, optou-se por segui-las nesta tese. No entanto, mesmo com essas normas ainda falta uma abordagem metodológica mais sólida, de forma padronizada, para que os resultados de diferentes estudos de ACV de edificações e seus produtos possam ser comparados.

Seguindo as diretrizes EN 15804 (CEN, 2012), as etapas do ciclo de vida de um material, componente, sistema ou edificação podem ser divididas conforme é apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Etapas do ciclo de vida de uma edificação consideradas pelas normas EN 15978 (CEN, 2011) e EN 15804 (CEN, 2012).

Etapas do ciclo de vida	Produto			Construção		Uso							Fim de vida				Benefícios e cargas além das fronteiras	
	Módulos	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3		C4
		Extração Matérias primas	Transporte das matérias primas	Manufatura	Transporte até o canteiro de obras	Construção	Uso	Manutenção	Reparo	Substituição	Reforma	Uso de energia operacional	Uso de água operacional	Demolição/Desconstrução	Transporte até a destinação final	Processamento dos resíduos	Disposição final	Reuso/Recuperação/Reciclagem
Berço ao portão	M	M	M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Berço ao portão com opções	M	M	M	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Berço ao túmulo	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	O

M – Mandatório. O – Optativo.

Devido à complexidade de um estudo de ACV, resultado dos inúmeros dados de entrada e saída do produto ou processo analisado, ainda mais quando se pensa em uma edificação, que possui diversas etapas e diferentes agentes envolvidos (fornecedores de materiais, construtores, usuários, entre outros), normalmente o processo é dividido em algumas etapas e essas que são subdivididas em módulos (como apresentado pela EN 15804 (CEN, 2012), a fim de possibilitar a realização do estudo. A referida norma possibilita três alternativas de escopo, sendo elas: (1) do berço ao portão, (2) do berço ao portão com opções e do (3) berço ao túmulo, sendo que a primeira é mais simples e a terceira a mais complexa de ser realizada. Ainda segundo a essa norma, os três primeiros módulos (A1, A2, A3) são mandatórios (obrigatórios) para qualquer uma das alternativas.

Neste sentido, a divisão apresentada no Quadro 2 será adotada para todos os estudos de caso realizados nesta tese, sendo utilizado a classificação número (2) “do berço ao portão com opções”. Serão avaliadas as seguintes etapas: Produto (A1-A3), transporte (A4), construção (A5), Reparo (B3) e/ou Substituição (B4), Uso (B6), Fim de vida (C1-C4) e em alguns casos os Benefícios (D).

3. Avaliação do Carbono Biogênico

Para a quantificação do carbono biogênico dos materiais é necessário quantificar o teor de carbono elementar, em percentual, presente na massa seca dos biomateriais utilizados. De posse do teor de carbono (C), é calculado o carbono biogênico (Cb) com base na massa seca do material vegetal e estequiometria (massas molares), conforme equação (3.1).

$$Cb = m_s \times C \times \frac{M_{CO_2}}{M_C} \quad (3.1)$$

Cb – carbono biogênico.

m_s – massa do material (seca).

C – teor de carbono na massa seca.

M_{CO_2} – massa molar do dióxido de carbono (CO_2) - 44.

M_C – massa molar do carbono (C) - 12.

Como a maioria dos métodos de AICV, baseados na metodologia do IPCC 100 anos (2013), consideram o carbono biogênico como nulo, na categoria de EC optou-se por se utilizar nesta tese o método proposto por LEVASSEUR *et al.* (2010), a ACVd, que possui fatores de caracterização dinâmica para os GEE, incluindo o carbono biogênico. Sempre que possível os resultados pela ACVd serão comparados com resultados utilizando a metodologia do IPCC 100 anos (2013), para ver como a consideração do carbono biogênico pode influenciar nos resultados finais.

Como foi verificado na literatura, a contabilização do carbono biogênico sofre influência do fim de vida que será dado ao produto, no entanto, como o bioconcreto é um material inerte, ele pode ter basicamente dois tipos de fim de vida: (1) reciclagem para a produção de um novo bioconcreto; (2) reciclagem para aproveitamento do material para outros fim, por exemplo, uso como agregados; (3) aterramento em aterro de resíduos inertes. Para todos esses casos o carbono biogênico é considerado como armazenado indefinidamente.

4. Avaliação da Carbonatação

Para a avaliação de materiais cimentícios, como é o caso do concreto e argamassa, é importante que seja contabilizado o CO₂ absorvido no processo de carbonatação, em que o óxido de cálcio (CaO) presente na matriz (cimento e cal) reage com o CO₂ atmosférico para formar carbonato de cálcio (CaCO₃) (COLLINS, 2010).

Para isso, primeiramente é preciso quantificar a profundidade de carbonatação que pode ser obtido pela Primeira Lei de Fick de Difusão de Difusão Monodirecional (PITTAU *et al.*, 2018), apresentado na Equação 3.2, retirada de BOWICK (2018). Posteriormente é possível estimar o CO₂ absorvido sabendo o consumo de cimento e cal, o teor de CaO, o percentual desse CaO que pode ser convertido em CaCO₃ e a relação das massas molares de CO₂ e CaO, conforme é apresentado na Equação 3.3, apresentada por COLLINS (2010). Assumiu que um total de 75% do CaO é convertido em carbonato de cálcio segundo Lagerblad (2005). A relação entre as massas molares de CO₂/CaO é de 0,79.

$$x(t) = s \times b \times k \times \sqrt{t} \quad (3.2)$$

x(t) - profundidade da argamassa carbonatada no tempo t (mm).

s - fator de correção com base no tratamento da superfície, que varia de 0,7 a 1,0.

b - fator de correção com base na quantidade de adições minerais utilizadas, que varia de 1,0 a 1,3.

k - coeficiente de carbonatação (mm/ano^{0,5}), com base na resistência do concreto e tipo de exposição, que varia de 0,5 a 15.

t - tempo decorrido (anos).

$$m_{CO_2} = \left(\frac{x(t)}{1000} \right) \times A \times (c_{cim} \times CaO_{cim} + c_{cal} \times CaO_{cal}) \times r \times \left(\frac{MM_{CO_2}}{MM_{CaO}} \right) \quad (3.3)$$

m_{CO₂} - massa de CO₂ sequestrada pela carbonatação em um tempo t (kg).

x(t) - profundidade da argamassa carbonatada no tempo t (mm).

A - área superficial exposta (m²).

c_{cim} - quantidade de cimento Portland na argamassa (kg/m³).

CaO_{cim} - teor de CaO na composição do cimento Portland.

c_{cal} - quantidade de cal hidratada na argamassa (kg/m³).

CaO_{cal} - teor de CaO na composição do cimento Portland;

r - proporção de CaO que é convertida em carbonato de cálcio (CaCO₃).

MM_{CO₂} - massa molar do CO₂ (g/mol).

MM_{CaO} - massa molar do CaO (g/mol).

5. ACV Dinâmica (ACVd)

A ACV dinâmica (ACVd) proposta por LEVASSEUR *et al.* (2010) utiliza 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. Nas equações 3.4 a 3.7 são apresentadas as formulações utilizadas no modelo.

$$DCF_i(t)_{cum} = AGWP_i(t) = \int_0^t a_i[C_i(t)]dt \quad (3.4)$$

$$DCF_i(t)_{inst} = \int_{t-1}^1 a_i[C_i(t)]dt \quad (3.5)$$

$$GWI_{inst}(t) = \sum_i GHG_i(t) = \sum_i \sum_{j=0}^t [g_i]_{jx} [DCF_i]_{t-j} \quad (3.6)$$

$$GWI_{cum}(t) = \sum_{j=0}^t GWI_{inst}(j) \quad (3.7)$$

Onde:

$DCF(t)_{cum}$ – fator dinâmico de caracterização acumulado.

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

$AGWP(t)$ – é o potencial de aquecimento global absoluto para cada GEE continuamente ao longo do tempo.

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

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

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

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

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

Para a avaliação de biomateriais, em que a quantificação do CO₂ biogênico, ao longo do tempo, é um aspecto crítico, como mostra PEÑALOZA *et al.* (2016), a ACVd tende a ser um método mais preciso e completo para avaliação desses materiais e por isto foi empregado no presente estudo.

Para os estudos de casos realizados foram avaliados quatro tipos de GEE, sendo eles: o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e monóxido de carbono (CO). Na ACVd o cálculo é realizado conforme a equação 3.8.

$$GWI_{inst}(t) = \sum_{i=0}^t [g_{CO_2}(t_i) \cdot DCF_{inst,CO_2}(t - t_i)] + \sum_{i=0}^t [g_{CH_4}(t_i) \cdot DCF_{inst,CH_4}(t - t_i)] + \sum_{i=0}^t [g_{N_2O}(t_i) \cdot DCF_{inst,N_2O}(t - t_i)] + \sum_{i=0}^t [g_{CO}(t_i) \cdot DCF_{inst,CO}(t - t_i)] \quad (3.8)$$

A modelagem foi realizada no software SimaPro v. 9.0.0.29 e na planilha eletrônica desenvolvida por LEVASSEUR *et al.* (2010), denominada de *Dynamic LCA calculator for Global Warming*.

6. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Além do método da ACVd para a avaliação da categoria de EC será utilizado o método de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) CML-IA Baseline, que é do tipo *midpoint*, sendo considerados somente as sete categorias de impactos ambientais apresentados na EN 15804 (CEN, 2012), apresentadas no Quadro 3. Os resultados de EC calculados pela ACVd e pelo método CML-IA serão comparados.

Quadro 3– Categorias de impactos ambientais segundo a EN 15804 (2012) que serão consideradas nesta pesquisa.

Categorias de impacto ambiental	Fator de caracterização	Sigla	Unidade
Emissão de Carbono (Aquecimento Global)	Potencial de Aquecimento global para 100 anos ¹	EC	kgCO ₂ .eq
Depleção da camada de ozônio	Potencial de depleção de ozônio	ODP	kgCFC-eq
Acidificação do solo e da água	Potencial de acidificação	AP	kgSO ₂ .eq
Eutrofização	Potencial de eutrofização	EP	kgPO ₄ ⁻³ .eq
Formação de ozônio fotooxidante	Potencial de criação de ozônio fotoquímico	POCP	kgC ₂ H ₄ .eq
Depleção abiótica dos recursos -elementos	Potencial de elementos, reservas finais	ADP-e	kgSb-eq
Depleção abiótica dos recursos -combustíveis fósseis	Potencial de depleção de combustíveis fósseis	ADP-ff	MJ

¹Será também utilizado para o método de LEVASSEUR *et al.* (2010). É possível converter os resultados desse método para essa categoria.

É importante ressaltar que para esse método as categorias de AP e POCP apresentam escopo de aplicação direcionado para o contexto europeu (*Joint Research Centre*, 2010). No entanto, eles foram considerados por ter sido utilizada a EN 15804 (CEN, 2012).

7. Referências

- Almeida, J. A. S., Santos, M. I. V., Tadeu, A. J. B., Simões, N. A. V., Rama, J. P. F. Development of innovative sustainable walls composed of byproducts of rice. In: Lahr, F. A., Savastano Junior, H., Fiorelli, J. (Org.). Non-conventional Building Materials based on agro-industrial wastes. Tiliform, 1 ed. Bauru, São Paulo, Brazil, 2015.
- Anand, C. K., Amor, B., 2017. Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renew. Sus. Energy Rev.* 67, (1), 408-416.
- Andreola, V.M.; Gloria, M. Y. R.; Toledo Filho, R. D. Behaviour Under Bending Loads Of Workable Bamboo Bio-Concrete. In: 17th International Conference - NOCMAT 2017 - Non-conventional Materials and Tecnhologie, 2017, Mérida. Behaviour Under Bending Loads Of Workable Bamboo Bio-Concrete, 2017. v. 1. p. 66-78.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. NBR ISO 14044: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005. NBR 15220: Desempenho Térmico de Edificações. Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, 2006. NBR 12721. Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, 2013. NBR 15575. Edificações Habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- Balanço Energético Nacional (BEN). Relatório Síntese ano base 2017. Brasília-DF, 2018. Borges, P. H. R; Lourenco, T, M. F; Foureaux, A. F. S.; Pacheco, L. S. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). *Ambient. constr.* 2014, vol.14, n.2 pp.153-168.
- Bribián, I. Z., Capilla, A. V., Usón, A., 2011. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Build. Env.* 46, 1133-1140.

Broeren, M. L. M, Dellaert, S. N. C., Cok, B., Patel, M. K., Worrell, E., Shen, L., 2017. Life cycle assessment of sisal fibre: Exploring how local practices can influence environmental performance. *J. Clean. Prod.* 149, 818-827.

Browick, 2018. Brock Commons Tallwood House, University of British Columbia. As Environmental Building Declaration According to EN 15978 Standard.

Bueno, C. Hauschild, M. Z., Rossignolo, J. A., Aldo Roberto Ometto, A. R., Mendes, N. C., 2016. Sensitivity analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment methods: a case study on building materials. *J. Clean. Prod.* 112 (20), 2208-2220.

Buyle, M., Braet, J., Audenaert, A., 2013. Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renew. Sus. Energy Rev.* 29, 379-388.

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 : A review. *Renew. Sus. Energy Rev.* 29, 394-416.

Caixa Econômica Federal. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. Tabela de Custos de Composições Analítica. 2018. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 18 abr. 2018.

Caldas et al. a, 2017. Caldas, L. R., da Gloria., M. Y., Santos, D. J., Andreola, V., Pepe, M., Toledo Filho, R. D., 2017. Carbon footprint of bamboo particles, rice husk and wood shavings-cement composites. 2nd International Conference on Bio-based Building Materials & 1st Conference on ECOlogical valorisation of GRANular and FIBrous materials. June 21th - 23th 2017 Clermont-Ferrand, France.

Caldas, L. R., Pittau, F., Andreola, V., Habert, G., Saraiva, A. Toledo Filho, R. D., 2019. Dynamic life cycle carbon assessment of three bamboo bio-concretes in Brazil. 3rd International Conference on Bio-based Building Materials & 1st Conference on ECOlogical valorisation of GRANular and FIBrous materials. June 21th - 23th 2019 Clermont-Ferrand, France.

Caldas, L. R., Sposto, R. M, 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. 91108, out./dez. 2017.

Caldas, L. R.; Lira, J. S. De M. M.; Sposto, R. M. 2017. Avaliação do ciclo de vida de habitações de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e painéis pré-moldados de concreto considerando diferentes zonas bioclimáticas. *LALCA - Revista Latino-amer. em Aval. do Ciclo de Vida, Brasília*, v. 1, n. 1, p. 138-167.

Caldas, L. R.; Toledo Filho, R. D. Avaliação do Ciclo de Vida de materiais cimentícios utilizados no Brasil: estudo para argamassas, graute e bloco de concreto. *R. Latino-amer. em Aval. do Ciclo de Vida, Brasília*, v. 2, n. 2, p. 34-61, jul./dez. 2018.

Casagrande, B. G., Alvarez, C. E. de., 2013. Preparação de arquivos climáticos futuros para avaliação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edificações. *Ambiente Construído, Porto Alegre*, v. 13, n. 4, p. 173-187, jul./set. 2013.

Chan, A. L. S., 2011. Developing Future Hourly Weather Files For Studying the Impact of Climate Change on Building Energy Performance in Hong Kong. *Energy and Buildings*, v. 43, p. 2860- 2868.

Chau, C. K., Leung, T. M., Ng, W. Y., 2015. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. *App. Energy*. 143, 395-413.

Chen, C, Habert, G., Bouzidi Y., Jullien A., Ventura A., 2010. LCA allocation procedure used as an initiative method for waste recycling: an application to mineral additions in concrete. *Resour Conserv Recycl*. 54 (12), 31–40.

Cheshire, David. 2016. *Building Revolutions: Applying the Circular Economy to the Built Environment*. Newcastle Upon Tyne: RIBA Publishing.

Collins, F, 2010. Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 15, n. 6, p. 549–556.

Condeixa, K., Haddad, A., Boer, D., 2014. Life cycle impact assessment of masonry system as inner walls: a case study in Brazil. *Constr. Build. Mater*. 70, 141–147.

Condeixa, K., Haddad, A., Boer, D., 2017. Material flow analysis of the residential building stock at the city of Rio de Janeiro. *J.Clean.Prod*. 149, 1249-1267.

Dallagnol, F. S., 2012. Estimativa de teores de carbono em seis espécies de bambu por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR). *Dissertação de Mestrado, UFPR, Curitiba, PR, Brasil*.

De Wilde, P., Tian, W., 2009. Preliminary Application of a Methodology For Risk Assessment of Thermal Failures in Buildings Subject to Climate Change. *Building Simulation*, p. 2077-2084.

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*. 145, 294 – 302.

Drumond, P. M., Wiedman, G (Org.), 2017. *Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia*. 1. ed. - Rio de Janeiro : ICH, 2017. 655 p.

EC. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context*. First Edition November 2011. EUR 24571 EN. EC – European Commission. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2011.

Escamilla, E. Z., Habert, G., 2014. Environmental impacts of bamboo-based construction materials representing global production diversity. *J. Cleaner Prod*. 69, 117-127.

Escamilla, et al., 2018. Industrial or traditional bamboo construction? Comparative Life Cycle (LCA) of Bamboo-Based Buildings. *Sustainability*, 2018, vol. 10, p. 1-14.

European Committee for Standardization. EN 15804: sustainability of construction works: environmental product declarations: core rules for the product category of construction products. Brussels, 2012.

_____. EN 15978: sustainability of construction works: assessment of environmental performance of buildings – calculation method. Brussels, 2011.

_____. EN 16485:2014 Round and sawn timber – Environmental Product Declarations – Product category rules for wood and wood-based products for use in construction.

_____. EN 16757:2017 Sustainability of construction works– Environmental product declarations – Product Category Rules for concrete and concrete elements.

_____. EN 16783:2017 Thermal insulation products – Product category rules (PCR) for factory made and in-situ formed products for preparing environmental product declarations.

Frenette, C. D., Bulle, C., Beauregard, R., Salenikovich, A., Derome, D. Using life cycle assessment to derive an environmental index for light-frame wood wall assemblies. *Building and Environment*, v. 45. p. 2111-2122. 2010.

Garcia, R., Freire, F., 2014. Carbon footprint of particleboard: a comparison between ISO/TS 14067, GHG Protocol, PAS 2050 and Climate Declaration. *J. Clean. Prod.* 66, 199 – 209.

Guarnetti, R. L., 2013. Cogeração de eletricidade utilizando bambu no Brasil: Aspectos técnicos econômicos e ambientais. Tese de Doutorado, FEA-IEE-IF/USP, São Paulo, SP, Brasil.

International Reference Centre for the Life Cycle of Products, Processes and Services (CIRAG). 2016. Disponível em: <<http://www.ciraig.org/en/dynco2.php>>. Acesso em 26. Mar.2018.

Invidiata, A., Ghisi, E., 2016. Life-cycle energy and cost analyses of window shading used to improve the thermal performance of houses. *J. Clean. Prod.* 133, 1371–1383.

Jentsch, M. F., Bahaj, A. S., James, P. A. B., 2008. Climate Change Future Proofing of Buildings: generation and assessment of building simulation weather files. *Energy and Buildings*, v. 40, n. 12, p. 2148-2168, 2008.

Joint Research Centre, 2010. Analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle assessment: background document. (ILCD Handbook). 2010.

Kamakaté, F., Schipper, L., 2009. Trends in Truck Freight Energy Use and Carbon Emissions in Selected OECD Countries from 1973 to 2005. *Energy Policy*. 37 (10), 3743-3751.

La Rovere, E. L. et al. Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Brasil até 2050. 2016.

Laboratório de Eficiência Energética de Edificações – LabEEE, 2019. Arquivos Climáticos. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/>> Acesso em 10. Jan. 2019.

Lagerblad, B. Carbon dioxide uptake during concrete life cycle: State of the art. Oslo:

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.* 44, 3169-3174.

Malmqvist, Tove, Marie Nehasilova, Alice Moncaster, Harpa Birgisdottir, Freja Rasmussen, Aoife Houlihan Wiberg, and José Potting. 2018. “Design and Construction Strategies for Reducing Embodied Impacts from Buildings – Case Study Analysis.” *Energy and Buildings* 166: 35–47.

Manzardo et al., 2019. Life Cycle Assessment Framework to Support the Design of Biobased Rigid Polyurethane Foams. *ACS Omega* 2019, 4, 14114–14123.

Merciai, S., et al., Inventory of country specific electricity in LCA – Brazil. Inventory report. V2. 2-0. LCA consultants, 2011.

Ministério da Ciência e Tecnologia (MCTI). Disponível em : <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html>> Acesso em: 07 de ago. 2017. Brasil, 2017.

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 de Minas e Energia (MME). Balanço Energético Nacional. Ano base 2017. Empresa de Pesquisa Energética, 2018.

Mognon, F., 2015. Avaliação Comportamental do Crescimento, Biomassa e Estoque de Carbono em Espécies de Bambu. Tese de Doutorado, UFPR, Curitiba, PR, Brasil.

Netto, L. G., 2009. Avaliação da carga e custos ambientais em uma plantação comercial de bambu: estudo de alternativas de produto final e substituição de recursos. Dissertação de Mestrado, UNIP, São Paulo, SP, Brasil.

Nordic Innovation Centre.

PBE Edifica. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/conhecendo-pbe-edifica>> Acesso em: 10 dez. 2019.

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.* 129, 117-129.

Rock, M. et al., 2020. Embodied GHG emissions of buildings -The hidden challenge for effective climate change mitigation *Applied Energy*, 258 (2020), pp. 114107.

Rubio-Bellido, C., Pérez-Fargallo, A., Pulido-Arcas, J. A., 2016. Optimization of annual energy demand in office buildings under the influence of climate change in Chile Energy, 114 (2016), pp. 569-585.

Saade, M. R. M., Silva, M. G., Gomes, V., 2015. Appropriateness of environmental impact distribution methods to model blast furnace slag recycling in cement making. Resour. Conserv. Recy. 99, 40-47.

Sánchez-García, D., Rubio-Bellido, C., Río, J. J. M., Pérez-Fargallo, A., 2019. Towards the quantification of energy demand and consumption through the adaptive comfort approach in mixed mode office buildings considering climate change. Ene. Buid.187, 173-185.

Santoro, J. F., Kripka, M., 2016. Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 35-49, abr./jun.

Santos, L. G. R., et. al. Simulação computacional termoenergética na arquitetura. Avaliação do desempenho térmico de uma edificação de ensino localizada em Brasília DF. Arqtextos, São Paulo, ano 17, n. 203.04, Vitruvius, abr. 2017

Scachetti, M. T., 2016. Avaliação Consequencial do Ciclo de Vida: discussão e aplicação comparativa com abordagem atribucional. Dissertação de Mestrado, UFSCAR, São Carlos, SP, Brasil.

Silva, D. A. L., Masoni, P., 2016. Análise crítica das principais políticas de gestão, manutenção e uso de banco de dados internacionais de inventários do ciclo de vida de produto. IBCT: Brasília, 2016.

SINAT, 2015. Painéis maciços pré-moldados de concreto armado para paredes da VIVER. DATec Nº 003-B. Ministério das Cidades, Brasil, 2015.

Soares, N., J. Bastos, J., Dias Pereira, L., Soares, A., Amaral, A. R., Asad, E., Rodrigues, E., Lamas, F. B., Monteiro, H., Lopes, M. A. R., Gaspar, A.R. 2017. A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment. Renew. Sus. Energy Rev. 77, 845-860.

Souza, D. M., Lafontaine, M., Charron-Doucet, F., Chappert, B., Kicak, K., Duarte, F., Lima, L., 2016. Comparative life cycle assessment of ceramic block, concrete block and cast-in-place reinforced concrete exterior walls. J. Clean. Prod. 137, 70 –82.

Sposto, R. M., Caldas, L. R., Nabut Neto, A. C., 2016. Energia incorporada e emissões de CO2 de fachadas de Light Steel Framing (LSF) no Brasil. Oculum Ensaios. Revista de Arquitetura e Urbanismo. 13 (1), 40-49.

Su, S., Li, X., YiminZhu, Y., Lin, B., 2017. Dynamic LCA framework for environmental impact assessment of buildings. Ener. Build. 149, 310-320.

The International EPD System. Site oficial. Disponível em: <<https://www.environdec.com/PCR/Detail/?Pcr=12883>> Acesso em 25 set. 2019.

Van der Lugt P.; Vogtländer J. The environmental impact of industrial bamboo products. Delft: INBAR International Network For Bamboo and Rattan, Technical University Delft; 2015.

Wang, H., Q. Chen, Q., 2014. Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States. *Energy Build*, 82 (2014), pp. 428-436.

Wang, X., Chen, D.; Ren, Z., 2010. Assessment of climate change impact on residential building heating and cooling energy requirement in Australia. *Building and Environment*, n. 45, p. 1663-1682, 2010.

Weidema, B. O., Ekvall, T. Guidelines for application of deepened and broadened LCA: consequential LCA. Chapter for CALCAS project, 2009. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/8be5/9252f6790328a6360d506df522de78bbce4c.pdf>> Acesso em 06 fev. 2019.

World Business Council for Sustainable Development (WBCS). Getting numbers right. 2018.

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia empregada nesta pesquisa, ou seja, como a Ferramenta de Análise Dinâmica para Avaliação da Emissão de Carbono em Edificações pelo Uso de Biomateriais (FADCE) foi desenvolvida.

1. Introdução

A primeira parte da pesquisa desenvolvida nesta tese se enquadra como *Design Science Research* (DSR) ou “Pesquisa da Ciência do Projeto”, tendo em vista que o objetivo principal foi propor uma ferramenta que poderá apoiar a resolução de um problema real, que no caso é a avaliação da EC, de uma forma mais robusta e rigorosa, de projeto de edificações com foco no uso de biomateriais.

Segundo DRESCH *et al.* (2015) o *Design Research* é normalmente empregado nas disciplinas de engenharia e gestão, cujo propósito científico é projetar e produzir sistemas que ainda não existem, como também modificar situações existentes para alcançar melhores resultados. O método *DSR* tem o foco no conhecimento que será utilizado para projetar as soluções necessárias (VAN AKEN, 2004). LACERDA *et al.* (2013) mostram alguns exemplos da aplicação do DSR para pesquisas na área de engenharia de produção, entre eles para resolver alguns problemas como planejamento e controle da produção, mensuração de custos e alinhamento estratégico.

LACERDA *et al.* (2013) mostram as seguintes etapas para a construção de uma lógica de problemas: (1) Conscientização (levantamento do problema inicial, prático ou teórico) (2) Revisão da Literatura e (3) Localização dos Artefatos.

O problema a ser solucionado na presente tese com o desenvolvimento da ferramenta se enquadra como um problema teórico e prático, já que parte de conceitos teóricos poderá ser empregado tanto para pesquisas como para avaliação de projetos reais, por exemplo, a nível de uma gestão pública e facilitando o processo de projeto de edificações de baixo carbono.

Artefatos podem ser divididos em: Constructos, Modelos, Métodos e Instanciações (MARCH; SMITH, 1995). A presente ferramenta produzida se enquadra mais como um método, que pode ser entendido como uma sequência de passos ou etapas que devem ser seguidos para que um resultado seja obtido (LACERDA *et al.*, 2013).

Na segunda etapa dessa pesquisa, de posse da ferramenta proposta ela foi testada utilizando um estudo de caso, sendo estudado o BBC, a fim de validá-la. Para isso foi utilizada a pesquisa bibliográfica para buscar entender essas limitações e como superá-las, utilizando como instrumentos Esquemas Conceituais.

O estudo de caso pode ser definido como uma forma de investigação de um determinado fenômeno, normalmente contemporâneo, considerando um contexto real, quando as fronteiras entre o fenômeno e o contexto em que ele se insere não estão claramente definidas. É um tipo de análise aprofundada, que pode ser de um ou mais objetos (chamados de casos), para que permita o seu amplo e detalhado conhecimento para que um problema seja estudado e entendido com dada profundidade dentro de um período de tempo limitado (GIL, 1996; MIGUEL, 2007).

Esse método é útil na exploração de novos processos ou produtos, novas descobertas, porque têm a importante função de gerar hipóteses e construir teorias (VENTURA, 2007). Para o caso do BBC, que é um material novo, o emprego desse método é válido e conseguirá avaliar os benefícios em termos de EC no ciclo de vida de edificações quando ele é utilizado em comparação aos sistemas construtivos utilizados no Brasil.

2. Desenvolvimento da Ferramenta

Com base na revisão da literatura a ferramenta foi desenvolvida com base nas normas de ACV ABNT NBR 14040: 2009 e ABNT NBR 14044:2009 e ACV aplicada ao setor da construção civil a EN 15978: 2011 e EN 15804:2012. Elas foram empregadas para saber as principais “regras” a ser utilizada na ferramenta como forma de gerar resultados alinhados aos requisitos delas e práticas do mercado.

Como a ferramenta tem foco na análise da EC no ciclo de vida de edificações foram buscados estudos de revisão da literatura publicados em Periódicos de referência, sendo selecionados os estudos de CABEZA *et al.* (2014), CHAU *et al.* (2015), ANAND e AMOR (2017), SAADE *et al.* (2020) e ROCK *et al.* (2020). Por ser uma ferramenta dinâmica, em termos dos dados utilizados na modelagem de ACV buscou-se levantar quais os aspectos dinâmicos no ciclo da edificação que deveriam ser considerados, com base principalmente no estudo de SU *et al.* (2017), MONCASTER *et al.* (2018) e BRETON *et al.* (2018).

A ferramenta também tem um maior interesse para o estudo de biomaterias de construção, dessa forma, foram utilizados com base em estudos voltados para esses materiais como

LEVAUSEUR *et al.* (2010), PAWELZIK *et al.* (2013), FOUQUET *et al.* (2015), PEÑALOZA *et al.* (2016), PITTAU *et al.* (2018).

A ferramenta tem um caráter escalonável e evolutivo em que pode ser avaliado um material, um sistema construtivo ou uma edificação, sendo que para cada um desses produtos são necessários dados específicos e adicionadas novas etapas ou outros aspectos dinâmicos. Na Figura 9 são apresentadas as etapas seguidas para a elaboração da ferramenta e posterior aplicação para o estudo de caso.



Figura 9 – Etapas seguidas na metodologia.

3. Referências

Anand, C. K., Amor, B., 2017. Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 67, January 2017, Pages 408-416

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. NBR ISO 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. CEN EN 15978: sustainability of construction works: assessment of environmental performance of buildings – calculation method. Brussels, 2011.

Breton, C., Blanchet, P., Amor, B., Beauregard, R., Wen-Shao Chan, W. S., 2018. Assessing the Climate Change Impacts of Biogenic Carbon in Buildings: A Critical Review of Two Main Dynamic Approaches. *Sustainability* 2018, 10, 2020; doi:10.3390/su10062020

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 : A review. *Renew. Sus. Energy Rev.* 29, 394-416.

Chau, C. K., Leung, T. M., Ng, W. Y., 2015. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. *App. Energy*. 143, 395-413.

Dresh, A., Lacerda, D. P., Miguel, P. A. C., 2015. *R. bras. Gest. Neg.*, São Paulo, v. 17, n. 56, p. 1116-1133, abr./jun. 2015

European Committee for Standardization. CEN EN 15804: sustainability of construction works: environmental product declarations: core rules for the product category of construction products. Brussels, 2012.

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.* 90, 51 – 59.

Gil, A. C, 1996. *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*. São Paulo: Atlas.

Lacerda, D. P., Dresch, A., Proenca, A., Antunes Junior, J.A. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. *Gest. Prod.* [online]. 2013, vol.20, n.4 [cited 2020-06-15], pp.741-761.

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.* 44, 3169-3174.

March, S. T.; Smith, G. F. Design and natural science research in Information Technology. *Decision Support Systems*, v. 15, p. 251-266, 1995.

Miguel, P. A. C., 2007. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. *Prod.* vol.17 no.1 São Paulo Jan./Apr. 2007.

Moncaster, A. M., Pomponi, F., Symons, K. E., Guthrie, P. M., 2018. Why method matters: Temporal, spatial and physical variations in LCA and their impact on choice of structural system

Pawelzik, P., Carus, M., Hotchkiss, J., Narayan, R., Selke, S., Wellisch, M., Weiss, M., Wicke, B., Patel, M. K., 2013. Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials – Reviewing methodologies and deriving recommendations. *Res. Cons. Recyc.*73, 211-228.

Peñaloza, D., Erlandsson, M., Falk, A., 2016. Exploring the climate impact effects of increases use of bio-based materials in buildings. *Constr. Build. Mater.* 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. Environ.* 129, 117-129.

Rock, M. et al., 2020. Embodied GHG emissions of buildings -The hidden challenge for effective climate change mitigation *Applied Energy*, 258 (2020), pp. 114107.

Saade, M. R., Guest, G., Amor, B., 2020. Comparative whole building LCAs: How far are our expectations from the documented evidence? *Building and Environment*. V. 167, January 2020, 106449.

Su, S., Li, X., YiminZhu, Y., Lin, B., 2017. Dynamic LCA framework for environmental impact assessment of buildings. *Ener. Build.* 149, 310-320.

Van Aken, J. E. Management Research Based on the Paradigm of the Design Sciences: The Quest for Field-Tested and Grounded Technological Rules. *Journal of Management Studies*, v. 41, n. 2, p. 219-246, 2004.

Ventura, M. M., 2005. O Estudo de Caso como Modalidade de Pesquisa. *Rev SOCERJ*. 2007;20(5):383-386

CAPÍTULO 5 - FERRAMENTA DE ANÁLISE DINÂMICA PARA AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE CARBONO EM EDIFICAÇÕES PELO USO DE BIOMATERIAIS

Neste capítulo a Ferramenta de Análise Dinâmica para Avaliação da Emissão de Carbono em Edificações (FADCE) pelo Uso de Biomateriais é apresentada e detalhada. Ao final, são apresentadas as limitações da FADCE.

1. Apresentação da Ferramenta

1.1. Organização geral

A FADCE foi pensada para ser modular e escalável, sendo que a avaliação da EC pode ser realizada pensando em um material, um elemento construtivo (fachada, piso, cobertura, estrutura, etc.) ou uma edificação completa, como é possível ver na Figura 10.

Os biomateriais avaliados na FADCE podem ser classificados em dois principais grupos: (1) biomateriais puros (exemplo: estrutura de madeira ou bambu); (2) biomateriais híbridos (exemplo: concreto de cânhamo, compósito com fibras naturais). Sendo que esses podem ser originados de materiais virgens ou resíduos.

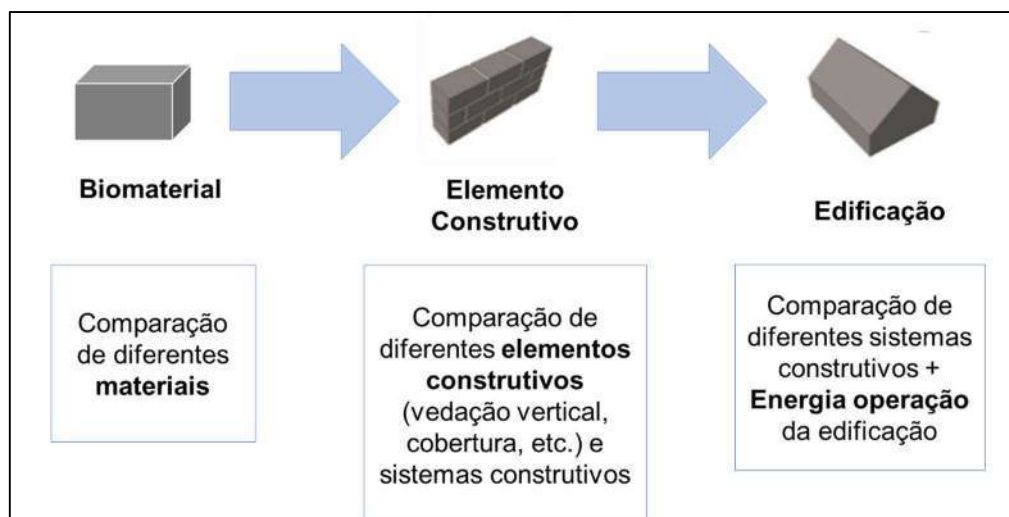


Figura 10 – Tipos de produtos que podem ser avaliados com a FADCE.

A próxima etapa é a organização de como as diferentes etapas do ciclo de vida de um produto de construção (material, elemento construtivo e edificação) pode ser entendida e

quais devem ser avaliadas, sendo utilizada a organização proposta pela EN 15804:2012, como é apresentado na Figura 11. A FADCE é considerada uma ferramenta de análise dinâmica por considerar o tempo na modelagem.

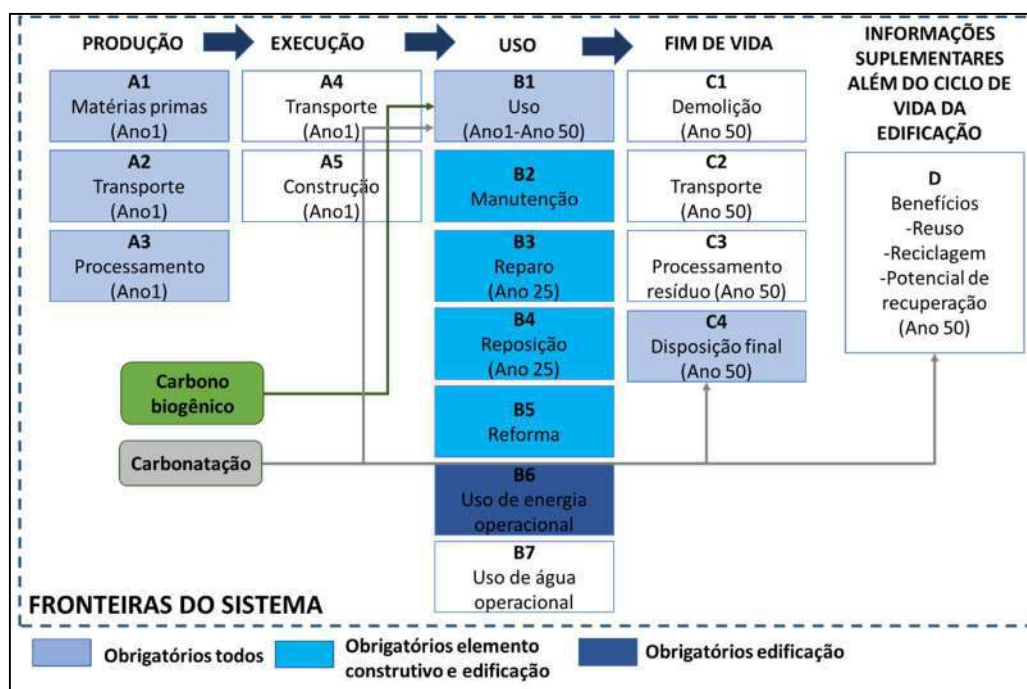


Figura 11 – Organização etapas do ciclo de vida de acordo com a EN 15804 (CEN, 2012) e produtos a serem avaliados.

Observa-se que a etapa de produção (módulos A1-A3) é obrigatória para todos os casos, de acordo com a própria EN 15804:2012. Foi incluído também como obrigatória as etapas de uso e o tipo de fim de vida, tendo em vista que para o caso de biomateriais e para uma análise dinâmica exerce grande influência na contabilização do carbono biogênico, como já foi detalhado anteriormente (LEVASEUR *et al.*, 2010; PAWELZIK *et al.*, 2013).

Para o elemento construtivo e edificação é muito importante que pelo menos uma das etapas relacionadas à manutenção, reparo, reposição ou reforma (módulos B2 a B5) seja contabilizada pois tem influência direta com a vida útil do elemento construtivo. E mais uma vez o fim de vida tem papel importante, pois é preciso saber qual a destinação final do material que será substituído.

Finalmente, especificamente para a edificação, o uso de energia operacional (módulo B6) é o mais importante, ainda mais quando o interesse é na avaliação da EC e mudanças climáticas (ROCK *et al.*, 2020).

Tendo em vista que a economia circular tem ganhado espaço no setor da construção civil e, conseqüentemente tem sido pensado em produtos circulares, sendo que muito deles empregam resíduos de outros processos, como é o caso do BBC, recomenda-se que a

etapa de Benefícios (D) quando esses resíduos são reaproveitados sejam contabilizados, tanto em termos dos impactos evitados para a destinação desses resíduos quanto o impacto evitado relacionado à não extração de recursos naturais virgens.

Dois processos especialmente importantes para a avaliação da EC no ciclo de vida de produtos de construção é o CO₂ absorvido pela fotossíntese (para o caso de biomateriais puros ou híbridos) e CO₂ absorvido pelo processo de carbonatação (para o caso biomateriais híbridos - cimentícios). Em uma análise dinâmica em um intervalo de tempo, esses processos ocorrem na etapa de uso (módulo B1) ou disposição final (C4), que serão detalhados a seguir. Na Figura 13 é apresentado o mapa conceitual da FADCE.

1.2. Avaliação do Carbono Biogênico no Tempo

Para o cálculo do carbono biogênico ao longo de um intervalo de tempo é necessário saber a quantidade de CO₂ que é absorvida por ano de uma dada espécie. No modelo dinâmico o CO₂ que é contabilizado ocorre na etapa de uso (módulo B1). A partir do momento em que um biomaterial (por exemplo uma árvore ou colmo de bambu) é retirado da plantação para ser utilizado no produto de construção abre-se espaço para o crescimento de um novo biomaterial naquele lugar, que irá absorver CO₂ pelo processo de fotossíntese. Esse período de tempo entre o crescimento do biomaterial até atingir o estágio de maturação para ele poder ser utilizado como produto de construção chama-se período de rotação (PITTAU *et al.*, 2018), que vai variar de espécie para espécie, sendo possível utilizar um modelo com base em uma curva de crescimento ano a ano, como é possível ver na Figura 12. Na FADCE o cálculo do carbono biogênico é considerado dessa forma.

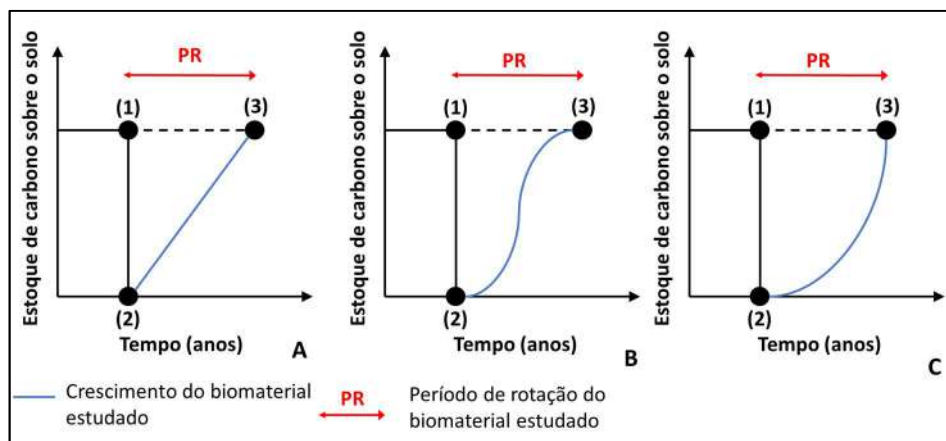


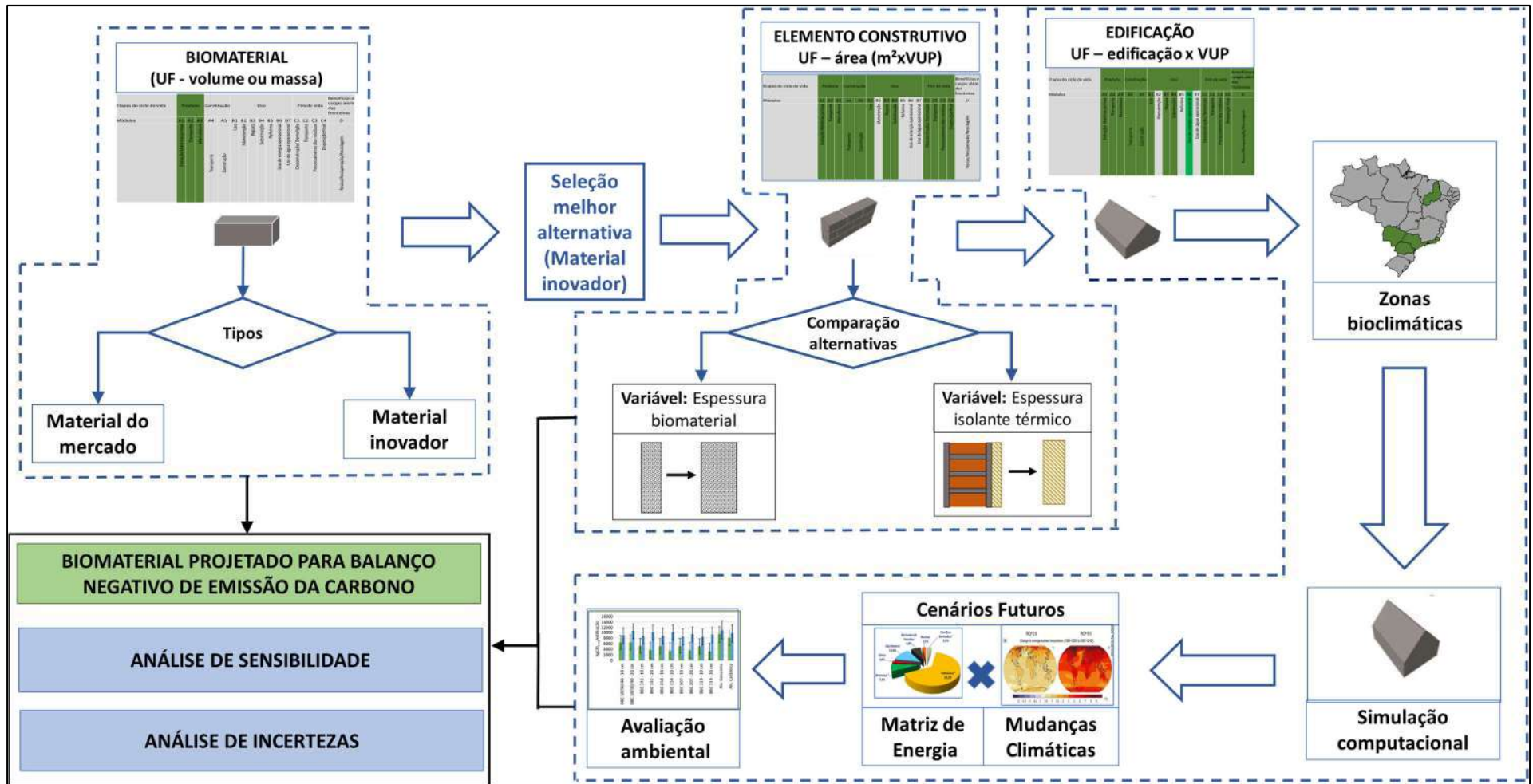
Figura 12 – Esquema simplificado do fluxo de carbono biogênico que pode ser adotado no modelo de plantação. (A) Biomaterial de rápido crescimento. (B) Madeira (PITTAU *et al.*, 2018). (C) Bambu (CALDAS *et al.*, 2019).

O número (1) representa o estoque de biomassa no estado estacionário. (2) representa o momento que a parte da biomassa sobre o solo são cortados e utilizados no produto de construção. Por fim, (3) representa a mesma quantidade de carbono que foi cortada e que se regenera naturalmente.

1.3. Avaliação da Carbonatação no Tempo

O processo de carbonatação vai ser diferente para o tipo de material cimentício presente no produto de construção e a área de exposição. Dessa forma, materiais cimentícios que tenham maior quantidade de CaO em sua composição (quando hidratados), como é o caso da cal hidráulica ou hidratada absorverão maior quantidade de CO₂ da atmosfera. Para o caso de elementos construtivos ou edificação em uso (módulo B1), assume-se normalmente que apenas o revestimento é carbonatado e que o processo ocorre nos primeiros 2 anos da vida útil do elemento construtivo ou edificação. As equações 3.2 e 3.3 apresentadas no Capítulo 3 podem ser utilizadas para o cálculo dessa quantidade.

Outra etapa em que a carbonatação pode e deveria ser considerada é após o processo de demolição de materiais cimentícios e se eles forem britados para terem uma menor granulometria para serem aterrados ou utilizados como agregados reciclados (módulo C4). Nessa ótica, a captura de CO₂ ocorre quando esses materiais são deixados expostos por um tempo determinado (normalmente 1 ano), e como a área de carbonatação aumenta significativamente há uma maior absorção desse CO₂ quando comparado à etapa de uso (COLLINS, 2010). Nesse caso, o processo de carbonatação deve ser considerado no último ano do fim de vida do elemento construtivo e edificação. Na FADCE o cálculo do CO₂ pelo processo de carbonatação é considerado dessa forma.



*UF – Unidade Funcional. VUP – Vida Útil de Projeto

Figura 13 – Mapa conceitual de organização da FADCE.

1.4. Avaliação Material

Quando a EC ou outros potenciais impactos ambientais de um material são avaliados utilizando a ACV, o processo é normalmente realizado considerando como UF o volume (normalmente em m³) ou massa (normalmente em kg ou t) do material. Na FADCE podem ser avaliados materiais já disponíveis no mercado ou inovadores, como é o caso do BBC.

Para o último caso além dos potenciais impactos ambientais podem ser empregados resultados relacionados às propriedades dos materiais, como resistência mecânica, condutividade térmica, etc. Para o caso de concretos, a propriedade mais utilizada é a resistência à compressão (em MPa), como apontam VAN DEN HEEDE e DE BELIE (2012) e CELIK *et al.* (2015). Dessa forma, é possível obter um indicador de desempenho ou eficiência mecânica, do tipo kgCO₂-eq/UF.MPa, indicando que quanto menor for esse valor, mais eficiente é o material. Ao final, é possível escolher qual material de maior ecoeficiência.

1.5. Avaliação Elemento Construtivo

De posse do material de interesse a ser estudado é possível avançar na avaliação considerando um elemento construtivo. Como já foi mencionado, o elemento construtivo pode ser uma vedação vertical (divisória, fachada), uma cobertura, piso, estrutura, etc. Nessa ótica, a UF vai depender do tipo de elemento construtivo, sendo que a área (m²) é uma das mais utilizadas, como foi observado na revisão da literatura.

Adicionalmente, deve ser avaliada a VUP do elemento construtivo, que vai depender da composição do elemento e seus materiais e suas respectivas VUPs. Dessa forma, serão adicionados materiais ou camadas para dado elemento construtivo, como revestimentos, acabamentos, reforços, etc.

Para essa avaliação a norma de desempenho, a ABNT NBR 15575:2013, pode ser empregada pois apresenta diferentes valores de VUP tanto para o elemento, dividida em estrutura, vedações verticais, cobertura, pisos e instalações como para diferentes materiais ou componentes, como revestimentos, pintura, impermeabilização, etc.

Quando o objetivo do estudo é a comparação do biomaterial com outro elemento construtivo convencional, já existente no mercado (ex. sistema de alvenaria), é possível realizar de duas formas. A primeira, é possível dimensionar o elemento composto do

biomaterial (normalmente um material inovador) com base em critérios² de desempenho do elemento convencional. Na literatura pesquisada verificou-se que o critério mais utilizado para avaliação da EC e outros impactos ambientais é a transmitância térmica (U). No entanto, para o caso do Brasil outro critério de desempenho térmico obrigatório, para a avaliação de vedações verticais é a capacidade térmica (Ct). Dessa forma, o critério de desempenho utilizado dependerá do tipo de elemento construtivo avaliado, podendo ser incluído critérios do tipo acústico, segurança ao fogo, estanqueidade, entre outros.

A segunda alternativa (mais indicada para biomateriais já existentes no mercado) é a inclusão de materiais adicionais, como é o caso de isolantes térmicos (apresentado na Figura 13), no elemento construtivo convencional. Aqui também podem ser buscados outros critérios além do térmico.

1.6. Avaliação Edificação

Como o consumo de energia para climatização artificial é uma das etapas mais importantes no ciclo de vida de uma edificação (CABEZA *et al.* 2014; CHAU *et al.*, 2015) e pode estar relacionada a diversas fontes de incerteza, como característica da zona bioclimática onde a edificação está localizada, mudanças tecnológicas dos equipamentos, descarbonização da matriz de energia elétrica, aumento da temperatura devido ao efeito das mudanças climáticas, entre outras (SU *et al.*, 2017), é importante que esses aspectos sejam considerados no modelo de avaliação ambiental.

Na Figura 14 é apresentada as etapas consideradas para a avaliação ambiental das edificações na FADCE, que pode ser aplicada tanto para avaliação do potencial de mitigação, em termos de redução da EC, e adaptação quando algum sistema construtivo é utilizado na envoltória de um projeto de edificação.

² Critério de desempenho pode ser entendido como uma especificação quantitativa dos requisitos de desempenho, expressos em termos de quantidades mensuráveis, a fim de que possam ser objetivamente determinados (ABNT NBR 15575:2013).

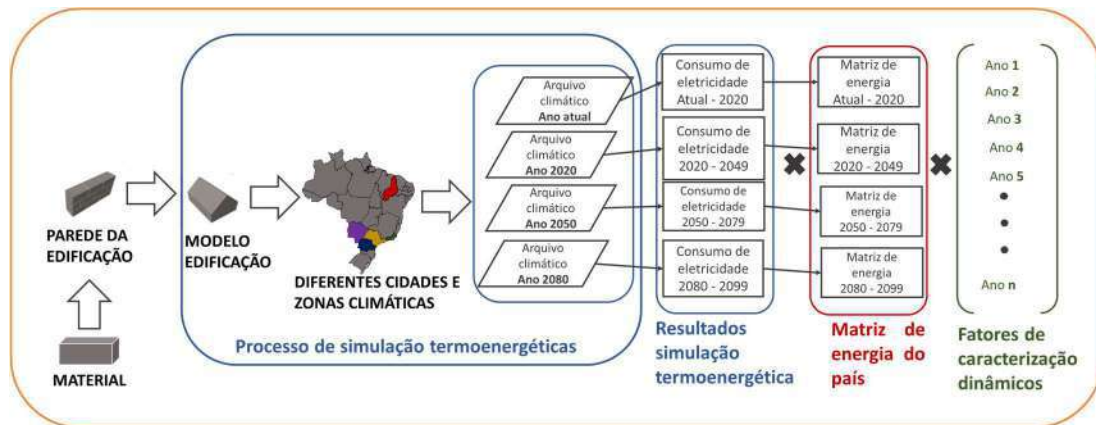


Figura 14 – Etapas a serem consideradas em uma análise dinâmica da edificação na FADCE.

Para sua aplicação é necessário saber as propriedades físicas e térmicas do material como massa específica, condutividade térmica, calor específico, etc; que serão inseridas em um modelo computacional para simulação termoenergética de um projeto de edificação.

Do ponto de vista da mitigação é possível quantificar a EC no ciclo de vida desse projeto (da extração e produção dos materiais, transporte, construção, operação, manutenção e fim de vida). Foram considerados três fatores dinâmicos no FADCE: (1) a temperatura do ar (com o uso de arquivos climáticos futuros) que aumentará devido ao aquecimento global, e, conseqüentemente irá aumentar o consumo de energia para climatização artificial, com diferenças de acordo com a zona climática onde a edificação estará localizada; (2) a matriz de energia que tende a se descarbonizar para atender as metas definidas no NDC, e, irá impactar na EC no ciclo de vida do projeto de edificações; e (3) os fatores de caracterização desenvolvidos por LEVASSEUR *et al.* (2010) utilizados na ACVd. Para isso, foi elaborada uma planilha eletrônica auxiliar, apresentada nos Apêndice 5A (Quadro A2) onde é possível adicionar os GEE avaliados (CO₂, CH₄, N₂O e CO) nos estágios de ciclo de vida considerados, de acordo com EN 15804:2012 (A1-A5, B1, B3, B4, B6, C1-C4 e D) e considerando a vida útil de 50 anos. Essa planilha pode ser expandida com a inclusão de outros GEE e uma maior vida útil.

Na presente tese, a FADCE será empregada para avaliar diferentes alternativas de BBC em comparação com os sistemas construtivos convencionais. Ela pode ser aplicada para a avaliação de qualquer outro sistema construtivo ou realidades de outros países. Dessa forma, ela é a principal contribuição dessa pesquisa.

1.7. Biomaterial Projetado para Balanço Negativo da Emissão de Carbono

Como a FADCE tem seu uso principal para a avaliação da EC e com foco em biomateriais, é possível empregá-la para projetar um biomaterial com balanço negativo da EC, seja na forma de um material, elemento construtivo ou seu uso em uma edificação.

Para isso, existe três principais alternativas: (1) aumentar a participação do(s) biomateriais na mistura (que são os responsáveis pela absorção de CO₂ e balanço negativo de GEE); (2) diminuição da participação dos materiais de maiores EC na mistura; (3) as alternativas (1) e (2) simultaneamente. Nessa ótica, essas estratégias vão ser mais ou menos eficientes dependendo do tipo de biomaterial.

Dois itens que influenciarão diretamente esse resultado são: (1) o tipo e quantidade de manutenções realizadas na etapa de uso; e (2) o tipo de fim de vida que será dado ao biomaterial, sendo que a incineração é o menos vantajoso, pois devolverá todo o CO₂ absorvido na fotossíntese para atmosfera (FOULQUET *et al.*, 2015; PEÑALOZA *et al.*, 2016), comprometendo o balanço negativo de EC do produto. Para materiais híbridos, como é o caso do bioconcreto, a alternativa (3) tende a ser a mais vantajosa, que será avaliada nos próximos capítulos.

Finalmente, essa avaliação pode ser feita a nível de material, elemento construtivo ou edificação, sendo recomendado que seja realizada pelo menos considerando o segundo nível, e o maior número de etapas do ciclo de vida, pois quando é feita somente a nível do material e algumas etapas não são consideradas (exemplo: transporte da fábrica ao canteiro de obras), corre-se o risco do balanço negativo tornar-se positivo quando outros materiais (exemplo revestimentos, elementos de ligação, acabamentos, etc.) forem acrescentados no elemento construtivo ou edificação.

1.8. Análise de Sensibilidade e Incertezas

Para a avaliação da EC de produtos de construção civil existem diferentes fatores e incertezas (ANAND; AMOR, 2017; ROCK *et al.*, 2020). Nessa ótica, é interessante que alguns itens sejam avaliados na análise de sensibilidade e incertezas, como é apresentado no Quadro 4. Os itens apresentados foram selecionados com base na revisão da literatura e organizados em biomateriais (puros e híbridos) e origem (materiais virgens e resíduos).

Quadro 4 – Itens a serem avaliados na análise de sensibilidade e incerteza de um sistema construtivo.

Itens	Biomateriais puros		Biomateriais híbridos (ex. cimentícios)	
	Materiais virgens	Resíduos	Materiais virgens	Resíduos
Sensibilidade				
Alocação (massa, econômica, energia, outro tipo)	-	x	-	x
Origem bioagregado	x	x	x	x
Tipo de combustível utilizado na produção dos materiais/matérias primas impactantes	x	x	x	x
Tipo de revestimento/acabamento utilizado no sistema construtivo	x	x	x	x
Vida útil revestimento	x	x	x	x
Tipo de revestimento/acabamento utilizado no sistema construtivo	x	x	x	x
Incertezas				
Carbono biogênico - % massa carbono, período de rotação	x	x	x	x
Carbonatação – teor de CaO no material cimentício, % de CaO que carbonata	-	-	x	x

2. Limitações da Ferramenta

Como a FADCE tem foco na avaliação da EC no ciclo de vida de produtos da construção civil, com foco em biomateriais, o requisito de desempenho térmico tende a ser o mais valorizado, pois tem relação direta com o consumo de energia elétrica nas edificações. Dessa forma, outros requisitos, como estrutural, durabilidade e etc, embora sejam recomendados de serem avaliados, essas informações podem não estar disponíveis, ainda mais se for um material inovador.

Embora nesta tese tenha sido dado foco somente na fachada de um projeto de edificação, a FADCE pode ser aplicada para estudar outros elementos construtivos, como cobertura, pisos, estruturas e etc. Sendo que a envoltória (fachadas, cobertura e pisos) é a que mais influencia no consumo de energia para climatização, e, conseqüentemente, na EC das edificações.

Do ponto de vista do consumo de energia elétrica em uma edificação o aspecto de comportamento do usuário é um item importante e com grande influência em uma análise dinâmica (MOFIDI, AKBARI, 2020), no entanto, não foi considerado na FADCE tendo em vista da inexistência de dados para o contexto brasileiro. No entanto, nada impede, que no futuro, quando esses dados estiverem disponíveis sejam incorporados nela.

Foram apresentados somente alguns itens para serem avaliados na análise de sensibilidade e incertezas, no entanto, outros podem ser adicionados, o que vai depender do tipo de biomaterial e objetivo da avaliação.

No próximo capítulo a FADCE é aplicada para a avaliação do BBC, onde são apresentados e detalhados os itens discutidos até aqui.

3. Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, 2013. NBR 15575. Edificações Habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 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 : A review. *Renew. Sus. Energy Rev.* 29, 394-416.
- Celik, K.; Meral, C.; Gursel, A. P.; Mehta, P. K.; Horvath, A.; Monteiro, P. J. M., 2015. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of selfconsolidating concrete mixtures made with blended Portland cements containing fly ash and limestone powder. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 56, (59–72).
- Chau, C. K., Leung, T. M., Ng, W. Y., 2015. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. *App. Energy*. 143, 395-413.
- Collins, F, 2010. Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 15, n. 6, p. 549–556.
- European Committee for Standardization. CEN EN 15804: sustainability of construction works: environmental product declarations: core rules for the product category of construction products. Brussels, 2012.
- 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.* 90, 51 – 59.
- Invidiata, A., Ghisi, E., 2016. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil, *Energy Build.* 130 (2016) 20–32. doi:10.1016/j.enbuild.2016.07.067.
- Mofidi, F., Akbari, H., 2020. Intelligent buildings: An overview. *Ene. Build.* 223, 110192.
- Pawelzik, P., Carus, M., Hotchkiss, J., Narayan, R., Selke, S., Wellisch, M., Weiss, M., Wicke, B., Patel, M. K., 2013. Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of

bio-based materials – Reviewing methodologies and deriving recommendations. *Res. Cons. Recyc.*73, 211-228.

Peñaloza, D., Erlandsson, M., Falk, A., 2016. Exploring the climate impact effects of increases use of bio-based materials in buildings. *Constr. Build. Mater.* 125, 219-226.

Peñaloza, D., Erlandsson, M., Falk, A., 2016. Exploring the climate impact effects of increases use of bio-based materials in buildings. *Constr. Build. Mater.* 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.* 129, 117-129.

Rock, M. et al., 2020. Embodied GHG emissions of buildings -The hidden challenge for effective climate change mitigation *Applied Energy*, 258 (2020), pp. 114107.

Su, S., Li, X., YiminZhu, Y., Lin, B., 2017. Dynamic LCA framework for environmental impact assessment of buildings. *Ener. Build.* 149, 310-320.

Van Den Heede, P., De Belie, N., 2012. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations". *Cem. Conc. Comp.* 34 (4), 431–442.

Apêndice 5A

Quadro A2 – Planilha elaborada para ACVd com base nos estágios do ciclo de vida definidos na EN 15804:2012 para exportar para a planilha *Dynamic LCA calculator for Global Warming* desenvolvido por Levasseur et al. (2010).

Year	CO2							TOTAL	Year	CH4							TOTAL	Year	N2O							TOTAL	Year	CO							TOTAL	Export to Dynamic LCA Calculator				
	A1-A5	B1	B4	B6	C1-C4	D	A1-A5			B1	B4	B6	C1-C4	D	A1-A5	B1			B4	B6	C1-C4	D	A1-A5	B1	B4			B6	C1-C4	D	IPCC name	CO ₂	CH ₄	N ₂ O		CO				
1	0	0	0	0	0	0	0,0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,0	1	0	0	0	0	0	0,0	1	0	0	0	0			
2	0	0	0	0	0	0	0,0	2	0	0	0	0	0	0	0	0,0	2	0	0	0	0	0	0	0	0,0	2	0	0	0	0	0	0,0	2	0	0	0	0			
3	0	0	0	0	0	0	0,0	3	0	0	0	0	0	0	0	0,0	3	0	0	0	0	0	0	0	0,0	3	0	0	0	0	0	0,0	3	0	0	0	0			
4	0	0	0	0	0	0	0,0	4	0	0	0	0	0	0	0	0,0	4	0	0	0	0	0	0	0	0,0	4	0	0	0	0	0	0,0	4	0	0	0	0			
5	0	0	0	0	0	0	0,0	5	0	0	0	0	0	0	0	0,0	5	0	0	0	0	0	0	0	0,0	5	0	0	0	0	0	0,0	5	0	0	0	0			
6	0	0	0	0	0	0	0,0	6	0	0	0	0	0	0	0	0,0	6	0	0	0	0	0	0	0	0,0	6	0	0	0	0	0	0,0	6	0	0	0	0			
7	0	0	0	0	0	0	0,0	7	0	0	0	0	0	0	0	0,0	7	0	0	0	0	0	0	0	0,0	7	0	0	0	0	0	0,0	7	0	0	0	0			
8	0	0	0	0	0	0	0,0	8	0	0	0	0	0	0	0	0,0	8	0	0	0	0	0	0	0	0,0	8	0	0	0	0	0	0,0	8	0	0	0	0			
9	0	0	0	0	0	0	0,0	9	0	0	0	0	0	0	0	0,0	9	0	0	0	0	0	0	0	0,0	9	0	0	0	0	0	0,0	9	0	0	0	0			
10	0	0	0	0	0	0	0,0	10	0	0	0	0	0	0	0	0,0	10	0	0	0	0	0	0	0	0,0	10	0	0	0	0	0	0,0	10	0	0	0	0			
11	0	0	0	0	0	0	0,0	11	0	0	0	0	0	0	0	0,0	11	0	0	0	0	0	0	0	0,0	11	0	0	0	0	0	0,0	11	0	0	0	0			
12	0	0	0	0	0	0	0,0	12	0	0	0	0	0	0	0	0,0	12	0	0	0	0	0	0	0	0,0	12	0	0	0	0	0	0,0	12	0	0	0	0			
13	0	0	0	0	0	0	0,0	13	0	0	0	0	0	0	0	0,0	13	0	0	0	0	0	0	0	0,0	13	0	0	0	0	0	0,0	13	0	0	0	0			
14	0	0	0	0	0	0	0,0	14	0	0	0	0	0	0	0	0,0	14	0	0	0	0	0	0	0	0,0	14	0	0	0	0	0	0,0	14	0	0	0	0			
15	0	0	0	0	0	0	0,0	15	0	0	0	0	0	0	0	0,0	15	0	0	0	0	0	0	0	0,0	15	0	0	0	0	0	0,0	15	0	0	0	0			
16	0	0	0	0	0	0	0,0	16	0	0	0	0	0	0	0	0,0	16	0	0	0	0	0	0	0	0,0	16	0	0	0	0	0	0,0	16	0	0	0	0			
17	0	0	0	0	0	0	0,0	17	0	0	0	0	0	0	0	0,0	17	0	0	0	0	0	0	0	0,0	17	0	0	0	0	0	0,0	17	0	0	0	0			
18	0	0	0	0	0	0	0,0	18	0	0	0	0	0	0	0	0,0	18	0	0	0	0	0	0	0	0,0	18	0	0	0	0	0	0,0	18	0	0	0	0			
19	0	0	0	0	0	0	0,0	19	0	0	0	0	0	0	0	0,0	19	0	0	0	0	0	0	0	0,0	19	0	0	0	0	0	0,0	19	0	0	0	0			
20	0	0	0	0	0	0	0,0	20	0	0	0	0	0	0	0	0,0	20	0	0	0	0	0	0	0	0,0	20	0	0	0	0	0	0,0	20	0	0	0	0			
21	0	0	0	0	0	0	0,0	21	0	0	0	0	0	0	0	0,0	21	0	0	0	0	0	0	0	0,0	21	0	0	0	0	0	0,0	21	0	0	0	0			
22	0	0	0	0	0	0	0,0	22	0	0	0	0	0	0	0	0,0	22	0	0	0	0	0	0	0	0,0	22	0	0	0	0	0	0,0	22	0	0	0	0			
23	0	0	0	0	0	0	0,0	23	0	0	0	0	0	0	0	0,0	23	0	0	0	0	0	0	0	0,0	23	0	0	0	0	0	0,0	23	0	0	0	0			
24	0	0	0	0	0	0	0,0	24	0	0	0	0	0	0	0	0,0	24	0	0	0	0	0	0	0	0,0	24	0	0	0	0	0	0,0	24	0	0	0	0			
25	0	0	0	0	0	0	0,0	25	0	0	0	0	0	0	0	0,0	25	0	0	0	0	0	0	0	0,0	25	0	0	0	0	0	0,0	25	0	0	0	0			
26	0	0	0	0	0	0	0,0	26	0	0	0	0	0	0	0	0,0	26	0	0	0	0	0	0	0	0,0	26	0	0	0	0	0	0,0	26	0	0	0	0			
27	0	0	0	0	0	0	0,0	27	0	0	0	0	0	0	0	0,0	27	0	0	0	0	0	0	0	0,0	27	0	0	0	0	0	0,0	27	0	0	0	0			
28	0	0	0	0	0	0	0,0	28	0	0	0	0	0	0	0	0,0	28	0	0	0	0	0	0	0	0,0	28	0	0	0	0	0	0,0	28	0	0	0	0			
29	0	0	0	0	0	0	0,0	29	0	0	0	0	0	0	0	0,0	29	0	0	0	0	0	0	0	0,0	29	0	0	0	0	0	0,0	29	0	0	0	0			
30	0	0	0	0	0	0	0,0	30	0	0	0	0	0	0	0	0,0	30	0	0	0	0	0	0	0	0,0	30	0	0	0	0	0	0,0	30	0	0	0	0			
31	0	0	0	0	0	0	0,0	31	0	0	0	0	0	0	0	0,0	31	0	0	0	0	0	0	0	0,0	31	0	0	0	0	0	0,0	31	0	0	0	0			
32	0	0	0	0	0	0	0,0	32	0	0	0	0	0	0	0	0,0	32	0	0	0	0	0	0	0	0,0	32	0	0	0	0	0	0,0	32	0	0	0	0			
33	0	0	0	0	0	0	0,0	33	0	0	0	0	0	0	0	0,0	33	0	0	0	0	0	0	0	0,0	33	0	0	0	0	0	0,0	33	0	0	0	0			
34	0	0	0	0	0	0	0,0	34	0	0	0	0	0	0	0	0,0	34	0	0	0	0	0	0	0	0,0	34	0	0	0	0	0	0,0	34	0	0	0	0			
35	0	0	0	0	0	0	0,0	35	0	0	0	0	0	0	0	0,0	35	0	0	0	0	0	0	0	0,0	35	0	0	0	0	0	0,0	35	0	0	0	0			
36	0	0	0	0	0	0	0,0	36	0	0	0	0	0	0	0	0,0	36	0	0	0	0	0	0	0	0,0	36	0	0	0	0	0	0,0	36	0	0	0	0			
37	0	0	0	0	0	0	0,0	37	0	0	0	0	0	0	0	0,0	37	0	0	0	0	0	0	0	0,0	37	0	0	0	0	0	0,0	37	0	0	0	0			
38	0	0	0	0	0	0	0,0	38	0	0	0	0	0	0	0	0,0	38	0	0	0	0	0	0	0	0,0	38	0	0	0	0	0	0,0	38	0	0	0	0			
39	0	0	0	0	0	0	0,0	39	0	0	0	0	0	0	0	0,0	39	0	0	0	0	0	0	0	0,0	39	0	0	0	0	0	0,0	39	0	0	0	0			
40	0	0	0	0	0	0	0,0	40	0	0	0	0	0	0	0	0,0	40	0	0	0	0	0	0	0	0,0	40	0	0	0	0	0	0,0	40	0	0	0	0			
41	0	0	0	0	0	0	0,0	41	0	0	0	0	0	0	0	0,0	41	0	0	0	0	0	0	0	0,0	41	0	0	0	0	0	0,0	41	0	0	0	0			
42	0	0	0	0	0	0	0,0	42	0	0	0	0	0	0	0	0,0	42	0	0	0	0	0	0	0	0,0	42	0	0	0	0	0	0,0	42	0	0	0	0			
43	0	0	0	0	0	0	0,0	43	0	0	0	0	0	0	0	0,0	43	0	0	0	0	0	0	0	0,0	43	0	0	0	0	0	0,0	43	0	0	0	0			
44	0	0	0	0	0	0	0,0	44	0	0	0	0	0	0	0	0,0	44	0	0	0	0	0	0	0	0,0	44	0	0	0	0	0	0,0	44	0	0	0	0			
45	0	0	0	0	0	0	0,0	45	0	0	0	0	0	0	0	0,0	45	0	0	0	0	0	0	0	0,0	45	0	0	0	0	0	0,0	45	0	0	0	0			
46	0	0	0	0	0	0	0,0	46	0	0	0	0	0	0	0	0,0	46	0	0	0	0	0	0	0	0,0	46	0	0	0	0	0	0,0	46	0	0	0	0			
47	0	0	0	0	0	0	0,0	47	0	0	0	0	0	0	0	0,0	47	0	0	0	0	0	0	0	0,0	47	0	0	0	0	0	0,0	47	0	0	0	0			
48	0	0	0	0	0	0	0,0	48	0	0	0	0	0	0	0	0,0	48	0	0	0	0	0	0	0	0,0	48	0	0	0	0	0	0,0	48	0	0	0	0			
49	0	0	0	0</																																				

CAPÍTULO 6 - ESTUDO DE CASO PARA O BIOCONCRETO DE BAMBU: DADOS DE ENTRADA

Neste capítulo a FADCE é aplicada para a avaliação do BBC considerando o contexto do Brasil, sendo apresentados os dados de entrada utilizados na modelagem.

1. Caracterização do Bioconcreto de Bambu

No Quadro 5 são apresentados os materiais utilizados e o traço para a produção dos bioconcretos avaliados no Quadro 6 algumas propriedades medidas (massa específica, resistência à compressão e condutividade térmica) por ANDREOLA *et al.* (2019), que serviram de base para esta pesquisa, sendo denominados de acordo com a relação em massa Cimento Portland/ Metacaulim/ Cinza volante. Primeiramente foram avaliados cinco traços de BBC, BBC 100/0/0 (com maior teor de cimento Portland) até o BBC 30/30/40 (maior teor de adições minerais). Os números indicam a participação de cimento Portland, metacaulim e cinza volante, respectivamente no total de materiais cimentícios. Posteriormente foram escolhidos as misturas de menor impacto de mudanças climáticas e as mais eficientes quando a resistência à compressão ($\text{kgCO}_2\text{-eq/m}^3\text{.MPa}$) e flexão ($\text{kgCO}_2\text{-eq/m}^3\text{.MPa}$) e condutividade térmica ($\text{kgCO}_2\text{-eq.W/m}^3\text{.m.K}$) são considerados.

Quadro 5 – Traços dos BBC avaliados (em kg/m^3) por ANDREOLA *et al.* (2019).

Bioconcretos	Cimento CPV-ARI	Metacaulim	Cinza volante	Partículas de Bambu	Superplastificante	Aditivo CaCl ₂	Água mistura
BBC - 100/0/0	828,6	0	0,0	236,1	8,3	16,6	522,8
BBC - 60/30/10	457,9	228,9	76,0	236,1	7,6	15,3	473,8,
BBC - 50/30/20	372,1	223,2	148,8	236,1	7,4	14,9	451,9
BBC - 40/30/30	295,8	221,8	221,8	236,1	7,4	14,8	428,0
BBC - 30/30/40	217,9	217,9	290,5	236,1	7,3	14,5	409,3

Quadro 6 – Propriedades dos traços dos BCC avaliados por ANDREOLA *et al.* (2019).

Bioconcretos	Massa Específica (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Condutividade térmica (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
BBC - 100/0/0	907,90	14,75	3,71	0,50
BBC - 60/30/10	878,96	14,38	3,52	0,47
BBC - 50/30/20	857,96	12,50	3,40	0,46
BBC-40/30/30	847,57	12,41	3,06	0,44
BBC-30/30/40	837,80	11,58	2,91	0,38

Esse material foi pensado, para ser usado, principalmente como uma solução construtiva energeticamente eficiente para fechamentos verticais e horizontais (ANDREOLA *et al.*, 2017). Em comparação ao concreto convencional, o BBC é mais leve e possui uma menor condutividade térmica. O processo de produção é realizado por mistura em betoneira ou misturador e adensamento por vibração, sem a necessidade de prensas. Quando desmoldado ele possui um bom acabamento, podendo ser aplicado diretamente na construção, apenas considerando uma camada de revestimento do tipo pintura ou argamassa com pintura.

2. Definição do Escopo e Unidade Funcional

Para a avaliação dos BBC foram considerados as seguintes etapas do ciclo de vida (Figura 15), classificados de acordo com a EN 15804 (CEN, 2012): produção dos bioconcretos (A1-A3); transporte até o canteiro (A4); construção da parede (A5); uso, considerando o processo de carbonatação e crescimento do bambu (B1); reparo (B3); reposição (B4); fim de vida (C1-C3), considerando a demolição, transporte dos resíduos e aterramento.

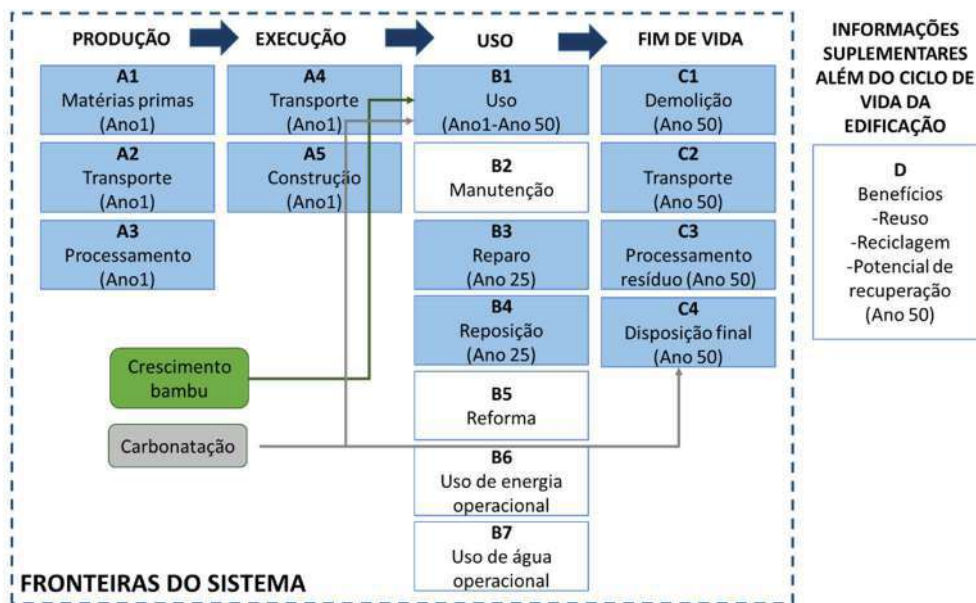


Figura 15 – Escopo e fronteiras avaliadas no estudo de caso do BBC.

Como o uso do BBC foi pensado para o emprego nas vedações verticais das edificações, principalmente nas fachadas e vedações internas, a unidade funcional escolhida foi a área superficial e vida útil de projeto (VUP) de 50 anos de acordo com a ABNT NBR 15575:2013 (em $m^2 \times VUP$), que como foi verificado na revisão bibliográfica, principalmente nos estudos de PRETOT *et al.* (2014), ARRIGONI *et al.* (2017), PITTAU *et al.* (2018), é a mais utilizada. Posteriormente, foi considerada a edificação \times VUP, com a inclusão da etapa de uso de energia operacional.

Para o uso do bioconcreto como vedação vertical nas edificações brasileiras é importante considerar aspectos de desempenho, de acordo na NBR 15575 (ABNT, 2013), sendo o desempenho térmico e acústico alguns dos mais importantes para esse tipo de uso. Pensando nisso, foi avaliado o mesmo m^2 , no entanto, considerando diferentes espessuras da vedação vertical de bioconcreto, já que o aumento da espessura da vedação leva a um aumento de seu desempenho térmico e acústico. Portanto, foram adotadas três espessuras: 10 cm, 15 cm e 20 cm. Essas medidas foram escolhidas por serem os valores mais usuais dos sistemas construtivos utilizados em vedações verticais no Brasil.

3. Inventário do Bioconcreto de Bambu

Embora sejam utilizados resíduos de bambu, eles precisam passar por um beneficiamento antes de serem misturados com os materiais cimentícios, que basicamente envolvem as seguintes etapas: (1) trituração primária, (2) trituração secundária; (3) Moagem, (4) Lavagem das partículas em água a $80^\circ C$, como é apresentado na Figura 16. Como os

resíduos podem ser originados de fontes diferentes, aqueles mais fáceis de serem tratados, podem pular algumas etapas. Nos Apêndices 6A (Quadro A3) são apresentados o consumo de energia elétrica em cada uma dessas etapas.

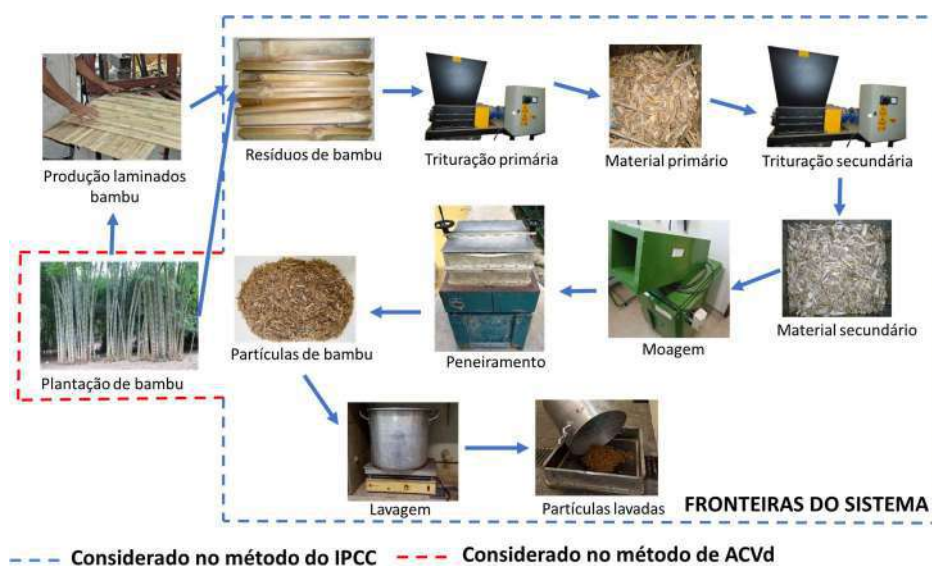


Figura 16 – Etapas de tratamento dos resíduos de bambu.

Para o caso do inventário da ACV foi considerado o pior caso, ou seja, que o resíduo passa pelas etapas descritas acima. Foi contabilizado os insumos e energia elétrica gasta pelos equipamentos utilizados. Como são resíduos, que não possuem valor econômico, inicialmente não foi considerado alocação dos impactos ambientais para a produção de produtos de bambu (plântio, corte e tratamento dos colmos, produção dos laminados, etc.). O procedimento de alocação é explorado na seção de Análise de Sensibilidade.

Para o cimento Portland CPV foi considerado o inventário base de cimento do Ecoinvent v. 3.3, com modificação da energia gasta para produção de clínquer, adotando a matriz de energia elétrica brasileira presente no Ecoinvent, a média de consumo de eletricidade e energia térmica de fábricas brasileiras, retiradas do banco de dados do WBCSD (2018). Para a composição do cimento foi considerado composição de 90% de clínquer, 5% de filer calcário e 5% de gesso, sendo utilizado o banco de dados do Ecoinvent para o filer.

Para a metacaulim adotou-se a extração do caulim (obtido do Ecoinvent), e calcinação utilizando carvão vegetal, segundo dados de BORGES *et al.* (2014). Para a cinza volante considerou o tratamento da cinza, sem alocação, adaptado de Chen *et al.* (2010) e adotando a matriz de energia do Brasil.

Na etapa de produção (A1-A3) da parede de bioconcreto utilizou-se como base os processos que ocorrem em uma usina de concreto e fábrica de produção de produtos pré-fabricados de concreto, tendo em vista que o bioconcreto desenvolvido em laboratório tem a intenção de ter um uso similar quando for para o mercado. Foram utilizados os dados disponibilizados no Ecoinvent, com a matriz elétrica adaptada à realidade brasileira.

Na etapa de construção (A5) foi considerado uma perda de 5% (valor estimado em sistemas construtivos industrializados no Brasil) dos materiais, de acordo com dados do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil - SINAPI (CAIXA, 2018), esses que são transportados e enviados para um aterro de resíduos inertes. Adotou-se que é um sistema construtivo industrializado, similar a tecnologia de painéis pré-fabricados de concreto, que já existe no Brasil (SINAT, 2015), em que as paredes são construídas com auxílio de pontes rolantes e guias, com um consumo de energia elétrica estimado em 14,4 kWh/m².

Na etapa de reparo (B3) foi considerado que 10% de BBC é substituído por um novo, conforme CALDAS *et al.* (2019) e na de reposição (B4) que a camada de argamassa de revestimento é toda substituída. Ainda nessas etapas, foram considerados: o transporte do novo material, sendo adotado o mesmo da etapa A4 e o transporte e processamento para a destinação final em aterro de resíduos inertes, que serão detalhados a seguir.

Na etapa de fim de vida, para demolição (C1) considerou o consumo de diesel utilizado nos equipamentos de demolição, enquanto para a disposição em aterros (C3) foi considerado o processo de coleta e operações de um aterro de resíduos inertes, para o BBC.

No Quadro 7 é apresentado um resumo dos insumos e atividades consideradas com seus respectivos *datasets* e fontes de consulta. No Quadro 8 são apresentados os insumos considerados para a reciclagem do bambu.

Quadro 7 – Insumos e atividades considerados no inventário do ciclo de vida do BBC.

Insumos e atividades	<i>Datasets</i> e fontes
Estágio de produção (A1-A3)	
Cimento CPV	Modelado pelo autor com base nos dados do SNIC (2018), BEN (2018), WBCS (2018)

Insumos e atividades	Datasets e fontes
Metacaulim	Modelado pelo autor com base nos dados de Borges et al. (2014)
Cinza volante	Modelado pelo autor com base nos dados de Chen et al. (2010)
Aditivo cloreto de cálcio	<i>Calcium chloride {GLO}</i>
Aditivo VMA	Plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde {GLO}
Partículas de bambu	Modelado pelo autor com base nos dados de laboratório e Electricity, médium voltage {BR}
Água	<i>Tap water {GLO}</i>
Eletricidade	<i>Electricity, médium voltage {BR}</i>
Operações usina de concreto	<i>Concrete, 20MPa {RoW} concrete production 20MPa¹</i>
Operações usina de pré-fabricado	<i>Pre-cast concrete, min. reinf., prod. mix, concrete type C20/25¹</i>
Estágio de transporte (A4)	
Transporte	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {GLO}</i>
Estágio de construção (A5)	
Eletricidade	<i>Electricity, médium voltage {BR}</i>
Transporte	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {GLO}</i>
Disposição final em aterro de resíduos inertes	<i>Waste concrete, not reinforced {RoW} treatment of waste concrete, not reinforced, collection for final disposal²</i>
Fim de vida (C1- C4)	
Demolição	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>
Transporte	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {GLO}</i>
Disposição final em aterro de resíduos inertes	<i>Waste concrete, not reinforced {RoW} treatment of waste concrete, not reinforced, collection for final disposal²</i>

¹Adaptada à matriz de energia elétrica brasileira.

Quadro 8 – Insumos e atividades consideradas para a reciclagem das partículas de bambu

Insumos e atividades	Datasets e fontes
Transporte dos resíduos das indústrias para as usinas de reciclagem ¹	50 km com caminhões 10-20 t
Manuseio no local em uma usina de reciclagem de resíduos de bambu ¹	Diesel: 2.7 L/t partículas de bambu
Processamento das partículas de bambu ¹	Eletricidade: 95 kWh/t partículas de bambu
Secagem ¹	Óleo residual: 5,63 L/t partículas de bambu
Remoção dos extrativos ²	10L/kg partículas de bambu e 0.15 kWh/kg partículas de bambu

¹Hossain e Poon (2018). ²Medido em laboratório.

Os impactos da etapa de transporte (A4) que também estão presentes nas etapas de construção (A5), reparo (B3), reposição (B4) e fim de vida (C1-C4) dependem da distância de transporte, massa transportada, eficiência do motor e questões relacionadas as rotas, como qualidade das vias, topografia, entre outros fatores (KAMAKATÉ; SCHIPPER, 2009).

Para países em desenvolvimento, como o Brasil, China, entre outros, normalmente são adotados o tipo EURO 3, com carga de 16-32 toneladas, como são verificados nos estudos de VAN DER LUGT e VOGTLÄNDER (2015), BROEREN *et al.* (2017).

Em pesquisas do tipo estudo de caso, como SOUZA *et al.* (2016), normalmente são utilizadas distâncias de transporte fixas e alguns casos, como INVIDIATA e GHISI (2016), é realizada a análise de incertezas considerando diferentes distâncias de transporte para diferentes fabricantes.

O Brasil, dada a sua grande extensão geográfica, as distâncias comerciais de transporte podem chegar a mais de 1000 km. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento - SNIC (2013), nas regiões Sudeste e Sul, as distâncias de transporte chegam em média de 300 a 500 km, enquanto em outras regiões, como a Norte pode chegar a 1000 km. Para agregados utilizados em concretos podem ser consideradas distâncias de transporte superiores a 250 km (SANTORO; KRIPKA, 2016). Para a argila utilizada na produção de blocos cerâmicos os valores podem chegar a 50 km (SOUZA *et al.*, 2016).

A localização da fábrica ou canteiro para onde os materiais de construção serão transportados é um item fundamental se considerar as características geográficas e de desenvolvimento no Brasil. A região Sudeste é a com maior concentração de fábricas de diversos tipos de produtos (química, têxtil, construção civil, etc.) e onde se situa grande parte dos consumidores, dada a elevada densidade populacional nessa região. Por outro lado, a região Norte possui uma extensa área somado a uma menor população e consequentemente uma menor densidade populacional, fazendo com que essa região não seja atrativa para a instalação de fábricas (CALDAS; SPOSTO, 2017; SPOSTO *et al.*, 2016).

Neste contexto, dada a incerteza existente para esse estágio do ciclo de vida, nesta pesquisa foram consideradas diferentes distâncias de transporte, para cada insumo utilizado no BBC, a partir de uma faixa de três valores (em uma distribuição triangular)

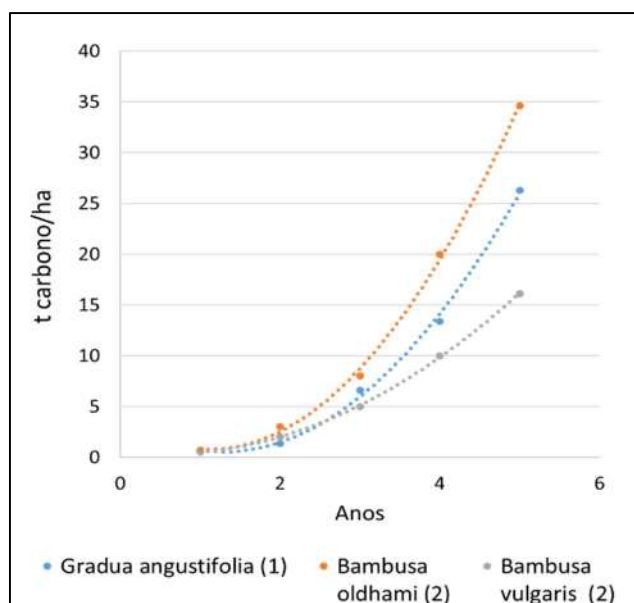
sendo quantificadas as incertezas no total dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do produto avaliado. O tipo e eficiência de motor será considerado constante, sendo utilizado o dataset “*Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {GLO}*” do Ecoinvent v. 3.3. Foram consideradas as distâncias de transporte dos diferentes insumos, sendo considerada uma distribuição triangular, conforme é apresentado no Quadro 9, de forma similar ao estudo de ESCAMILLA *et al.* (2018).

Quadro 9 – Distâncias de transporte consideradas no estudo de caso.

Insumos	Melhor caso	Intermediário	Pior caso
Produção e Construção (A1-A5), Reparo (B3) e Reposição (B4)			
Cimento CPV	100	200	400
Metacaulim	100	200	400
Cinza volante	200	400	800
Aditivo cloreto de cálcio	200	400	800
Aditivo VMA	200	400	800
Partículas de bambu	100	200	400
Transporte BBC	20	40	60
Fim de vida (C1- C4)			
Transporte aterro	20	40	60
Transporte centro de reciclagem	20	40	60
Transporte novo destino	20	40	60

4. Quantificação do Carbono Biogênico dos Resíduos de Bambu no Tempo

Para a quantificação do carbono biogênico dos resíduos de bambu, foi considerado que a plantação que deu origem aos resíduos volta a crescer, com o início no ano 2 do ciclo de vida da vedação, sendo que os resíduos foram gerados de produtos de bambu que vieram de uma plantação de bambu já operante, que de acordo com a classificação de NETTO (2009), tem mais de 11 anos. Na Figura 17 é apresentado dados utilizados no modelo para o cálculo do carbono biogênico.



(1) CRUZ RÍOS (2009); (2) Estimado com base nos dados de MOGNON (2015).

Figura 17 –Carbono fixado anualmente nos colmos de diferentes espécies.

O modelo de cálculo do carbono neutro foi pensando a partir da análise de dados experimentais de carbono fixado na biomassa de bambu, obtido de CRUZ RÍOS (2009) e MOGNON (2015), de forma similar ao método realizado por PITTAU *et al.* (2018), sendo que nesse estudo foram considerados três períodos de rotação, de 3, 5 e 8 anos.

Foi realizada a análise elementar CHN para a determinação do teor de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) de algumas amostras de bambus, no Laboratório de Xistoquímica da UFRJ. O equipamento utilizado foi um analisador elementar CHN, da Thermo Finningan, série Flash EA 1112. A temperatura do tubo de quartzo foi mantida em 900°C. A vazão do gás de arraste (hélio) foi de 130 mL/min, enquanto o fluxo do gás oxigênio para a combustão foi de 250 mL/min. As amostras foram pesadas em balança analítica Mettler Toledo, modelo AT 21 comparator. A massa foi de aproximadamente 10 mg. Ao final foram obtidos o percentual de carbono das amostras de bambu avaliadas, resultando em um valor médio de 45,62%. Como análise de incerteza foram avaliados mais dois valores, 42% e 47% de acordo com o estudo de DALLAGNOL (2012).

5. Quantificação do CO₂ Absorvido na Carbonatação no Tempo

Como o processo de carbonatação é influenciado pela composição do material e ambiente de exposição, foram avaliadas algumas incertezas referentes ao processo, definindo três cenários, como é apresentado no Quadro 10.

Quadro 10 – Dados de entrada para modelagem da carbonatação no estudo de caso.

Dados entrada	Melhor caso	Caso intermediário	Pior caso
CaO no cimento CPV-ARI ¹	60%	55%	50%
CaO na cal hidratada CH-I ²	70%	65%	60%
Percentual de CaO que é carbonatado	75%	70%	65%

CPV-ARI – Classe do Cimento do tipo CPV de Alta Resistência Inicial. CHI – Classe da Cal de grau de pureza alto.

Foi considerado que a carbonatação ocorre em dois momentos do ciclo de vida da vedação. Primeiramente na etapa de uso (B6), que começa a ocorrer a partir do ano 2 e vai até sua demolição, sendo considerada somente a carbonatação da área superficial. Posteriormente, na etapa de fim de vida (C1-C4), quando a vedação do BBC é demolida ela é triturada para a geração de materiais com diâmetro nas dimensões de agregados utilizados em rodovias, segundo COLLINS (2010), e deixada exposta em pilhas para o processo de carbonatação (da parte que não foi considerada na etapa de uso), durante um ano. Embora no Brasil essa ação não seja uma realidade atual, ela tende a ser utilizada no futuro. Essa afirmação pode ser justificada com base nos benefícios em termos de captura de CO₂ pela maior área superficial dos agregados, já ser comum em países europeus (PITTAU *et al.*, 2018) e ser indicada como uma das estratégias para a produção de materiais cimentícios de baixo carbono, em *Roadmaps* realizados para o setor de cimentos (CEMBUREAU, 2020).

6. Bioconcreto de Bambu Projetado para Balanço Negativo da Emissão de Carbono

Após a avaliação das misturas do BBC foi possível determinar seus impactos ambientais. No entanto, tendo em vista que esse é um material com potencial de ter um balanço negativo de EC foi realizado o processo inverso, para a mistura com maior teor de pozolanas, e considerando os impactos devido ao processo de alocação. Foi realizado o cálculo de uma “EC negativa” (superior a -15 kgCO₂-eq/m³), considerando diferentes possibilidades para a composição, sendo modificados o tipo e teor de cimento Portland, teor de cinza volante e metacaulim e resíduos de bambu. Foram considerados cenários com Cimento Portland CPV-ARI (originalmente utilizado) e Cimento Portland CII-E32 (de menor impacto ambiental, devido ao menor teor de clínquer na composição desse cimento). O critério utilizado foi a escolha dos materiais que mais impactaram a EC e

realização da substituição em massa, mantendo o valor de massa por m³ da mistura original.

- Cenário 1: Cimento Portland CPV-ARI sendo substituído por cinza volante;
- Cenário 2: Cimento Portland CPV-ARI. Troca dos materiais cimentícios (cimento, metacaulim e cinza volante) por resíduos de bambu.
- Cenário 3: Substituição do Cimento Portland CPV-ARI por cinza volante e troca dos materiais cimentícios por resíduos de bambu.
- Cenário 4: Cimento Portland CII-E-32 sendo substituído por cinza volante.
- Cenário 5: Cimento Portland CII-E-32. Troca dos materiais cimentícios (cimento, metacaulim e cinza volante) por resíduos de bambu.
- Cenário 6: Substituição do Cimento Portland CII-E-32 por cinza volante e troca materiais cimentícios por resíduos de bambu.

De posse das novas misturas foram realizadas novas modelagens e avaliação empregando o método CML-IA e ACVd desenvolvida por LEVASSEUR *et al.* (2010).

7. Avaliação dos Sistemas Construtivos Convencionais

Os sistemas de BBC foram comparados com os sistemas de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos (14x19x29 cm) e de concreto (14x19x29 cm), revestidos com argamassa (espessura de 2,5 cm de cada lado), ambos com espessura final de 19 cm.

Para o inventário dos blocos foi utilizado os dados apresentados por SOUZA *et al.* (2016) e CALDAS *et al.* (2017), enquanto para a argamassa de revestimento os dados retirados das composições do SINAPI da CAIXA ECONÔMICA FEDERAL (2018) e de CALDAS e TOLEDO FILHO (2018). Maior detalhamento desses sistemas está apresentados em CALDAS e TOLEDO FILHO (2018).

8. Análises de Sensibilidade

Como o BBC é um material inovador existem algumas possibilidades para sua produção, como o teor do aditivo acelerador de pega, o tipo de produção de metacaulim e tipo de

revestimento utilizado para sua produção. Nesse sentido, esses aspectos foram avaliados como análise de sensibilidade.

8.1. Alocação dos Resíduos de Bambu e da Cinza Volante

Quando se avaliam co-produtos originados de outros produtos principais, como é o caso dos resíduos de bambu gerados e a cinza volante (um co-produto), é comum realizar a alocação dos impactos gerados no processo (DERMETIZI *et al.*, 2017). Para esta pesquisa foram considerados dois cenários de alocação, em massa e econômica, normalmente os mais utilizados, como pode ser observado nos estudos de GARCIA e FREIRE (2014), ALMEIDA *et al.* (2015), SAADE *et al.* (2015), DEMERTZI *et al.* (2017). Para o cálculo dos coeficientes de alocação (em massa e econômica) dos impactos nos resíduos de bambu e cinza volante foram utilizadas as equações 3.6 e 3.7, respectivamente.

$$R_{m\%} = \frac{m_R}{m_P + m_R} \quad (3.6)$$

$$R_{R\%} = \frac{m_R \times R\$_R}{R\$_P + m_R \times R\$_R} \quad (3.7)$$

Onde:

RB_{m%} – Coeficiente de alocação em massa de resíduos de bambu e cinza volante;
 m_R – Massa gerada de resíduos de bambu ou cinza volante (kg);
 m_P – Massa do produto de bambu – colmo ou laminado (kg). Cinza volante - Carvão betuminoso (kg);
 R_{R%} – Coeficiente de alocação econômica de bambu e cinza volante;
 R\$_R – Preço resíduos de bambu e cinza volante (R\$/kg);
 R\$_P – Bambu - Preço do produto de bambu – colmo ou laminado (R\$/kg). Cinza volante – Preço energia elétrica (R\$/kWh).

Como os resíduos podem ser provenientes de fontes diversas, foram adotadas aqui duas fontes principais: (1) colmos tratados para estruturas tubulares; (2) laminados de bambu para pisos de edificações habitacionais. Esses produtos são os de uso mais frequente na construção civil e onde foi possível obter os dados necessários para quantificar a alocação.

Como existem diferentes valores de perdas dos materiais, devido a heterogeneidade do bambu, diferenças de espécie, tecnológicas de produção, entre outros, para o uso desses produtos, foram utilizados três valores (melhor caso, intermediário e pior caso). Os dados de perda para alocação em massa do bambu foram retirados com pesquisa com fabricantes

e construtores e para a produção dos laminados dos estudos de ESCAMILLA e HABERT (2014) e RASTREPO *et al.* (2016). Para alocação econômica foram pesquisados os preços de colmos tratados de bambu Mossô (gênero *Phyllostachys*), os mais utilizados para a construção civil brasileira, e laminados colados de bambu de médio tráfego vendidos no mercado brasileiro.

Como os resíduos de bambu não tem valor econômico no Brasil, pensou-se em um cenário que eles podem ser utilizados como fonte energética, similar ao que ocorre com cavacos de madeira. Neste caso foram pesquisados os preços de cavacos de madeira no Brasil em uma página especializada em produtos agrícolas (MF RURAL, 2019). Para o preço da energia elétrica foram utilizados valores da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2019) para o ano de 2019. Os coeficientes de alocação encontrados estão apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 – Coeficientes de alocação utilizados na modelagem do estudo de caso calculados com base nas equações 3.6 e 3.7.

Produtos	Melhor caso	Intermediário	Pior caso
Alocação em massa ($R_m\%$)			
Colmo	4%	8%	13%
Laminado	34%	46%	59%
Cinza volante	9%	11%	13%
Alocação econômica ($R_{R\\$}\%$)			
Colmo	0,1%	0,3%	0,9%
Laminado	0,02%	0,03%	0,04%
Cinza volante	2%	3%	4%

¹Com base nos preços encontrados em MF Rural (2019).

Para a modelagem ambiental da plantação de bambu foram utilizados os dados de Netto (2009) e para o colmo de bambu tratado e laminado foram utilizados os dados apresentados por ESCAMILLA e HABERT (2014) e VAN DER LUGT e VOGTLÄNDER (2015), respectivamente, com a adaptação da matriz de energia a matriz brasileira e transporte dos insumos. Para a geração de energia à carvão foi utilizado o dado do Ecoivent v. 3.3.

8.2. Origem da Partícula de Bambu

Embora o BBC tenha sido projetado para utilizar resíduos provenientes da cadeia produtiva de bambu, essa prática pode ser comprometida caso a disponibilidade de

resíduos não seja suficiente, principalmente, quando se considera que o Brasil é um país de dimensões continentais, dado seu tamanho. Nesse contexto, uma alternativa seria a produção de partículas de bambu a partir de uma plantação de bambu, própria para isso, tendo em vista que o papel de sequestro de CO₂ estaria acontecendo da mesma forma, sendo, portanto, a diferença somente no processo de produção das partículas.

Nessa ótica, foi avaliado como análise de sensibilidade como seria o impacto de mudanças climáticas do BBC se os agregados fossem provenientes de uma plantação. Nesse caso foram contabilizados os GEE relacionados ao processo de uma plantação, com base no estudo de NETTO (2009), apresentado no Quadro 12, corte dos colmos e trituração utilizando equipamentos que fazem uso de energia elétrica. Foram consideradas as atividades presentes no Quadro 13, de acordo com HOSSAIN e POON (2018).

Quadro 12 – Atividades e insumos considerados na plantação de bambu.

Atividades e insumos	Datasets
Manutenção da plantação - Diesel	<i>Diesel, burned in agricultural machinery {GLO} diesel, burned in agricultural machinery</i>
Manutenção da plantação - Lubrificantes	<i>Lubricating oil {RoW} production</i>
Plantação - Calcário dolomítico	<i>Dolomite {RER} production¹</i>
Fertilização - Superfosfato simples	<i>Single superphosphate, as 35% Ca(H₂PO₄)₂ (NPK 0-21-0), at plant/RER Mass</i>
Fertilização - Fertilizante NPK 20-5-20	<i>NPK compound (NPK 15-15-15), at plant/RER Mass</i>
Combate a pragas - Formicida	<i>Insecticide, at plant/RER Mass</i>
Combate a pragas - Herbicida	<i>Herbicide, at plant/RER Mass</i>

Quadro 13 – Atividades consideradas na produção de partículas de bambu virgens.

Atividades	Insumos e Unidades
Transporte de bambu das áreas próximas ao local de fabricação ¹	50, 100, 200 km by 10-20 toneladas (100% Default e 50% Empty)
Processamento do bambu (corte, processamento, peneiramento) ¹	Eletricidade: 118 kWh/t resíduos de bambu, and diesel: 19 MJ/t resíduo de bambu,
Secagem ¹	Óleo residual: 29,46 L/t resíduos de bambu
Remoção dos extrativos ²	10L/kg partículas de bambu and 0,15 kWh/kg partículas de bambu

¹Hossain e Poon (2018). ²Medido em laboratório.

Foram avaliados como cenários um dos obstáculos normalmente encontrados para o desenvolvimento de uma economia circular de resíduos de biomassa (JARRE et al., 2020): (1) um transporte mais eficiente considerando com 100% da capacidade do veículo

e o retorno cheio; (2) um transporte menos eficiente considerando 50% da capacidade do veículo e retorno vazio. Foram adotadas três distâncias de transporte das partículas de bambu virgens: 50 km, 100 km e 400 km.

Por fim, como a contabilização dos impactos de resíduos sofre influência do processo de alocação utilizado, os resultados foram comparados quando esses diferentes processos (apresentados no item 10.1) são considerados. Ao final, foi possível saber quais são as distâncias máximas que é possível transportar colmos para serem utilizados como partículas de bambu, sendo verificado qual a alternativa (considerando os diferentes cenários) é mais vantajosa do ponto de vista das mudanças climáticas: (1) uso de resíduos de bambu ou (2) uso de colmos de bambu triturados.

8.3. Combustível Para Calcinação do Metacaulim

Como o metacaulim é uma pozolana obtida a partir da calcinação do caulim e possível utilizar diferentes combustíveis para esse processo, foram avaliados: carvão vegetal (original), gás natural, energia elétrica e biomassa.

8.4. Revestimento como Resina Acrílica

Como existe poucos dados sobre sua durabilidade foi realizada uma avaliação adicional do BBC 30/30/40 sem revestimento argamassado adicionando uma camada de resina acrílica como camada protetora, considerando espessuras da parede de 10 cm e 20 cm. Essa avaliação tem o objetivo de saber se é possível utilizar outro tipo de revestimento, para o aumento da durabilidade, sem que haja um aumento significativo dos impactos ambientais.

Como análise de sensibilidade foram analisados três valores de vida útil para a reposição do verniz, de 3, 5 e 8 anos, com base na informação do fabricante da resina, prática de mercado e na NBR 15575 (ABNT, 2013). Foram considerados três distâncias de transporte, de 200 km, 400 km e 800 km. Foi utilizado o consumo de resina de 0,24 kg/m², de acordo com dados de um fabricante e considerando a aplicação com três demãos. Foi utilizado o *dataset* do banco de dados do Ecoinvent v.3.3 - *Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {GLO}*, com adaptação da matriz de energia elétrica para o Brasil.

9. Relação da Distribuição Geográfica dos Insumos para a Produção do Bioconcreto em Diferentes Localidades do Brasil

A próxima etapa foi avaliar como os resultados mudam quando a disponibilidade dos insumos utilizados no BBC varia considerando os diferentes estados brasileiros, como é apresentado na Figura 18.

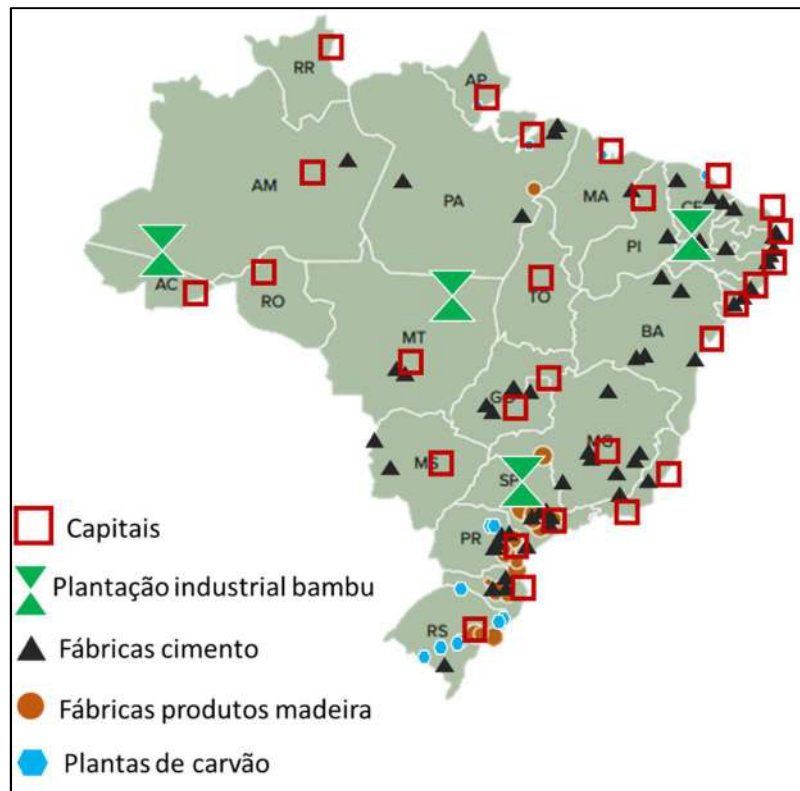


Figura 18 – Mapeamento dos principais insumos utilizados para a produção do BBC.

Para as partículas de bambu foram consideradas quatro localizações hipotéticas, sendo: (1) o Acre, por ter a maior reserva natural de bambu no Brasil e por ser o único estado que já possui uma Política Estadual de Bambu; (2) o estado de São Paulo, por ser uma região que já possui muitas empresas de plantação comercial de bambu e pelo fato de estar concentrado os maiores polos industriais do país e desenvolvimento econômico (DRUMOND; WIEDMAN, 2017); (3) o estado do Mato Grosso por ser localizada em uma região central do país e ser caracterizada por grande atividade agropecuária; (4) o estado do Ceará próximo a outros estados do Nordeste (Piauí, Pernambuco e Paraíba), onde o Grupo João Santos já possui plantações comerciais de bambu (DUARTE; MORAES, 2007). Adotou-se que a localização dos locais de geração de resíduos de

bambu e das fábricas de reciclagem é de 50 km e que a produção dos BBC ocorre nas capitais do Brasil.

Foi também considerado a disponibilidade da cinza volante e cimento Portland, com base nos dados do PBMC (2018). Para o metacaulim e do aditivo CaCl₂ foi considerado a média das distâncias consideradas anteriormente (Quadro 9). As distâncias consideradas para cada localidade estão apresentadas no Quadro 14. Essa análise possibilitará saber qual é o impacto do transporte dos insumos utilizados e saber qual a região seria a mais adequada para pensar no desenvolvimento industrial do BBC. Foi também avaliado como a eficiência do transporte influência aos resultados finais, sendo considerados os dados utilizados no item 10.2.

Quadro 14 – Distâncias de transporte (A2) dos insumos das fábricas/loais de produção até a fábrica de BBC.

Cidades - Estados	Partículas de bambu (km)	Cinza Volante (km)	Cimento (km)	Metacaulim (km)	CaCl₂ (km)
Manaus/AM	1505	1984	345	233	467
Boa Vista/RR	2256	2151	748	233	467
Rio Branco/AC	197	2776	1399	233	467
Belém/PA	1659	884	186	233	467
Palmas/TO	907	925	576	233	467
Porto Velho/RO	632	3046	888	233	467
São Luís/MA	1112	556	356	233	467
Teresina/PI	646	732	125	233	467
Fortaleza/CE	405	292	176	233	467
Natal/RN	512	228	154	233	467
Recife/PE	580	362	137	233	467
João Pessoa/PB	517	487	135	233	467
Aracaju/SE	703	610	157	233	467
Maceió/AL	645	708	146	233	467
Salvador/BA	783	806	140	233	467
Cuiabá/MT	1156	1635	97	233	467
Campo Grande/MS	1437	722	229	233	467
Goiânia/GO	933	789	35	233	467
Brasília/DF	1035	933	189	233	467
São Paulo/SP	45	254	122	233	467
Rio de Janeiro/RJ	428	889	318	233	467
Vitória/ES	951	1454	174	233	467
Belo Horizonte/MG	583	626	130	233	467

Cidades - Estados	Partículas de bambu (km)	Cinza Volante (km)	Cimento (km)	Metacaulim (km)	CaCl ₂ (km)
Curitiba/PR	424	49	150	233	467
Florianópolis/SC	717	285	167	233	467
Porto Alegre/RS	1153	36	136	233	467

10. Unidade Funcional Considerando Critérios de Desempenho Térmico e Acústico

10.1. Com base no Desempenho do Sistemas Construtivos Convencionais

Para o ajuste da UF considerando o desempenho térmico e acústico foi realizado com base nos critérios da NBR 15575 (ABNT, 2013) para o sistema de vedação vertical, nesse caso considerando a aplicação do BBC em uma fachada. Foram calculados os valores de Resistência Térmica (Rt) e Capacidade térmica (Ct) para o desempenho térmico e Índice de Redução Sonora Ponderada (Rw) para o desempenho acústico. Esses critérios foram calculados com base nas propriedades de massa específica, condutividade térmica e espessuras das camadas consideradas. Para o Rw foi utilizada a lei das massas, conforme equações 4.1, 4.2 e 4.3. No Quadro 15 são resumidos os sistemas avaliados.

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{t_i} + \left(\frac{1}{R_{si} + R_{se}} \right) \quad (4.1)$$

$$Ct = \sum_{i=1}^n \rho_i \times s_i \times t_i \quad (4.2)$$

$$R_w = 12 + 5,3 \times M^{\frac{1}{3}} \quad (4.3)$$

Onde,

λ_i é a condutividade térmica de cada material (W/(m.K)).

t_i é a espessura de cada camada de material (m).

R_{si} é a resistência térmica superficial externa que é 0,04 (m².K)/W

R_{se} é a resistência térmica superficial interna que é 0,13 (m².K)/W

ρ_i é a densidade de cada material utilizados nas camadas (kg/m³)

s é o calor específico de cada material utilizado nas camadas (kJ/(kg.K))

M é a massa por metro quadrado de dado sistema construtivo (kg/m²)

Quadro 15 – Dados para avaliação dos critérios de desempenho dos sistemas estudados.

Cod.	Material	Espessura (mm)	Massa específica (kg/m ³)	Massa da parede (kg/m ²)	Condutividade térmica (W/ (m.K))	Calor específico (kJ/(kg.K))
1. Bioconcreto de bambu 30/30/40 sem revestimento						
1	BBC 30/30/40	100/150/200	838	83,8/125,7/167,6	0,38	1,2
2. Bioconcreto de bambu 30/30/40 com revestimento						
2	Revestimento argamassado	10	1900	19,0	1,15	1,0
1	BBC 30/30/40	80/ 130 /180	838	67,0/108,9/150,8	0,38	1,2
2	Revestimento argamassado	10	1900	19,0	1,15	1,0
3. Alvenaria estrutural de blocos de concreto						
6	Revestimento argamassado	25	1900	47,5	1,15	1,0
5	Junta de argamassa	10	1900	20,9	1,15	1,0
4	Bloco de concreto	140	2300	147,5	1,75	1,0
6	Revestimento argamassado	25	1900	47,5	1,15	1,0
4. Alvenaria estrutural de blocos cerâmicos						
6	Revestimento argamassado	25	1900	47,5	1,15	1,0
5	Junta de argamassa	10	1900	20,9	1,15	1,0
7	Bloco cerâmico	140	1600	86,3	0,90	0,92
6	Revestimento argamassado	25	1900	47,5	1,15	1,0

Dessa forma foram calculadas novas espessuras do BBC (com e sem a camada de revestimento de argamassa) que foram dimensionadas a fim de atingir os mesmos valores dos critérios de Rt, Ct e Rw, considerando três cenários: (1) atendimento da NBR 15575 (ABNT, 2013) e dos valores dos sistemas de alvenaria de (2) bloco de concreto e (3) cerâmico, conforme é apresentado no Quadro 16.

Quadro 16 – Novas espessuras como unidade funcional considerando critérios de desempenho térmico e acústico.

Critério Referência	Referência	Bioconcreto com revestimento de argamassa (cm)	Bioconcreto sem revestimento de argamassa (cm)
U = 2,5 W/m ² .K	ABNT NBR 15575:2013	8,08 cm (BBC) + 2,00 cm (argamassa)	8,74 cm (BBC)
Ct = 130 kJ/m ² .K	ABNT NBR 15575:2013	9,15 cm (BBC) + 2,00 cm (argamassa)	12,93 cm (BBC)
Rw = 35 dB	ABNT NBR 15575:2013	5,5 cm (BBC) + 2,00 cm (argamassa)	10,1 cm (BBC)
U = 2,7W/m ² .K	Alvenaria de concreto	6,95cm (BBC) + 2,00 cm (argamassa)	7,61 cm (BBC)
Ct = 245 kJ/m ² .K	Alvenaria de concreto	20,59 cm (BBC) + 2,00 cm (argamassa)	24,36 cm (BBC)
Rw = 44 dB	Alvenaria de concreto	22,02 cm (BBC) + 2,00 cm (argamassa)	26,50 cm (BBC)
U = 2,2W/m ² .K	Alvenaria cerâmica	10,15 cm (BBC) + 2 cm (argamassa)	10,81 cm (BBC)
Ct = 194 kJ/m ² .K	Alvenaria cerâmica	15,51 cm (BBC) + 2,00 cm (argamassa)	19,29 cm (BBC)
Rw = 38 dB	Alvenaria cerâmica	9,52cm (BBC) + 2,00 cm (argamassa)	14,20 cm (BBC)

10.2.Com base no Desempenho do Bioconcreto de Bambu

Outra alternativa, é quando a espessura do BBC e desempenho térmico ou acústicos são fixados e comparados com sistemas construtivos convencionais. Já que o desempenho térmico do BBC é superior em termos da transmitância térmica (U), serão adicionadas camadas de isolantes térmicos industriais para atender a equivalência funcional.

Dessa forma, foram considerados os valores U de 2,38 W/m².K e 1,40 W/m².K (parede de BBC de 10 cm e 20 cm, com núcleo de BBC de 8 cm 18 cm e revestimentos argamassados nas faces de 1 cm, respectivamente). Como os sistemas construtivos convencionais possuem maior valor de U, foram adicionados materiais isolantes térmicos normalmente utilizados no mercado (lã de rocha - LR, lã de vidro - LV e poliestireno expandido – EPS) para que todos os sistemas ficassem com o mesmo valor de U, sendo

calculados paredes de alvenaria de blocos cerâmicos (U original de 2,40 W/m².K) e de concreto (U original de 2,68 W/m².K), com a adição dos isolantes. As propriedades térmicas dos isolantes foram obtidas na ABNT NBR 15220-2:2008. Foram avaliados os cenários com a inclusão das seguintes quantidades de isolantes, apresentados no Quadro 17.

Quadro 17 – Espessura de isolantes térmicos adicionados considerando diferentes espessuras da parede do BBC.

Cenários	Espessura isolante (cm) – BBC 10 cm/20 cm
Alv. Cerâmica - LR	0,08/2,1
Alv. Cerâmica - LV	0,08/2,1
Alv. Cerâmica - EPS	0,07/1,8
Alv. Concreto - LR	0,10/2,3
Alv. Concreto - LV	0,10/2,3
Alv. Concreto - EPS	0,90/2,0

Para o inventário do ciclo de vida desses isolantes foi considerado os dados disponíveis no Ecoinvent v. 3.3 (Quadro 18). Foi adotado que acontece a substituição de pelo menos uma vez ao longo do ciclo de vida de 50 anos da edificação, sendo substituído também a camada de argamassa externa. Foram também quantificados o transporte e fim de vida dos isolantes.

Quadro 18 – Insumos e atividades considerados na modelagem dos isolantes térmicos.

Insumos e atividades	Datasets e fontes
Lã de rocha	<i>Stone wool {GLO}</i>
Lã de vidro	<i>Glass wool mat {GLO}</i>
EPS	<i>Polystyrene foam slab for perimeter insulation {GLO}</i>
Incineração resíduos de bambu	<i>Electricity, for reuse in municipal waste incineration only {RoW} treatment of waste wood, untreated, municipal incineration</i>
Produção de energia elétrica [evitada]	<i>Electricity, médium voltage {BR}</i>
Transporte	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {GLO}</i>
Fim de vida lã de rocha e lã de vidro	<i>Inert waste {RoW} treatment of, sanitary landfill</i>
Fim de vida EPS	<i>Waste expanded polystyrene {GLO}</i>

11. Avaliação do Desempenho Termoenergético de Edificações

11.1. Arquivos Climáticos Originais

Por meio de simulações termoenergéticas, variáveis de desempenho térmico e energético das edificações podem ser quantificadas e visualizadas, entre elas: temperatura, umidade, movimento do ar, insolação, sombreamento, níveis de iluminação e equipamentos utilizados (eletrodomésticos, computadores, etc.).

É possível avaliar termodinamicamente, a partir de considerações na variação do clima externo e padrão de ocupação da edificação, além dos efeitos de inércia térmica ao longo do tempo. Nesse tipo de simulação é possível testar como que diferentes estratégias de projeto, desde orientação, formas, tipos de sistemas construtivos, entre outros, impactam no consumo de energia e emissões da edificação, e, assim, é possível prever eventuais formas de economia e mitigação de impactos ambientais (SANTOS et al., 2017).

A simulação termoenergética foi realizada de acordo com as normas NBR 15575 (ABNT, 2013) e NBR 15220 (ABNT, 2005), sendo utilizado o software DesignBuilder v. v6.1.0.006. Foram utilizados dados climáticos coletados do Laboratório de Eficiência Energética de Edificações (LabEEE, 2019). O DesignBuilder é um software específico de avaliação termoenergética de edificações, que possui uma interface amigável e atende a norma ANSI/ASHRAE Standard 140, que é utilizada para avaliação de programas de simulações termoenergéticas de edificações.

Foram consideradas diferentes Zonas Bioclimáticas (ZB) brasileiras (ZB1 – Curitiba, ZB3 – São Paulo, ZB4 – Brasília, ZB6 – Campo Grande, ZB7 – Teresina, ZB8 – Rio de Janeiro), dois tipos de absortância (0,3 e 0,6). Foram escolhidas essas cidades por serem localizadas em diferentes ZB (considerando ZB extremas e intermediárias), por serem capitais de estados e terem seus arquivos climáticos disponíveis. Essas cidades já foram avaliadas nos estudos de CALDAS *et al.* (2017).

Foi realizado para o BBC 30/30/40 por ser o de menor impacto ambiental e apresentar melhor desempenho térmico, considerando as três espessuras finais das paredes das fachadas (10, 15 e 20 cm) e duas configurações, com e sem revestimento de argamassa (espessura de 1 cm). As paredes internas foram consideradas com 10 cm de espessura (com revestimento de argamassa).

A avaliação foi realizada para um projeto de edificação típico do programa “Minha Casa, Minha Vida”, apresentado na Figura 19.

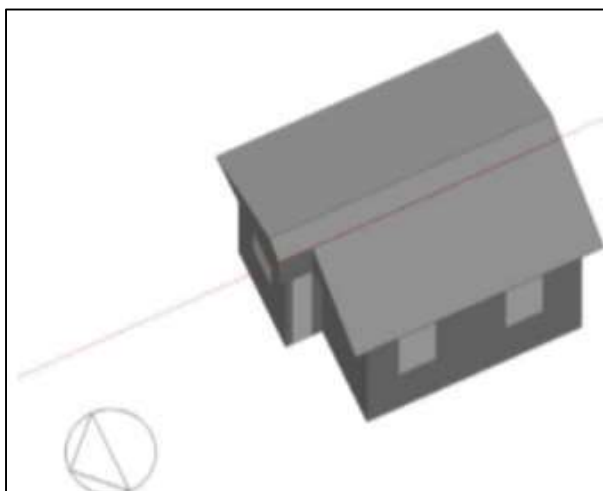


Figura 19 – Modelo tridimensional do projeto de edificação residencial unifamiliar avaliado no software DesignBuilder.

Foram inseridos como dados de entrada, os de parâmetros da edificação (localização, implantação, orientação), conforto do usuário (taxa de ocupação, vestimentas, idade, sexo, metabolismo, etc.) e construtivos, propriedades e características dos sistemas construtivos avaliados (espessura, condutividade térmica, massa específica, calor específico e absorvância), conforme dados da NBR 15220 (ABNT, 2005).

Foram definidas temperaturas de *set-point*, para equipamentos de climatização (ar condicionado), a partir das temperaturas neutras (temperatura onde o conforto térmico é atingido), que acima dessa temperatura o equipamento de ar é automaticamente acionado, sendo que a energia consumida passa a ser contabilizada. Essas temperaturas foram definidas com base nas equações apresentadas por PEREIRA e ASSIS (2010) que fizeram uma avaliação para o contexto brasileiro. Neste sentido, sistemas construtivos, com melhor desempenho térmico, tendem a diminuir o consumo de energia de equipamentos de climatização, e conseqüentemente reduzindo os impactos ambientais da edificação.

O processo de simulação termoenergética e quantificação dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida das edificações avaliadas, será realizado com base no método utilizado em diferentes estudos como o de INVIDIATA e GHISI (2016) e CALDAS et al. (2017b). As informações do modelo são encontradas no Quadro 19.

Quadro 19 – Dados de entrada utilizados na simulação computacional no DesignBuilder.

Item	Caracterização
Forma e dimensão da edificação	
Área bruta de piso (m ²)	45
Orientação	Orientação Oeste parra os dormitórios
Vedações externas	
Transmitância térmica - U (W/m ² .K)	BBC 10 cm – 2,5. BBC 20 cm – 1,6. Alv. Concreto – 2,7. Alv. Cerâmica – 2,2.
Capacidade térmica - Ct (kJ/m ² .K)	BBC 10 cm – 118. BBC 20 cm – 219. Alv. Concreto – 245. Alv. Cerâmica – 194.
Absortância solar	0,3 e 0,6
Cobertura	
Transmitância térmica - U (W/m ² .K)	1,8
Capacidade térmica - Ct (kJ/m ² .K)	21
Absortância solar	0,5
Piso	
Transmitância térmica - U (W/m ² .K)	3,8
Capacidade térmica - Ct (kJ/m ² .K)	314
Janelas (Vidro)	
Transmitância térmica (W/m ² .K)	5,8
Fator solar	0,61
Infiltração de ar (ren/h)	1,0
CoP equipamentos de ar condicionado	2,8 (Classe C PROCEL).
Temperaturas de setpoint do ar condicionado	
Temperaturas neutras nas Cidades	Curitiba – 23,1°C São Paulo – 23,7°C Brasília – 24,3°C Campo Grande – 25,0°C Teresina – 26,3°C Rio de Janeiro – 24,9°C

11.2. Arquivos Climáticos Futuros

Foi avaliado também como será o desempenho termoenergético dessas edificações, caso os BBC sejam utilizados em seus fechamentos verticais, para cenários futuros de

mudanças climáticas, em que temperatura média do planeta, inclusive para as cidades brasileiras avaliadas, aumentará de acordo com dados do IPCC. Para isso, é necessário que os arquivos climáticos originalmente utilizados na simulação (apresentada anteriormente) sejam convertidos em arquivos climáticos futuros.

Para essa conversão foi utilizada a ferramenta *Climate Change World Weather File Generator*, apresentada no capítulo de Revisão Bibliográfica. Esse método foi escolhido principalmente pelos seguintes fatores: (1) são executadas modificações em todas as variáveis presentes no arquivo climático base (radiação solar, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, precipitação, etc.); (2) o método que utiliza rotinas desenvolvidas a partir de fontes especializadas em assuntos referentes a cada variável em questão (CASAGRANDE; ALVAREZ, 2013). Essa ferramenta já foi utilizada em outros estudos brasileiros como CASAGRANDE E ALVAREZ (2013) e INVIDIATA e GHISI (2016), e diversos estudos internacionais, como de WILDE e TIAN (2009), WANG *et al.* (2010), CHAN (2011), WANG e CHEN (2014), WANG *et al.* (2017) e SÁNCHEZ-GARCÍA *et al.* (2019).

Foram considerados os cenários a partir dos anos 2020 (período entre 2011 e 2040), 2050 (período entre 2041 e 2070) e 2080 (período entre 2071 e 2100), sendo convertidos os arquivos climáticos das seis cidades avaliadas anteriormente, Curitiba, São Paulo, Brasília, Campo Grande, Teresina e Rio de Janeiro.

De posse dos novos arquivos climáticos, as duas edificações foram novamente simuladas no software DesignBuilder, sendo avaliados vedações de BBC com revestimento de argamassa, com 10 cm (pior caso) e 20 cm (melhor caso) e os sistemas construtivos convencionais (alvenaria de blocos de concreto e cerâmico).

Essa avaliação é importante para saber qual o potencial do uso dos BBC para à adaptação das edificações às mudanças climáticas.

12. Avaliação para a Edificação

Nesta etapa foram avaliados quatro cenários, utilizando a FADCE, para os próximos 50 anos (2020 a 2070), que estão resumidos no Quadro 20, sendo considerados as seis zonas bioclimáticas brasileiras apresentadas anteriormente, a descarbonização da matriz de energia elétrica do Brasil e aumento de temperatura devido às mudanças climáticas.

Foi considerado somente o consumo de energia para climatização artificial, por esse ser o único diretamente afetado pela diferença no desempenho térmico dos fechamentos verticais avaliados. Vale ressaltar que na modelagem computacional foram considerados os outros equipamentos e iluminação pelo fato do aumento de carga térmica que eles trazem, influenciando no consumo de energia para climatização. No entanto o consumo de eletricidade deles não foi contabilizado.

Quadro 20 – Cenários considerados para a quantificação do consumo de energia para climatização artificial da edificação.

Cenários	Aumento de temperatura devido às mudanças climáticas	Descarbonização da matriz de energia elétrica
Básico	-	-
Mudanças Climáticas	x	-
Descarbonização da matriz de energia elétrica	-	x
Mudanças Climáticas e Descarbonização da matriz de energia elétrica	x	x

Para a modelagem da matriz de energia elétrica brasileira nos próximos anos, foram utilizados os dados de LA ROVERE *et al.* (2016), apresentados no Quadro 21. A modelagem foi realizada no software SimaPro. Os cenários de descarbonização da matriz de energia elétrica também foram considerados nas etapas de reposição dos materiais e fim de vida da edificação.

Quadro 21 – Cenários considerados descarbonização da matriz de energia elétrica (LA ROVERE *et al.*, 2016).

Fontes de energia elétrica	Atual	2020-2040	2041-2070
Hidroelétrica	68%	58%	46%
Nuclear	1%	2%	1%
Gás Natural	8%	7%	5%
Carvão Nacional	1%	1%	1%
Carvão Importado	1%	1%	1%
Óleo Combustível	2%	1%	0%
Óleo Diesel	1%	0%	0%
Outros Não renováveis	0%	0%	0%
PCH ¹	3%	4%	4%
Bagaço	7%	7%	5%
Biomassa	1%	2%	2%

Fontes de energia elétrica	Atual	2020-2040	2041-2070
Eólica	6%	10%	12%
FV ² distribuída	0%	4%	7%
FV ² centralizada	0%	3%	8%
Solar Hipotérmica	0%	2%	6%
Total	100%	100%	100%

¹PCH – Pequena central hidrelétrica. ²FV – Fotovoltaica.

Os impactos ambientais da edificação foram calculados de acordo com a equação 3.8.

Para a EC foi utilizado o método de ACVd e do IPCC.

$$TIA_{ZB} = (I_{Ap} \times A_p) + (\sum_i^n E_{c_n} \times a_n \times IE_n) \quad (3.7)$$

TIA_{ZB} – Total Impacto Ambiental para uma dada zona bioclimática (EC, ODP, AP, EP, POCP, ADP-e, ADP-ff/edificação).

I_{Ap} – Impacto ambiental das etapas de produção, construção, uso e fim de vida de cada tecnologia para a parede (EC, ODP, AP, EP, POCP, ADP-e, ADP-ff/m²).

A_p – total de áreas de paredes da edificação (m²/edificação).

E_{c_n} – Consumo de energia para climatização artificial para o ano n (kWh/ano).

a_n – ano n.

IE_n – Impacto ambiental para a produção de energia elétrica para o ano n (EC, ODP, AP, EP, POCP, ADP-e, ADP-ff).

Sendo que $i = 0$ e $n = 50$.

O Consumo de energia para climatização artificial anual para cada zona bioclimática e para os anos avaliados estão apresentados no Quadro 22. Esses valores foram encontrados com base na simulação computacional realizada no software *DesignBuilder* e utilizando dados climáticos obtidos na ferramenta *Climate Change World Weather File Generator*, que foram apresentados anteriormente.

Quadro 22 – Consumos anuais de energia elétrica para as seis cidades avaliadas e cenário de mudanças climáticas.

BBC - 10 cm (kWh/ano)						
Anos	Curitiba	São Paulo	Brasília	Campo Grande	Teresina	Rio de Janeiro
Atual	619	602	1453	1752	4243	1943
2020-2040	1058	1109	1956	2813	4985	2941
2041-2070	1408	1479	2424	3456	5210	3378
BBC - 20 cm (kWh/ano)						
Anos	Curitiba	São Paulo	Brasília	Campo Grande	Teresina	Rio de Janeiro
Atual	391	508	1300	1453	3699	1604
2020-2040	886	921	1746	2417	3964	2534
2041-2070	1223	1278	2132	2922	4235	2954

Alvenaria de Blocos de Concreto (kWh/ano)						
Anos	Curitiba	São Paulo	Brasília	Campo Grande	Teresina	Rio de Janeiro
Atual	671	630	1501	1816	4395	1885
2020-2040	1090	1150	2029	2947	5234	3004
2041-2070	1435	1532	2499	3666	5761	3505
Alvenaria de Blocos Cerâmicos (kWh/ano)						
Anos	Curitiba	São Paulo	Brasília	Campo Grande	Teresina	Rio de Janeiro
Atual	643	612	1521	1719	4081	1965
2020-2040	1130	1167	2015	2873	5129	2857
2041-2070	1471	1509	2460	3467	5772	3432

A avaliação foi realizada para as paredes de BBC 30/30/40, para as espessuras de 10 e 20 cm (extremos) e alvenaria de blocos de concreto e cerâmico.

13. Sumário do Capítulo

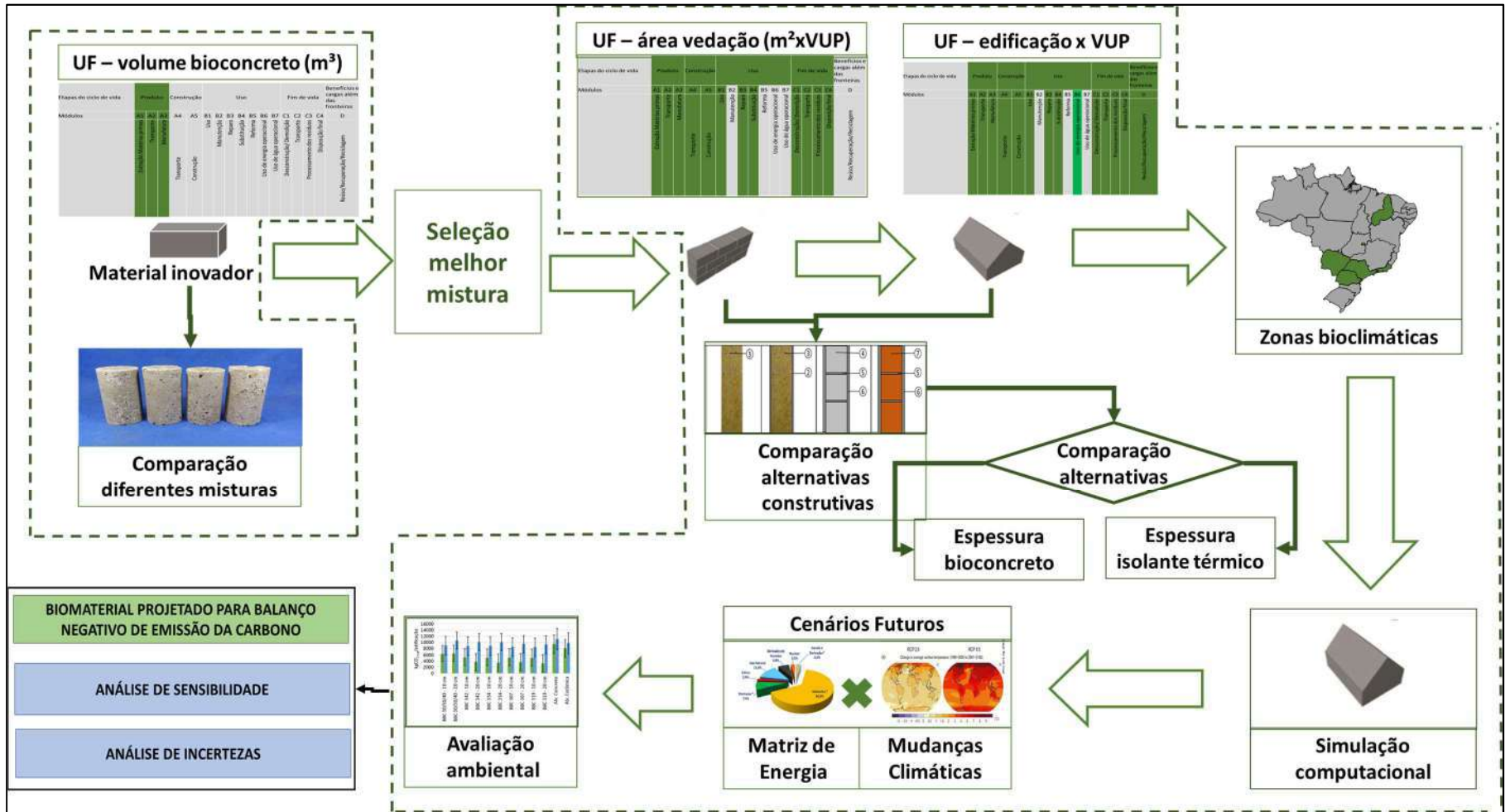
Neste capítulo foi apresentado como a metodologia de ACV, está estruturada e organizada, sendo apresentadas as principais normas utilizadas para um estudo de ACV. Posteriormente, foi discutido como os estudos de ACV no setor da construção civil estão sendo realizados de acordo com a literatura pesquisada e que mostraram uma tendência de seguirem as diretrizes das normas europeias EN 15978 (CEN, 2011) e EN 15804 (CEN, 2012). Neste sentido, optou-se por seguir nesta tese essas normas, com as adaptações necessárias aos estudos de casos pesquisados.

Como o estudo em questão trata da avaliação de um biomaterial foi utilizado o método desenvolvido por LEVASSEUR *et al.* (2010) que é capaz de contabilizar o carbono biogênico e diferentes fatores de caracterização ao longo do tempo para a categoria de EC. Também foi empregado o método CML-IA Baseline de acordo com a EN 15978 (CEN, 2011), para a avaliação dessa categoria como também de outras categorias de impacto.

No Inventário do Ciclo de Vida (ICV) o Ecoinvent v. 3.3 foi o principal banco de dados utilizado com as devidas adaptações à realidade brasileira. Foi realizada análise de sensibilidade para as distâncias de transporte dos materiais e fim de vida, parâmetros do processo carbonatação e carbono biogênico.

Posteriormente, foram apresentados os parâmetros de entrada para a modelagem do desempenho termoenergético de um projeto de edificação habitacional unifamiliar,

quando as diferentes configurações de BBC são utilizadas nos fechamentos verticais. Para isso foi realizada simulação computacional no software DesignBuilder. Para a avaliação do potencial dos BBC para a adaptação das edificações às mudanças climáticas, foram realizadas novas simulações considerando arquivos climáticos futuros, para os anos de 2020, 2050 e 2080, com o emprego da ferramenta *Climate Change World Weather File Generator*. O resumo das principais etapas a serem seguidas, de acordo com a FADCE, está apresentado na Figura 20.



*UF – Unidade Funcional. VUP – Vida Útil de Projeto.

Figura 20 – Aplicação da FADCE para avaliação do BBC.

14. Referências

- Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL, 2019. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/tarifas-consumidores>>. Acesso em 04 de nov. 2019.
- Almeida, J. A. S., Santos, M. I. V., Tadeu, A. J. B., Simões, N. A. V., Rama, J. P. F. Development of innovative sustainable walls composed of byproducts of rice. In: Lahr, F. A., Savastano Junior, H., Fiorelli, J. (Org.). Non-conventional Building Materials based on agro-industrial wastes. Tiliform, 1 ed. Bauru, São Paulo, Brazil, 2015.
- Anand, C. K., Amor, B., 2017. Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renew. Sus. Energy Rev.* 67, (1), 408-416.
- Andreola, V., Da Gloria, M. Y., Jantos, D. O. J., Toledo Filho, R. D., 2019. Partial Replacement Of Cement By Combination Of Fly Ash And Metakaolin In Bamboo Bio-Concretes. 3rd International Conference on Bio-based Building Materials & 1st Conference on ECOlogical valorisation of GRAnular and FIBrous materials. June 21th - 23th 2019 Clermont-Ferrand, France.
- Andreola, V.M.; Gloria, M. Y. R.; Toledo Filho, R. D. Behaviour Under Bending Loads of Workable Bamboo Bio-Concrete. In: 17th International Conference - NOCMAT 2017 - Non-conventional Materials and Tecnhologie, 2017, Mérida. Behaviour Under Bending Loads Of Workable Bamboo Bio-Concrete, 2017. v. 1. p. 66-78.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. NBR ISO 14044: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. NBR 15220: Desempenho Térmico de Edificações. Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. NBR 12721. Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. NBR 15575. Edificações Habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.
- Balanco Energético Nacional (BEN). Relatório Síntese ano base 2017. Brasília-DF, 2018.
- Borges, P. H. R; Lourenco, T, M. F; Foureaux, A. F. S.; Pacheco, L. S. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). *Ambient. constr.* 2014, vol.14, n.2 pp.153-168.
- Bribián, I. Z., Capilla, A. V., Usón, A., 2011. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Build. Env.* 46, 1133-1140.

- Broeren, M. L. M, Dellaert, S. N. C., Cok, B., Patel, M. K., Worrell, E., Shen, L., 2017. Life cycle assessment of sisal fibre: Exploring how local practices can influence environmental performance. *J. Clean. Prod.* 149, 818-827.
- Browick, 2018. Brock Commons Tallwood House, University of British Columbia. As Environmental Building Declaration According to EN 15978 Standard.
- Bueno, C. Hauschild, M. Z., Rossignolo, J. A., Aldo Roberto Ometto, A. R., Mendes, N. C., 2016. Sensitivity analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment methods: a case study on building materials. *J. Clean. Prod.* 112 (20), 2208-2220.
- Buyle, M., Braet, J., Audenaert, A., 2013. Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renew. Sus. Energy Rev.* 29, 379-388.
- 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 : A review. *Renew. Sus. Energy Rev.* 29, 394-416.
- Caixa Econômica Federal. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. Tabela de Custos de Composições Analítica. 2018. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 18 abr. 2018.
- Caldas et al. a, 2017. Caldas, L. R., da Gloria., M. Y., Santos, D. J., Andreola, V., Pepe, M., Toledo Filho, R. D., 2017. Carbon footprint of bamboo particles, rice husk and wood shavings-cement composites. 2nd International Conference on Bio-based Building Materials & 1st Conference on ECOlogical valorisation of GRANular and FIBrous materials. June 21th - 23th 2017 Clermont-Ferrand, France.
- Caldas, L. R., Pittau, F., Andreola, V., Habert, G., Saraiva, A. Toledo Filho, R. D., 2019. Dynamic life cycle carbon assessment of three bamboo bio-concretes in Brazil. 3rd International Conference on Bio-based Building Materials & 1st Conference on ECOlogical valorisation of GRANular and FIBrous materials. June 21th - 23th 2019 Clermont-Ferrand, France.
- Caldas, L. R., Sposto, R. M, 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. 91108, out./dez. 2017.
- Caldas, L. R.; Lira, J. S. De M. M.; Sposto, R. M. 2017. Avaliação do ciclo de vida de habitações de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e painéis pré-moldados de concreto considerando diferentes zonas bioclimáticas. *LALCA - Revista Latino-amer. em Aval. do Ciclo de Vida*, Brasília, v. 1, n. 1, p. 138-167.
- Caldas, L. R.; Toledo Filho, R. D., 2018 Avaliação do Ciclo de Vida de materiais cimentícios utilizados no Brasil: estudo para argamassas, graute e bloco de concreto. *R. Latino-amer. em Aval. do Ciclo de Vida*, Brasília, v. 2, n. 2, p. 34-61, jul./dez. 2018.
- Casagrande, B. G., Alvarez, C. E. de., 2013. Preparação de arquivos climáticos futuros para avaliação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edificações. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 173-187, jul./set. 2013.

- Cembureau, 2020. Cementing the European Green Deal. Reaching climate neutrality along the cement and concrete value chain by 2050.
- Chan, A. L. S., 2011. Developing Future Hourly Weather Files For Studying the Impact of Climate Change on Building Energy Performance in Hong Kong. *Energy and Buildings*, v. 43, p. 2860- 2868.
- Chau, C. K., Leung, T. M., Ng, W. Y., 2015. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. *App. Energy*. 143, 395-413.
- Chen, C, Habert, G., Bouzidi Y., Jullien A., Ventura A., 2010. LCA allocation procedure used as an initiative method for waste recycling: an application to mineral additions in concrete. *Resour Conserv Recycl*. 54 (12), 31–40.
- Collins, F, 2010. Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 15, n. 6, p. 549–556.
- Condeixa, K., Haddad, A., Boer, D., 2014. Life cycle impact assessment of masonry system as inner walls: a case study in Brazil. *Constr. Build. Mater*. 70, 141–147.
- Condeixa, K., Haddad, A., Boer, D., 2017. Material flow analysis of the residential building stock at the city of Rio de Janeiro. *J.Clean.Prod*. 149, 1249-1267.
- Dallagnol, F. S., 2012. Estimativa de teores de carbono em seis espécies de bambu por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR). Dissertação de Mestrado, UFPR, Curitiba, PR, Brasil.
- De Wilde, P., Tian, W., 2009. Preliminary Application of a Methodology For Risk Assessment of Thermal Failures in Buildings Subject to Climate Change. *Building Simulation*, p. 2077-2084.
- 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*. 145, 294 – 302.
- Drumond, P. M., Wiedman, G (Org.), 2017. *Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia*. 1. ed. - Rio de Janeiro : ICH, 2017. 655 p.
- Duarte, J., Moraes, R. *Bambu. Uma Fibra a ser Descoberta pelo Setor*. Revista o papel. 2007. http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/01-%20Kleine_bambu%20fibra%20a%20ser%20descoberta.pdf
- EC. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context*. First Edition November 2011. EUR 24571 EN. EC – European Commission. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2011.
- Escamilla, E. Z., Habert, G., 2014. Environmental impacts of bamboo-based construction materials representing global production diversity. *J. Cleaner Prod*. 69, 117-127.

Escamilla, et al., 2018. Industrial or traditional bamboo construction? Comparative Life Cycle (LCA) of Bamboo-Based Buildings. *Sustainability*, 2018, vol. 10, p. 1-14.

European Committee for Standardization. CEN EN 15804: sustainability of construction works: environmental product declarations: core rules for the product category of construction products. Brussels, 2012.

_____. CEN EN 15978: sustainability of construction works: assessment of environmental performance of buildings – calculation method. Brussels, 2011.

Frenette, C. D., Bulle, C., Beauregard, R., Salenikovich, A., Derome, D. Using life cycle assessment to derive an environmental index for light-frame wood wall assemblies. *Building and Environment*, v. 45. p. 2111-2122. 2010.

Garcia, R., Freire, F., 2014. Carbon footprint of particleboard: a comparison between ISO/TS 14067, GHG Protocol, PAS 2050 and Climate Declaration. *J. Clean. Prod.* 66, 199 – 209.

Guarnetti, R. L., 2013. Cogeração de eletricidade utilizando bambu no Brasil: Aspectos técnicos econômicos e ambientais. Tese de Doutorado, FEA-IEE-IF/USP, São Paulo, SP, Brasil.

Hossain, M.U., Poon, C.S., 2018. Comparative LCA of wood waste management strategies generated from building construction activities. *J. Clean. Prod.* 177, 387–397.

International Reference Centre for the Life Cycle of Products, Processes and Services (CIRAG). 2016. Disponível em: <<http://www.ciraig.org/en/dynco2.php>>. Acesso em 26. Mar.2018.

Invidiata, A., Ghisi, E., 2016. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil, *Energy Build.* 130 (2016) 20–32. doi:10.1016/j.enbuild.2016.07.067.

Jarre, M., Petit-Boix, A., Priefer, C., Meyer, R., Leipold, S., 2020. Transforming the bio-based sector towards a circular economy - What can we learn from wood cascading? *For. Policy Econ.* 110, 101872. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.01.017>.

Jentsch, M. F., Bahaj, A. S., James, P. A. B., 2008. Climate Change Future Proofing of Buildings: generation and assessment of building simulation weather files. *Energy and Buildings*, v. 40, n. 12, p. 2148-2168, 2008.

Joint Research Centre, 2010. Analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle assessment: background document. (ILCD Handbook). 2010.

Kamakaté, F., Schipper, L., 2009. Trends in Truck Freight Energy Use and Carbon Emissions in Selected OECD Countries from 1973 to 2005. *Energy Policy.* 37 (10), 3743-3751.

La Rovere, E. L. et al. Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Brasil até 2050. 2016.

Laboratório de Eficiência Energética de Edificações – LabEEE, 2019. Arquivos Climáticos. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/>> Acesso em 10. Jan. 2019.

Lagerblad, B. Carbon dioxide uptake during concrete life cycle: State of the art. Oslo:

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. 44, 3169-3174.

Merciai, S., et al., Inventory of country specific electricity in LCA – Brazil. Inventory report. V2. 2-0. LCA consultants, 2011.

MF Rural. Site oficial. Disponível em: <<https://www.mfrural.com.br/>> Acesso em 23 de jun. 2019.

Ministério da Ciência e Tecnologia (MCTI). Disponível em : <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html>> Acesso em: 07 de ago. 2017. Brasil, 2017.

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 de Minas e Energia (MME). Balanço Energético Nacional. Ano base 2017. Empresa de Pesquisa Energética, 2018.

Mognon, F., 2015. Avaliação Comportamental do Crescimento, Biomassa e Estoque de Carbono em Espécies de Bambu. Tese de Doutorado, UFPR, Curitiba, PR, Brasil.

Netto, L. G., 2009. Avaliação da carga e custos ambientais em uma plantação comercial de bambu: estudo de alternativas de produto final e substituição de recursos. Dissertação de Mestrado, UNIP, São Paulo, SP, Brasil.

Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas PBMC, 2018. Kahn, S., Santos, A. (Ed.). Tecnologias disruptivas de baixo carbono para setores-chave no Brasil: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. PBMC, COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.

Pereira, I. M.; Assis, E. S., 2010. Avaliação de Modelos de Índices Adaptativos Para Uso no Projeto Arquitetônico Bioclimático. Ambiente Construído, Porto Alegre, vol. 10, n. 1, p. 31-51, jan./mar. 2010.

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. 129, 117-129.

Rubio-Bellido, C., Pérez-Fargallo, A., Pulido-Arcas, J. A., 2016. Optimization of annual energy demand in office buildings under the influence of climate change in Chile Energy, 114 (2016), pp. 569-585.

- Saade, M. R. M., Silva, M. G., Gomes, V., 2015. Appropriateness of environmental impact distribution methods to model blast furnace slag recycling in cement making. *Resour. Conserv. Recy.* 99, 40-47.
- Sánchez-García, D., Rubio-Bellido, C., Río, J. J. M., Pérez-Fargallo, A., 2019. Towards the quantification of energy demand and consumption through the adaptive comfort approach in mixed mode office buildings considering climate change. *Ene. Buid.* 187, 173-185.
- Santoro, J. F., Kripka, M., 2016. Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 35-49, abr./jun.
- Santos, L. G. R., et. al. Simulação computacional termoenergética na arquitetura. Avaliação do desempenho térmico de uma edificação de ensino localizada em Brasília DF. *Arquitextos*, São Paulo, ano 17, n. 203.04, Vitruvius, abr. 2017
- Scachetti, M. T., 2016. Avaliação Consequencial do Ciclo de Vida: discussão e aplicação comparativa com abordagem atribucional. Dissertação de Mestrado, UFSCAR, São Carlos, SP, Brasil.
- Silva, D. A. L., Masoni, P., 2016. Análise crítica das principais políticas de gestão, manutenção e uso de banco de dados internacionais de inventários do ciclo de vida de produto. IBCT: Brasília, 2016.
- SINAT, 2015. Painéis maciços pré-moldados de concreto armado para paredes da VIVER. DATec N° 003-B. Ministério das Cidades, Brasil, 2015.
- Soares, N., J. Bastos, J., Dias Pereira, L., Soares, A., Amaral, A. R., Asad, E., Rodrigues, E., Lamas, F. B., Monteiro, H., Lopes, M. A. R., Gaspar, A.R. 2017. A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment. *Renew. Sus. Energy Rev.* 77, 845-860.
- Souza, D. M., Lafontaine, M., Charron-Doucet, F., Chappert, B., Kicak, K., Duarte, F., Lima, L., 2016. Comparative life cycle assessment of ceramic block, concrete block and cast-in-place reinforced concrete exterior walls. *J. Clean. Prod.* 137, 70 –82.
- Sposto, R. M., Caldas, L. R., Nabut Neto, A. C., 2016. Energia incorporada e emissões de CO2 de fachadas de Light Steel Framing (LSF) no Brasil. *Oculum Ensaios. Revista de Arquitetura e Urbanismo.* 13 (1), 40-49.
- Su, S., Li, X., YiminZhu, Y., Lin, B., 2017. Dynamic LCA framework for environmental impact assessment of buildings. *Ener. Build.* 149, 310-320.
- Van der Lugt P.; Vogtländer J. The environmental impact of industrial bamboo products. Delft: INBAR International Network For Bamboo and Rattan, Technical University Delft; 2015.
- Wang, H., Q. Chen, Q., 2014. Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States. *Energy Build*, 82 (2014), pp. 428-436.

Wang, X., Chen, D.; Ren, Z., 2010. Assessment of climate change impact on residential building heating and cooling energy requirement in Australia. *Building and Environment*, n. 45, p. 1663-1682, 2010.

Weidema, B. O., Ekvall, T. Guidelines for application of deepened and broadened LCA: consequential LCA. Chapter for CALCAS project, 2009. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/8be5/9252f6790328a6360d506df522de78bbce4c.pdf>> Acesso em 06 fev. 2019.

World Business Council for Sustainable Development (WBCS). Getting numbers right. 2018.

Apêndices 6A

Quadro A3 – Quantificação do consumo de energia elétrica no processamento de bambu no laboratório.

Atividades	Consumo de energia elétrica (kWh/kg)
Trituração primária	0,051
Trituração secundária	0,038
Moagem	0,029
Peneiramento	0,026
Remoção extrativos	0,150
Total	0,294

Quadro A4 – Atividades consideradas no inventário para a produção de concreto em uma usina típica.

Dataset Ecoinvent v. 3.3: Concrete, 20MPa {RoW} concrete production 20MPa	
Atividades e insumos	Consumo materiais e recursos (unidade/m³)
Insumos	
<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>	15,64 MJ
<i>Electricity, medium voltage {BR}</i>	4,11 kWh
<i>Fatty alcohol {GLO}</i>	0,1 kg
<i>Heat, district or industrial, natural gas {CA-QC} market for</i>	10,63 MJ
<i>Lubricating oil {GLO}</i>	0,0119 kg
<i>Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}</i>	0,024 kg
<i>Synthetic rubber {GLO}</i>	0,007 kg
Saídas para o ar	
Water/m3	0,006 m³
Saídas para a água	
<i>Chlorides, unspecified</i>	3,09E-9 kg
<i>Copper</i>	1,55E-8 kg
<i>Iron</i>	1,55E-8 kg
<i>Oils, unspecified</i>	2,32E-7 kg

Dataset Ecoinvent v. 3.3: Concrete, 20MPa {RoW} concrete production 20MPa	
Atividades e insumos	Consumo materiais e recursos (unidade/m³)
<i>Suspended solids, unspecified</i>	4,64E-7 kg
Saídas para a água	
<i>Waste concrete {RoW}</i>	24,5 kg
<i>Wastewater from concrete production {RoW}</i>	0,0348 m³

CAPÍTULO 7 - ESTUDO DE CASO PARA O BIOCONCRETO DE BAMBU: RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os principais resultados encontrados quando a FADCE é aplicada para a avaliação do BBC. Foi também realizada a discussão desses resultados com base na literatura consultada.

1. Avaliação dos Potenciais Impactos Ambientais dos Bioconcretos de Bambu Considerando o Volume Produzido (em m³)

Considerando o volume de BBC produzido de 1m³ para os traços avaliados foram encontrados os resultados apresentados nas Figuras 21 e 22.

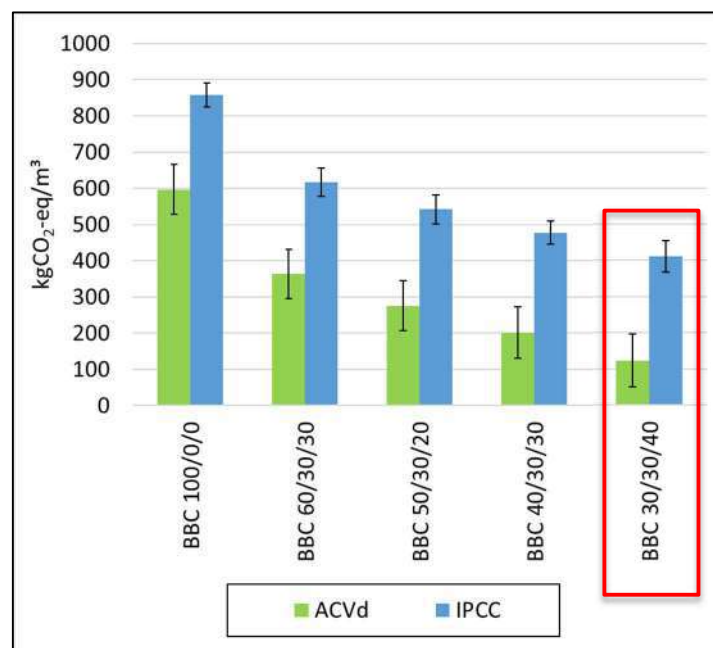


Figura 21 – Emissão de Carbono (EC) para a produção dos diferentes traços de BBC utilizando o método ACVd. As barras de erros se referem as diferentes distâncias de transporte adotadas calculadas com base no desvio padrão.

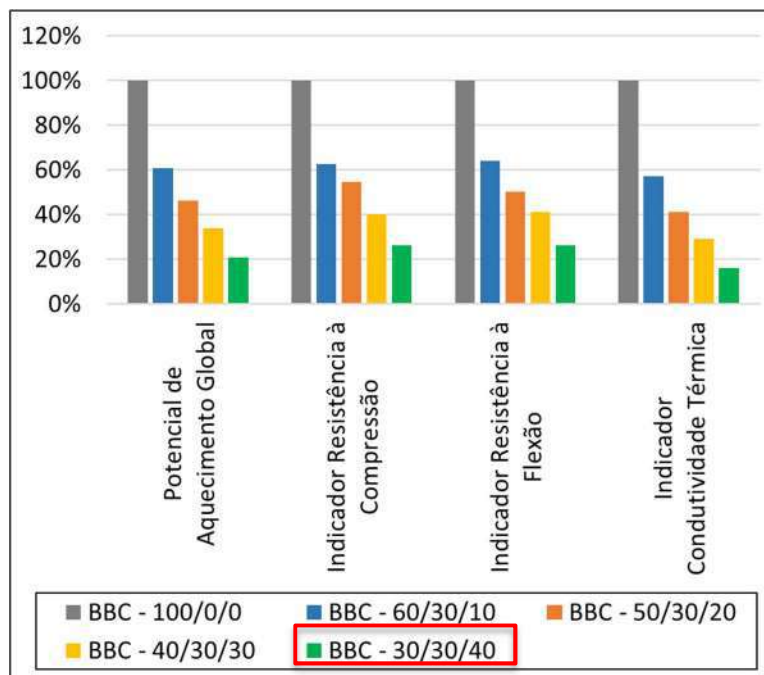


Figura 22 – Comparação dos resultados de Emissão de Carbono (EC) e Indicadores de eficiência normalizados pelo traço BBC 100/0/0.

É possível observar que o aumento de adições minerais em substituição ao cimento Portland reduz consideravelmente o impacto de EC, chegando a 80% para a mistura de BBC – 30/30/40. O uso de adições mineirais pra a redução desse impacto em concretos convencionais (para uso estrutural) já foi constatado em diversos estudos da literatura como VAN DEN HEEDE e DE BELIE (2012), CELIK *et al.* (2015) e TEIXEIRA *et al.* (2016). No entanto, para o estudo de biococretos ainda é um tema pouco explorado na literatura.

Além da redução do impacto de EC o aumento dessas adições, em especial o metacaulim e cinza volante, leva a misturas mais eficientes tanto do ponto de vista de desempenho mecânico (avaliado aqui por meio da resistência à compressão e flexão), ou seja, é emitido menor quantidade de CO₂-eq para se atingir 1 MPa de resistência à compressão ou flexão. Esse aumento de eficiência também já foi constatado nos mesmos estudos citados anteriormente. Embora haja uma redução dos valores de resistência à compressão e flexão, os resultados apontam que as misturas com mais pozolanas são mais eficientes. A diferença entre a mistura BBC – 100/0/0 e BBC – 30/40/40 chegou aproximadamente a 75% para os indicadores de resistência à compressão e flexão.

A melhoria do desempenho térmico calculado aqui por cada emissão de kgCO₂-eq pelo inverso de uma unidade de condutividade térmica também mostra que o uso de adições mineirais leva a uma maior eficiência para esse requisito. Tendo em vista que uma das

principais aplicações de BBC para o uso em edificações está relacionado ao fato desse material ter um bom desempenho térmico (devido principalmente à sua menor condutividade térmica) esses resultados reforçam essa vantagem. Diferentemente do desempenho mecânico, o aumento do teor de adições levou a uma redução dos valores de condutividade térmica, em outras palavras, haverá uma menor transferência de calor entre o ambiente externo e interno em uma edificação. Nesse sentido, a diferença entre a mistura BBC – 100/0/0 e BBC – 30/40/40 foi superior a 80%.

Nas Figuras 23 e 24 são apresentados os resultados para as outras categorias de impacto ambiental.

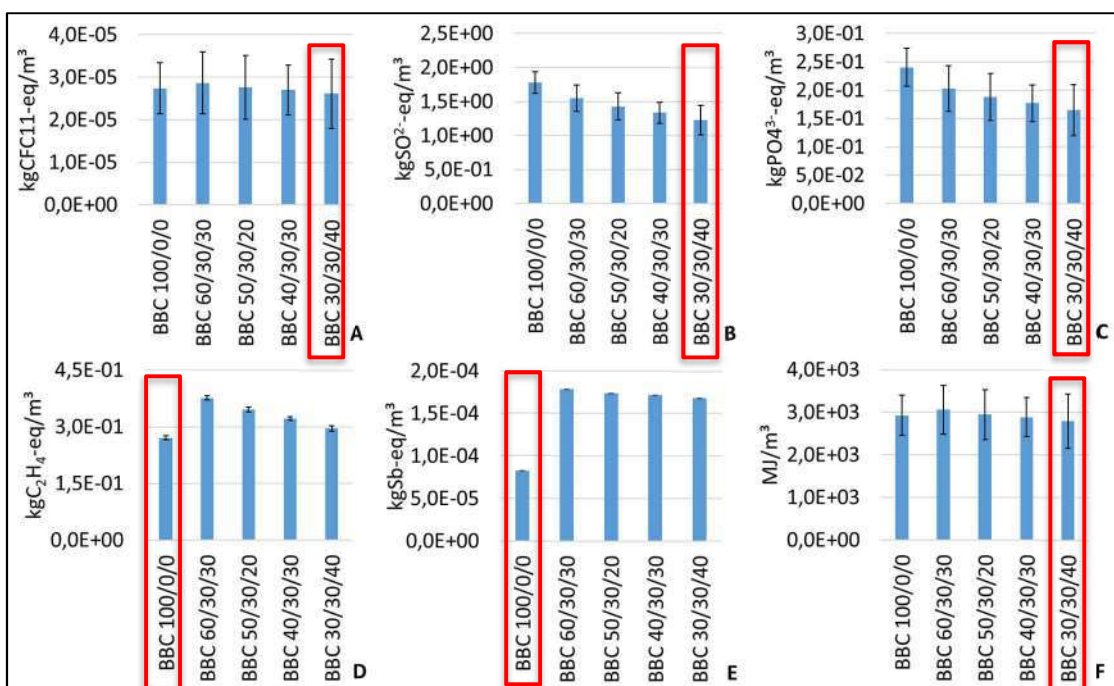


Figura 23 – Potenciais impactos ambientais do BBC utilizando o método CML-IA. As barras de erros se referem as diferentes distâncias de transporte adotadas calculadas com base no desvio padrão. (A) Depleção da camada de ozônio. (B) Acidificação. (C) Eutrofização. (D) Formação de fotooxidantes. (E) Depleção abiótica de recursos – elementos. (F) Depleção abiótica de combustíveis fósseis.

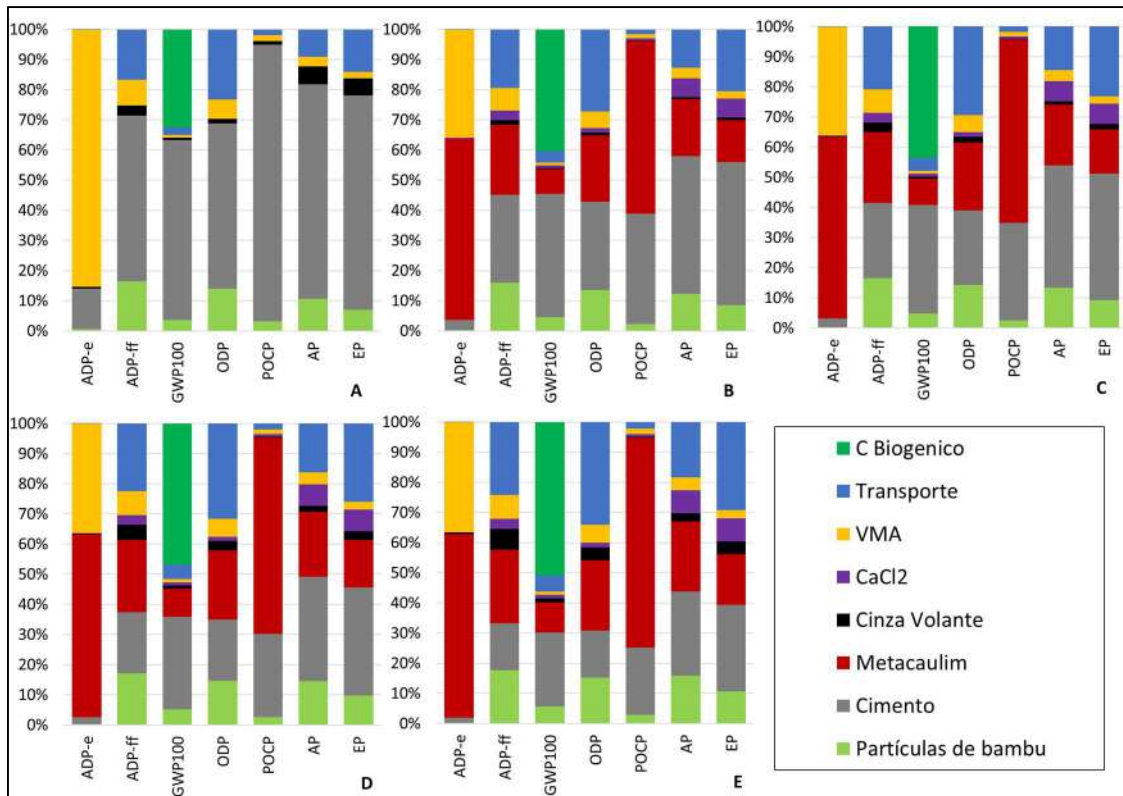


Figura 24 – Perfil ambiental dos impactos ambientais avaliados utilizando o método CML-IA. (A) BBC 100/0/0. (B) BBC 60/30/30. (C) BBC 50/30/20. (D) BBC 40/30/30. (E) BBC 30/30/40.

A partir desses resultados as próximas etapas da pesquisa se concentrarão no estudo da mistura de BBC - 30/40/40, que foi a menos impactante do ponto de vista das maiores dos impactos ambientais avaliados e eficientes do ponto de vista dos indicadores mecânicos e térmico utilizados.

2. Avaliação da Emissão de Carbono dos Bioconcretos de Bambu Considerando a Área de Parede (em m²)

Considerando a unidade funcional de 1m² com as diferentes espessuras consideradas (10 cm, 15 cm e 20 cm), os resultados para o BBC 30/30/40 estão apresentados na Figura 25, considerando os métodos de ACVd e IPCC.

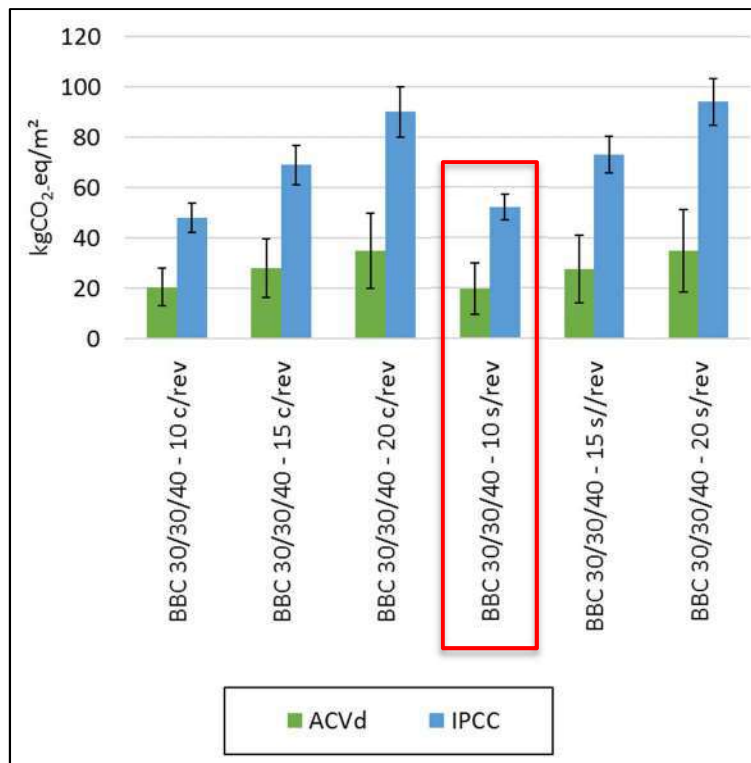


Figura 25- Comparação da Emissão de Carbono (EC) com os métodos ACVd e IPCC comparando as diferentes espessuras de parede.

Dos materiais utilizados no BBC o cimento Portland CPV-ARI é o mais impactante para a EC, devido ao processo de calcinação e produção do clínquer. Além do mais esse cimento tem poucas quantidades de adições minerais (escória granulada de alto forno, cinza volante e filer), o que faz seu impacto ser maior que outros cimentos (por exemplo CPII, CPIII e CPIV).

O metacaulim foi o segundo mais impactante seguido pelos resíduos de bambu e cinza volante. Para a metacaulim foi considerado o uso de carvão vegetal para a calcinação do caulim, de acordo com BORGES *et al.* (2014). Posteriormente, será apresentado como diferentes tipos de combustíveis utilização na calcinação do caulim influenciam nos impactos ambientais desse material. A cinza volante tem seu impacto devido ao processo de beneficiamento e moagem, que é insignificante, quando comparado aos outros insumos.

Para os resíduos de bambu, o tratamento para a transformação em partículas não é intensivo, que consiste em moagem, peneiramento e lavagem à 80°C, além desse tratamento ser realizado a partir do consumo de energia elétrica. Considerando que a matriz de energia brasileira tem uma elevada participação de fontes renováveis, superior

a 80% (com base no ano utilizado no inventário, de 2018), sendo que desse montante a maior parte é de fonte hidráulica, os impactos para EC não são elevados. O impacto para esses resíduos aumenta quando a alocação em massa é considerada, que será detalhada posteriormente.

O revestimento de argamassa teve uma participação nos impactos de EC que variou de 7% para o BBC de 20 cm a 15% para o BBC de 10 cm, considerando as etapas do ciclo de vida A1-A5 (produção dos materiais, transporte e construção da parede). Embora a argamassa seja mais impactante por m³ (319 kgCO₂-eq/m³) que o BBC 30/30/40 (123 kgCO₂-eq/m³ considerando a ACVd), a pequena espessura considerada (1 cm) faz diminuir sua participação no impacto de EC. As argamassas de revestimento consideradas aqui (chapisco e camada única) foram do tipo rodada em obra, que tem perdas consideráveis, mas pode ser melhorada com processo de execução mais racionalizados, como por exemplo utilizando rolo para o chapisco e projeção para a camada única. Essa avaliação foi realizada no artigo publicado de CALDAS *et al.* (2020), que também foi fruto dessa tese, com foco em argamassas de revestimento. Foi verificado que é possível reduzir de 15% a 64% de impactos ambientais do revestimento somente pela escolha da técnica de execução.

A variação do transporte dos materiais se mostrou como uma etapa importante para o impacto de EC, com variação chegando a mais de 25%. Tendo em vista que a maioria dos insumos utilizados para a produção do BBC, como os principais centros consumidores, estarem localizados nas regiões Sudeste e Sul do país, e tendo em vista que o Brasil é um país de dimensões continentais, o desenvolvimento de uma escala industrial do BBC nessas regiões tende a ser mais favorável e deve ser priorizada.

3. Bioconcretos de Bambu Projetados para Balanço Negativo da Emissão de Carbono

A partir da verificação de quais os insumos que mais influenciam nos impactos ambientais, foi realizada uma modelagem inversa para obtenção de BBC com EC negativa. Foram obtidos os seguintes traços de BBC, apresentados no Quadro 23. Apenas os cenários (cenários 2, 3, 5 e 6) com o aumento do teor de partículas de bambu, conseguiram ter valores negativos de EC.

Quadro 23 – Traços de bioconcreto com potencial de EC negativa (em m³).

Bioconcreto de bambu ¹	Cimento (kg)	Metacaulim (kg)	Cinza volante (kg)	Partículas de bambu (kg)	Superplastificante (kg)	Cloreto de cálcio (kg)
BBC 30/30/40 (Referência)	218	218	291	236	7	14
BBC 342 (Cenário 2)	182	182	258	342	8	12
BBC 354 (Cenário 3)	178	178	254	354	8	12
BBC 307 (Cenário 5)	120	190	346	307	8	13
BBC 319 (Cenário 6)	100	187	357	319	8	13

¹Nomenclatura de acordo com a quantidade biomassa (partículas de bambu) na mistura.

Foram apresentados dois grupos de novas formulações de BBC, o primeiro com maiores quantidades de cimento Portland e biomassa (BBC 342 e BBC 354) e o segundo com maior quantidade de adições minerais e menor quantidade de biomassa (BBC 307 e 319). Os resultados estão presentes na Figura 26.

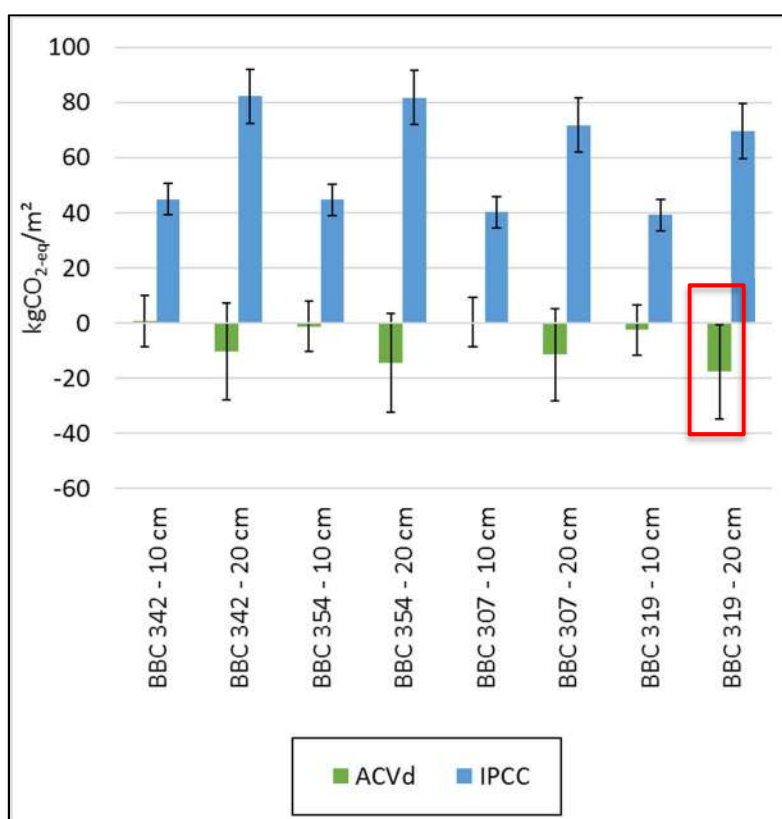


Figura 26 – Comparação da Emissão de Carbono (EC) com os métodos ACVd e IPCC para as novas formulações de BBC.

É interessante notar que o aumento de espessura da parede leva a uma diminuição da EC, chegando a -36 kgCO₂-eq/m². Ou seja, há uma diminuição do impacto de mudanças

climáticas quando há um maior consumo do BBC com essas formulações. Esse comportamento é observado em outros biomateriais, como madeira, bioconcreto de cânhamo e paredes com uso de palha (FOUQUET *et al.*, 2015; PITTAU *et al.*, 2018). Portanto, esses resultados mostram o potencial regenerativo, do ponto de vista das mudanças climáticas, caso o BBC (com valores negativos) seja utilizado como vedações verticais em edificações. Por outro lado, esse incremento da espessura de BBC levará a um aumento de outras categorias de impacto ambiental, como será apresentado posteriormente.

É importante ressaltar que essa é uma avaliação preliminar, portanto, uma limitação dessa pesquisa, que necessita, em uma próxima etapa ser direcionada ao laboratório, para se analisar a viabilidade de produção, tanto no estado fresco como endurecido. Pensando nos traços encontrados e na importância que o cimento Portland tem no desempenho dos bioconcretos (principalmente mecânico e de durabilidade), de acordo com a literatura pesquisada, é de se esperar que o BBC 342 e BBC 354 se comportem de forma mais satisfatória. Por outro lado, se for pensado em desempenho térmico (menor condutividade térmica), o aumento de biomassa tende a diminuir essa característica, como apresenta RAHIM *et al.* (2016). De qualquer forma, os traços apresentados podem ser utilizados como uma primeira aproximação para o desenvolvimento de BBC de carbono neutro ou negativo.

Foi possível verificar que os resultados gerados pela aplicação dos dois métodos possuem uma grande diferença, chegando a 170%. Quanto maior é a o teor de biomaterial (no caso o resíduo de bambu) na composição do BBC e espessura da parede (alternativa de 20 cm), maior é essa diferença, tendo em vista que na metodologia do IPCC os fluxos de carbono biogênico são quantificados como nulos. Resultados similares já foram verificados por PITTAU *et al.* (2018) e PITTAU *et al.* (2019). Esses resultados mostram que o uso da ACVd, ou outro método que considere o fluxo de carbono biogênico, é mais apropriado para a avaliação de biomateriais.

4. Recomendações para Diminuição do Impacto de Mudanças Climáticas dos Bioconcretos de Bambu

Com base nos resultados verificados nesta pesquisa são apresentadas algumas recomendações para a diminuição EC dos BBC:

- Mudança do tipo de cimento Portland utilizado. Pode ser pensado no uso de cimentos com menor teor de clínquer, para o caso brasileiro, cimentos CP-II, CPIII ou CP-IV;
- Diminuição do teor de cimento Portland. Pode ser substituído por adições minerais de baixo impacto como cinza volante ou cinzas agroindustriais, como cinza de casca de arroz e cinza de bagaço de cana, que já se mostraram ser uma solução eficiente para a redução dos impactos ambientais de concretos convencionais, como demonstra SILVA (2015);
- Aumento do teor de resíduos de bambu na mistura. É a alternativa mais eficiente para deixar a EC com valores negativos. Além de contribuir para melhoria do desempenho térmico e acústico. Essa recomendação é válida para os cenários de alocação econômica e em massa considerando que os resíduos são originados de colmos. Se forem utilizadas partículas de bambu virgem ainda é vantajoso (está avaliação será apresentada a seguir), no entanto, será necessária uma maior quantidade de partículas quando comparada ao uso de resíduos, indo ao encontro da importância de se pensar em um processo circular;
- Para BBC com EC negativa, o aumento da espessura das paredes se mostra como uma estratégia para mitigação do aquecimento global, além de melhorar o desempenho estrutural, térmico e acústico (também auxiliando na adaptação), sendo, portanto, um exemplo de construção regenerativa. Esse aumento de espessura deve ser limitado pelo aumento de custos e outros impactos ambientais, sendo necessário definir uma espessura ótima.
- Atenção especial para o transporte dos materiais, principalmente dos resíduos de bambu e cinza volante, que pelo fato de serem resíduos/coprodutos de outros processos podem estar distantes do local de produção do BBC.

5. Comparação dos Bioconcretos de Bambu com Sistemas Construtivos Convencionais

Na Figura 27 é comparado o impacto de mudanças climáticas das misturas de BBC, com 10 cm e 20 cm, com os sistemas construtivos convencionais (alvenaria de concreto e cerâmica), para os métodos de ACVd e do IPCC.

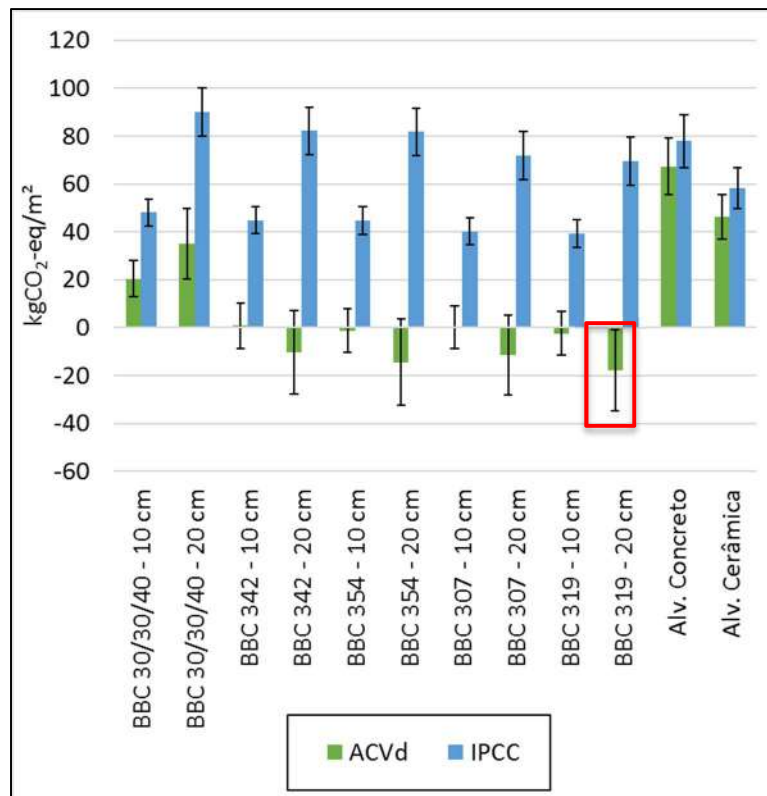


Figura 27 – Comparação do potencial aquecimento global dos BBC e sistemas construtivos convencionais utilizando os métodos ACVd e IPCC.

Quando comparado aos sistemas construtivos convencionais, de alvenaria de bloco cerâmico e de concreto, o BBC com maior teor de pozolanas é mais vantajoso mesmo quando possui uma maior espessura, quando a metodologia da ACVd é utilizada.

O sistema de alvenaria cerâmica é mais vantajoso que o de blocos de concreto, sendo que esse resultado é influenciado pelo tipo de combustível utilizado no processo de queima dos blocos cerâmicos, que no Brasil um dos mais utilizados são os cavacos de madeira, de acordo com dados do MME (2018). A etapa de queima dos blocos é uma das mais impactantes durante a produção de blocos cerâmicos como apresenta SOUZA *et al.* (2016). Especialmente para a categoria de mudanças climáticas, esse combustível tem uma grande influencia nos resultados pois o CO₂ emitido na queima é biológico. Se fosse considerado outro combustível para a queima dos blocos cerâmicos, como gás natural, que também é comum em algumas olarias no Brasil, como é possível ver nos dados do MME (2018), o sistema de alvenaria de blocos cerâmicos aumentaria seus impactos para a categoria de mudanças climáticas.

Para a alvenaria de blocos de concreto o cimento Portland CPV é um dos insumos mais impactantes, esse que possui maior teor de clínquer (CBCS, 2014). Em ambos os tipos de

alvenaria foram considerados o revestimento de argamassa, que é composta de cimento, cal hidratada e areia, sendo que os dois primeiros são os insumos responsáveis pela maior parcela de seus impactos ambientais, como apontam CALDAS e TOLEDO FILHO (2018).

Na Figura 28 são apresentados os resultados dos impactos ambientais avaliados para as paredes de BBC e os sistemas de alvenaria.

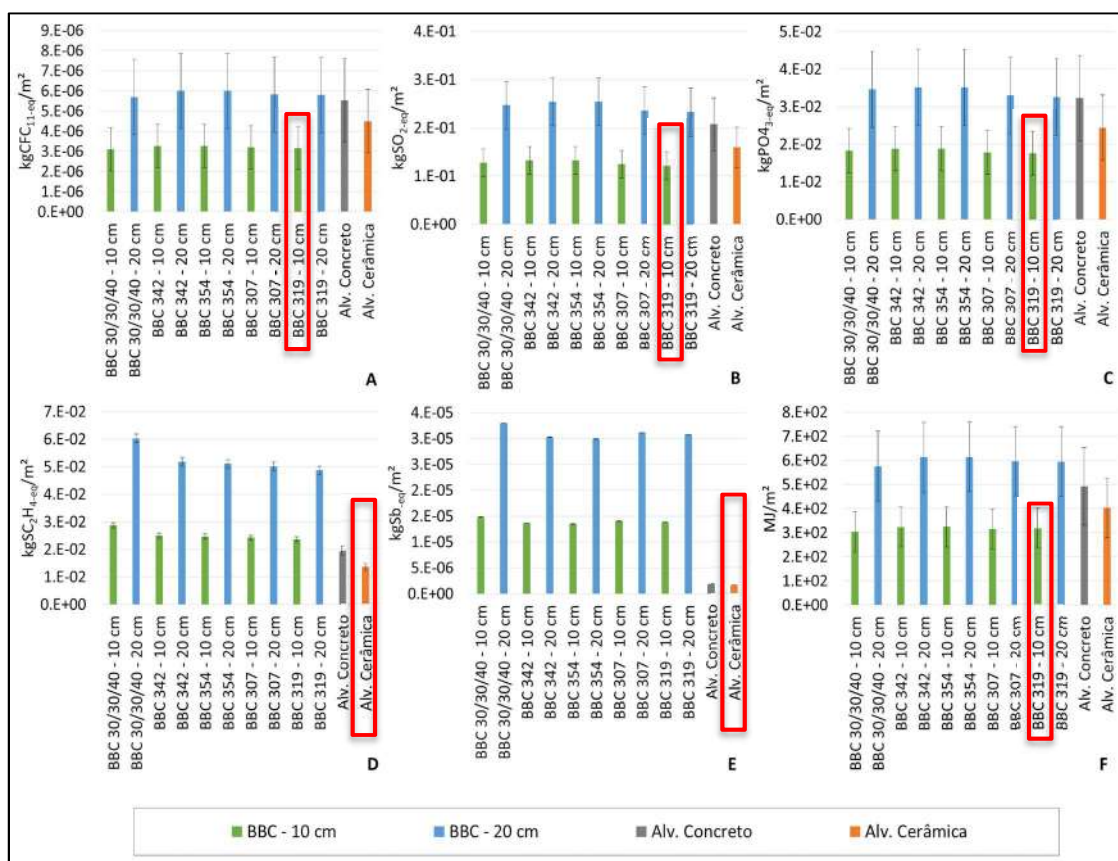


Figura 28 – Comparação dos potenciais impactos ambientais dos BBC e sistemas construtivos convencionais. (A) Depleção da camada de ozônio. (B) Acidificação. (C) Eutrofização. (D) Formação de fotooxidantes. (E) Depleção abiótica de recursos – elementos. (F) Depleção abiótica de combustíveis fósseis.

Embora os BBC, principalmente o de maior teor de pozolanas, apresentaram maior benefícios para a categoria de EC mesmo com o aumento das espessuras das paredes (quando o método de ACVd é utilizado), isso não ocorreu para as outras categorias de impacto ambiental.

O aumento da espessura da parede de BBC faz aumentar o consumo de materiais e consequentemente seus impactos ambientais. Enquanto para a categoria de EC esse aumento é compensado pelo aumento de carbono biogênico, para as outras categorias isso

não ocorre. Portanto, tem-se aqui um tipo de inversão (*trade-off*), pois é possível obter uma EC negativa, para as novas formulações de bioconcreto propostas, no entanto, para isso há o aumento de outros impactos ambientais, principalmente os de POCP e ADP-e. A grande diferença dos bioconcretos em relação aos convencionais para a categoria de POCP está relacionada ao uso do metacaulim que é consequência do combustível empregado para a calinação, que no caso foi o carvão vegetal, que emite grande quantidade de material particulado.

Para a ADP-e também se deve ao metacaulim, que foi modelado com a inclusão da atividade de extração de caulim do Ecoivent v.3.3. Para essa atividade é utilizado ácido sulfúrico que consome zinco na produção desse ácido, que é considerado um elemento muito raro de acordo com o banco de dados para o método CML-IA disponível no SimaPro.

Por outro lado, vale ressaltar que o impacto de EC é global, enquanto outros, principalmente aqueles em que o BBC foi mais desvantajoso, como o POCP e ADP-e são locais, e, sendo assim, sua relevância pode ser menor, dependendo das metas ambientais. Além do mais, o banco de dados utilizado, principalmente para a categoria de ADP-e não pode ser sensível há alguns tipos de recursos naturais disponíveis, e variam de local para local, como apontam SILVA *et al.* (2018) e para algumas categorias de dano como AP e POCP, o método CML-IA não possui adaptação ao contexto brasileiro e à condições locais (Joint Research Centre, 2010).

No Quadro 24 a seguir é apresentado um resumo das categorias de impacto ambientais avaliadas, mostrando quais os insumos utilizados no BBC que mais contribuiram, o que levou a essa contribuição, a partir de um aspecto que considere todo o ciclo de vida.

Quadro 24 – Avaliação das categorias de impacto ambiental com base nos materiais, atividades e substâncias responsáveis.

Categorias de impacto ambiental	Insumos que mais impactaram	Atividades responsáveis
Depleção da camada de ozônio	(1) Cimento, (2) metacaulim, (3) serragem, (4) Transporte	(1) Cimento - produção clínquer (queima de coque de petróleo). (2) Metacaulim - extração do caulim (consumo de hidróxido de sódio). (3) Resíduo de bambu - energia elétrica (lubrificante turbinas hidroelétricas). (4) Transporte - queima de diesel (operação na refinaria de petróleo para produzir o diesel)

Categorias de impacto ambiental	Insumos que mais impactaram	Atividades responsáveis
Acidificação do solo e da água	(1) Cimento e (2) metacaulim	(1) Cimento - Produção de clínquer (consumo de eletricidade brasileira). (2) Metacaulim - elevado consumo de eletricidade
Eutrofização	(1) Cimento	(1) Cimento - Produção de clínquer (consumo de eletricidade brasileira).
Formação de ozônio fotooxidante	(1) Metacaulim	(1) Metacaulim - Queima de carvão vegetal - emissão de particulados.
Depleção abiótica dos recursos -elementos	(1) Metacaulim e (2) VMA	(1) Metacaulim - Ácido sulfúrico utilizado na extração de caulim, que conseqüentemente consome zinco, um recurso considerado raro. (2) VMA (ácido sulfurico e consumo de zinco concentrado)
Depleção abiótica dos recursos -combustíveis fósseis	(1) Cimento e (2) Metacaulim	(1) Cimento - Consumo de combustíveis fósseis produção clínquer, especialmente o coque de petróleo.(2) Metacaulim: consumo de energia elétrica para extração do caulim.

Verifica-se que a maior parte das categorias de impacto avaliadas são influenciadas pelo cimento Portland e metacaulim, sendo, portanto, os materiais que devem receber atenção especial durante a formulação do BBC. O cimento tem grande influência do teor de clínquer (principalmente devido ao consumo de fontes fósseis como coque de petróleo e energia elétrica) e o metacaulim devido ao consumo de eletricidade, uso de ácido sulfurico utilizado na obtenção do caulim e combustível utilizado (que será discutido a seguir) no processo de calcinação de acordo com os dados utilizados.

Esse aprofundamento e detalhamento é importante pois permite avaliar até que ponto a empresa ou responsável pela produção do BBC tem um papel/responsabilidade para mitigar cada impacto ambiental. Pois, dependendo da origem do impacto ambiental, por exemplo, em processos que ficam muito a montante (*mainstream*) da produção do BBC, por exemplo: obtenção do caulim utilizado na produção do metacaulim, será bastante difícil um controle e formas de intervenção, como apontam PESSOTO *et al.* (2018). Para esses casos, o que pode ser feito, a nível gerencial é a empresa de BBC, traçar diretrizes para uma especificação ambientalmente mais responsável de seus fornecedores, cobrando informações ambientais das matérias primas utilizadas para a sua confecção.

Para as novas formulações de BBC, embora haja uma redução da categoria de EC, a diminuição dos impactos das outras categorias não é tão relevante e em alguns casos fica mais desvantajoso, devido ao consumo de energia gasto para o tratamento das partículas de bambu e maiores distâncias de transporte de alguns insumos, como a cinza volante.

6. Análise de Sensibilidade

6.1. Alocação dos Impactos de Mudanças Climáticas dos Resíduos de Bambu e Cinzas Volantes

Quando a alocação em massa e econômica dos resíduos gerados para a produção de colmos e laminados de bambu são quantificadas e contabilizadas na avaliação do BBC os resultados se modificam, principalmente quando a alocação em massa dos resíduos de bambu é considerada como é apresentado na Figura 29.

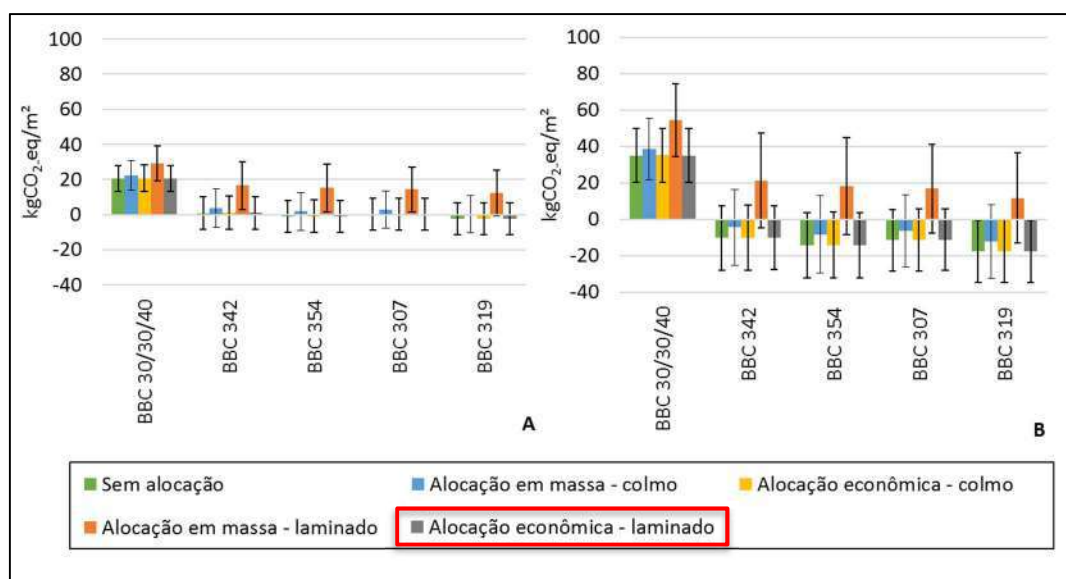


Figura 29 – Avaliação da Emissão de Carbono (EC) considerando a alocação em massa e econômica dos impactos ambientais. (A) 10 cm. (B) 20 cm.

A alocação em massa dos resíduos atribui uma parcela muito maior dos impactos aos resíduos do que a alocação econômica, chegando a 10% para os colmos e 38% para produção de laminados, enquanto para a econômica esses valores variam de 0,25% para laminados e 8% para colmos.

O que chama atenção, mais uma vez, é a origem dos resíduos de bambu, por exemplo se eles forem obtidos de um processo de produção de laminados, a alocação em massa para esse processo é mais impactante que se for de um processo de produção de colmos. Isso ocorre por dois motivos: (1) a massa de resíduos gerada no processo de produção de laminados é maior; (2) a produção de laminados é mais impactante que a produção de colmos. Comparando com os resultados da literatura, na maior parte dos estudos (CHEN *et al.*, 2010; GARCIA; FREIRE, 2014; HOSSAIN *et al.*, 2018), que consideram a

alocação no processo de ACV, a alocação em massa resulta em maiores impactos ambientais.

Por outro lado, se for realizada uma alocação econômica, considerando o preço de colmos e laminados de bambu vendidos no Brasil, a obtenção de resíduos de um processo de laminados é menos impactante, tendo em vista que o valor econômico do laminado é muito superior que o do colmo e dos resíduos gerados, o que faz os impactos serem alocados majoritariamente para o laminado e não para o resíduo.

A alocação dos impactos da cinza volante foi pouco significativa, tendo em vista os baixos valores dos coeficientes de alocação encontrados (4% a 13% para a alocação em massa e 2% a 4% econômica) e o pequeno impacto para o tratamento da cinza volante.

Portanto, a alocação dos resíduos utilizados para a produção do BBC é um item importante, e por isso, a origem do resíduo precisa estar clara, quando ela for considerada na modelagem do BBC. Quando se pensa em formas para incentivar o uso de resíduos como uma estratégia de economia circular, a alocação de impactos nos resíduos não deve ser realizada, pois diminuirá os benefícios relacionados ao reaproveitamento deles. Para isso as Regras de Categoria de Produtos (*Product Category Rules* – PCR) devem deixar claras esse tipo de escolha. Por exemplo, para a PCR de concreto UN CPC 375 CONCRETE (EPD SYSTEM, 2013) considera que mesmo co-produtos utilizados na produção de concretos, como a cinza volante devem ser modelados com a alocação econômica, que normalmente é o que leva menor quantidade de impactos para os co-produtos (HOSSAIN *et al.*, 2018).

Comparando com os sistemas construtivos convencionais avaliados, quando a alocação em massa de laminados é considerada, a alternativa com espessura de 20 cm de BBC passa a ser menos vantajosa para alguns casos. Para os BBC com impacto negativo na EC, esse tipo de alocação leva a um resultado positivo, sendo, portanto, um cenário pouco vantajoso.

6.2. Origem da Partícula de Bambu

Na Figura 30 é apresentada a comparação das emissões de GEE com o uso de partículas de bambu provenientes da reciclagem e plantações comerciais para o BBC de 10 cm.

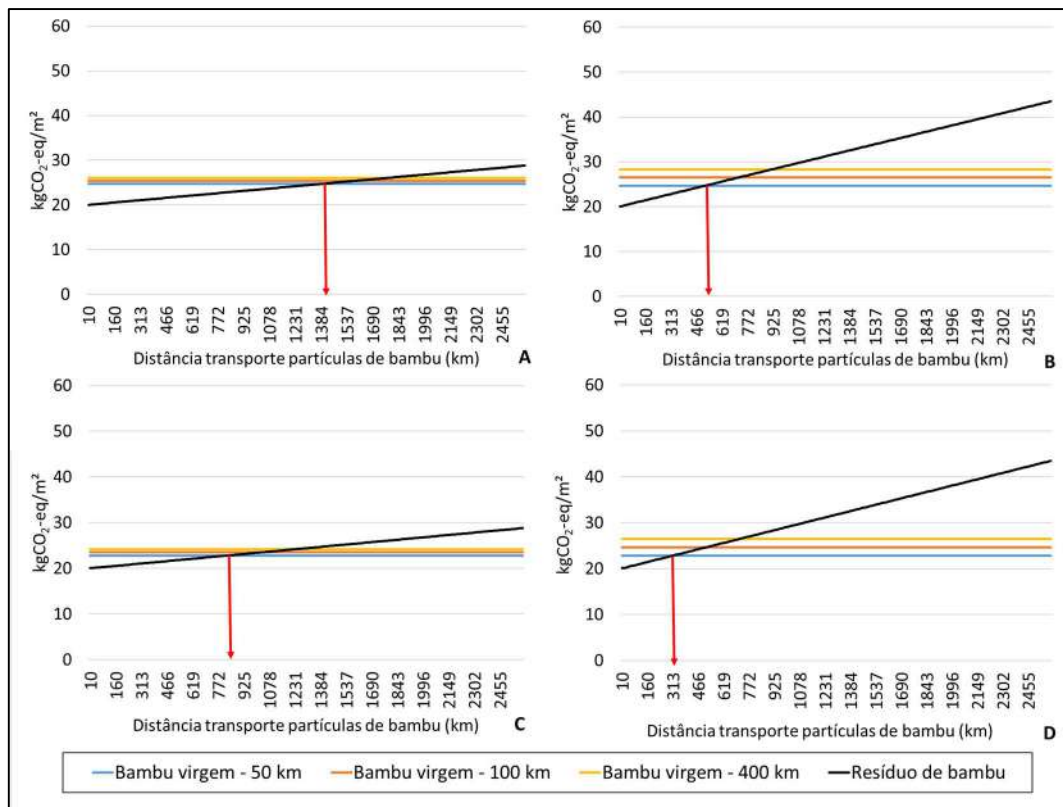


Figura 30 – Limite máximo que os resíduos de bambu podem ser transportados para ter o mesmo impacto que partículas de bambu originados de plantações virgens. (A) Sem alocação - transporte 100% Default. (B) Sem alocação - transporte 50% Empty. (C) Com alocação - transporte 100% Default. (D) Com alocação - transporte 50% Empty.

Com base nos resultados encontrados, e de acordo com os dados utilizados no inventário, o uso de partículas de bambu recicladas tende a ser mais vantajoso do ponto de vista das emissões de GEE. Isso é justificado pelo fato do processo para a produção de partículas de bambu a partir de plantações mais impactantes (devido ao impacto da plantação, processamento do bambu e maior impacto do transporte devido as perdas pelo formato dos colmos, necessitando de mais transportes que se fosse transportado os resíduos de bambu). Esses resultados demonstram quantitativamente um dos benefícios de pensar em uma economia circular, onde resíduos são aproveitados em vez do uso de materiais virgens.

Foi possível chegar a distâncias superiores a 1300 km para um transporte mais eficiente e quando a alocação não é considerada no impacto dos resíduos. Para o cenário menos vantajoso (transporte menos eficiente e com a alocação), chega-se a uma distância máxima próxima de 300 km. Essas diferenças mostram que os fatores escolhidos nessa avaliação têm uma grande influência nos resultados e na tomada de decisão. Recomenda-

se, portanto, avaliar esses itens quando se for comparar o uso de materiais reciclados e virgens, do ponto de vista de uma economia circular.

Verifica-se assim que o processo de alocação deve ser cuidadosamente escolhido e justificado, e, principalmente, é importante saber a origem desses resíduos, especialmente para o caso dos processos de bambu considerados aqui. Se fosse considerado a alocação em massa de produtos originados de laminados, o impacto do uso de resíduos seria maior que a produção a partir de colmos virgens, impossibilitando o uso de resíduos do ponto de vista das emissões de GEE.

Por fim, vale ressaltar que para o caso de partículas de bambu originadas de plantações, a qualidade do material tende a ser maior já que é possível ter um material mais homogêneo, controlar o tipo de espécie de bambu, entre outros fatores que podem atrapalhar o processo de produção do BBC. Essa é uma barreira comum quando se pensa em uma economia circular, também apontado por outras pesquisas como mostra JARRE *et al.* (2020).

6.3.A Influência das Incertezas Relativas ao Carbono Biogênico

A influência da variação das fontes de incertezas do carbono biogênico está apresentada na Figura 31.



C – Carbono presente na biomassa. a – Período de rotação (anos).

Figura 31– Avaliação de diferentes fontes de incerteza na influência do carbono biogênico.

Para esses resultados quanto menor o valor encontrado maior é o benefício em termos de mitigação do impacto das mudanças climáticas. Dessa forma, o cenário com teor de carbono na biomassa de 47% e período de rotação da plantação de 3 anos e o período de impacto de 500 anos seria o mais vantajoso.

A maior variação nos resultados, referente a influência do carbono biogênico ocorre devido ao teor de carbono presente no resíduo, chegando a 12% considerando teores de carbono entre 42% e 47%. Essa variação se deve principalmente a espécie de bambu e a parte da planta que gerou o resíduo (folha, galho, colmo, raiz, etc.) (DALLAGNOL, 2012).

O manejo da plantação tem uma pequena influência nos resultados, com uma diferença mínima, chegando a 3% entre o cenário com período de rotação de 3 e 8 anos. Menores períodos de rotação da floresta resultam em um menor impacto de aquecimento global, como também já foi verificado por PITTAU *et al.* (2018) E PITTAU *et al.* (2019). Portanto, resíduos de florestas de bambu de maior produtividade e com maior crescimento nas primeiras idades são mais eficientes do ponto de vista das mudanças climáticas.

Em relação à comparação com o horizonte temporal do impacto de mudanças climáticas, de 100 a 500 anos, verificou-se que o impacto diminui ao longo do tempo, no entanto, também com uma pequena diferença, chegando ao máximo de 3%, para os cenários com maior período de rotação (8 anos).

Finalmente, comparando a diferença entre o pior (C42-8a) e melhor cenário (C47-3a) e com o horizonte temporal de 100 anos, verifica-se uma diferença de 18%, que pode ser considerada ainda mais expressiva quando o biomaterial é comaprado com outros materiais.

Conclui-se, que do ponto de vista metodológico, é importante saber a(s) espécie(s) do bambu que deu origem ao resíduo e como sua plantação é manejada. No entanto, como se trata de resíduos, na prática esse tipo de dado pode ser difícil de ser obtido, ainda mais se for pensado na mistura de diferentes tipos de resíduos obtidos de diferentes processos produtivos. Como a plantação de bambu está a montante da produção do BBC, ou seja, com pouco ou nenhum controle do produtor do BBC (quando resíduos são utilizados no processo), essa etapa fica difícil de ser melhorada.

Do ponto de vista metodológico, normalmente a parte mais utilizada do bambu na construção civil é o colmo, e por isso, recomenda-se que o teor de carbono utilizado na modelagem da ACV tenha sido medido a partir de colmos de bambu. Na ausência de valores reais (coletados de forma primária) recomenda-se que seja realizada uma análise de incertezas com diferentes valores, principalmente do valor do carbono presente na massa seca. No entanto, como foi apresentado na seção de Revisão Bibliográfica essa análise não é comum nos estudos de ACV aplicados a biomateriais de construção.

6.4. Combustível de Calcinação do Metacaulim

No Quadro 25 é apresentado a participação do impacto do metacaulim, para as categorias avaliadas, quando diferentes combustíveis são utilizados para calcinação.

Quadro 25 – Contribuição do metacaulim de acordo com o tipo de combustível utilizado na calcinação para as diferentes categorias de impacto ambiental.

Categorias de impacto	Carvão vegetal	Gás natural	Eletricidade	Cavacos de madeira
Emissão de Carbono (EC)	14,8%	12,2%	13,9%	9,3%
Depleção da camada de ozônio (ODP)	37,1%	37,0%	37,8%	33,4%
Acidificação (AP)	21,2%	21,1%	25,4%	22,4%
Eutrofização (EP)	16,6%	13,0%	20,9%	23,7%
Formação de fotooxidantes (POCP)	64,8%	10,8%	16,2%	16,6%
Depleção abiótica de elementos (ADP-e)	94,9%	94,5%	94,6%	94,6%
Depleção abiótica de combustíveis fósseis (ADP-ff)	29,6%	34,7%	32,8%	25,7%

O metacaulim apresenta a maior contribuição para a categoria de ADP-e. Isso ocorre devido ao consumo de ácido sulfúrico na extração de caulim, que para a produção desse ácido é utilizado zinco, que é considerado um elemento escasso. É possível ver que mesmo com a mudança do tipo de combustível utilizado na calcinação do caulim, a parcela de impactos do metacaulim permanece praticamente igual para essa categoria de impacto.

Por outro lado, o POCP é a categoria que foi a mais influenciada pelo tipo de combustível utilizado no processo de calcinação do metacaulim. Observa-se que a contribuição do metacaulim aumenta consideravelmente quando o carvão vegetal é empregado, uma vez que esse combustível emite uma grande quantidade de material particulado durante o processo de calcinação. Em geral, o uso de cavacos de madeira e gás natural foram os

combustíveis mais ambientalmente favoráveis para a calcinação do caulim, porém para diferentes categorias de impacto. Enquanto o primeiro é mais benéfico para as categorias de impacto global (EC, ADP-ff e ODP), o segundo é melhor para impactos locais (POCP, AP, EP), uma vez que os cavacos de madeira são uma fonte renovável (isto é, quando são originados de florestas com o manejo adequado), mas também emitem materiais particulados quando queimados. SOUZA *et al.* (2016) discutem essa questão para a avaliação de blocos cerâmicos produzidos no Brasil, que também fazem uso de cavacos de madeira.

6.5. Uso de Resina Acrílica como Revestimento

Na Figura 32 quando é utilizado a resina acrílica como revestimento da parede de BBC.

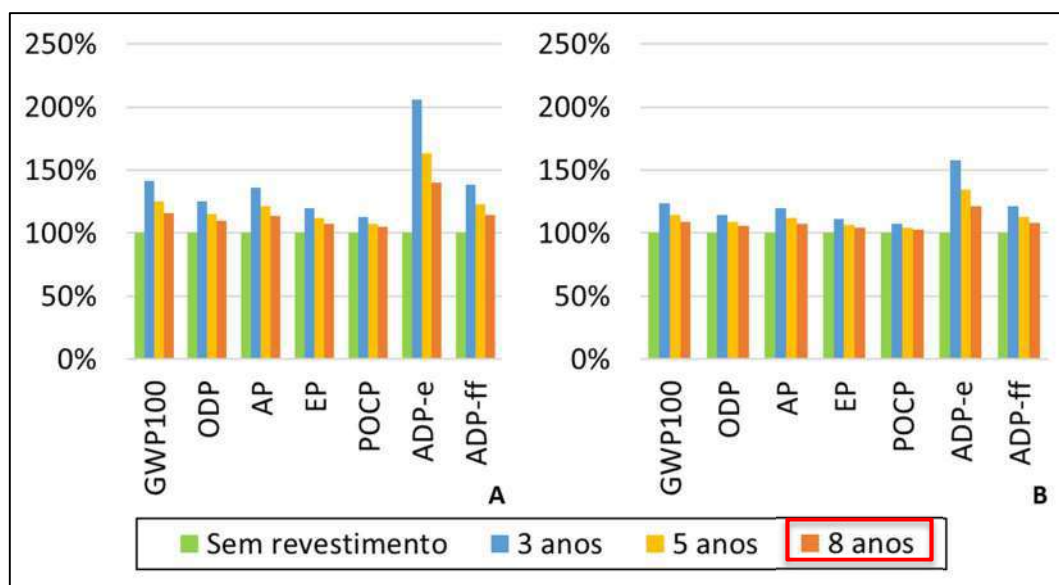


Figura 32 – Aumento dos impactos ambientais com a adição da resina e diferentes vidas úteis normalizados pela alternativa sem revestimento. Avaliação para diferentes espessuras da parede de BBC. (A) 10 cm. (B) 20 cm.

De acordo com o banco de dados o uso de resina acrílica é mais impactante principalmente para a categoria de ADP-e, chegando a mais de 200% em relação ao caso sem revestimento para a parede de 10 cm e considerando sua reposição a cada três anos. A resina tem um grande impacto para essa categoria devido principalmente ao composto de dióxido de titânio (utilizado para conferir durabilidade à resina), que para sua produção utiliza ácido sulfúrico que por sua vez consome zinco que é tido como um elemento com baixa disponibilidade no método CML-IA.

Para a categoria de EC (considerando a metodologia de ACVd) chega-se a uma diferença próxima a 50% (considerando um período de reposição de 3 anos), que é relevante, que

também se deve a grande quantidade de calor utilizado para a produção de dióxido de titânio. Como é utilizado a mesma quantidade de resina acrílica para ambas as espessuras de paredes (10 cm e 20 cm), o aumento da espessura da parede faz a participação dos impactos da resina diminuir.

Dessa forma, o uso de resina acrílica como revestimento final de paredes de BBC pode ser uma opção interessante, com atenção especial para a vida útil da resina. Para o aumento desse período é interessante que seja pensado em projetos de arquitetura com maior área de cobertura e proteção das paredes.

7. Relação da Distribuição Geográfica dos Insumos para a Produção do Bioconcreto em Diferentes Localidades do Brasil

Nas Figuras 33 a 36 são apresentados mapas produzidos para avaliação da EC, considerando a metodologia de ACVd, das diferentes alternativas de BBC e considerando a disponibilidade dos insumos utilizados para a produção do BBC. Na Figura 37 a participação do transporte de cada insumo.

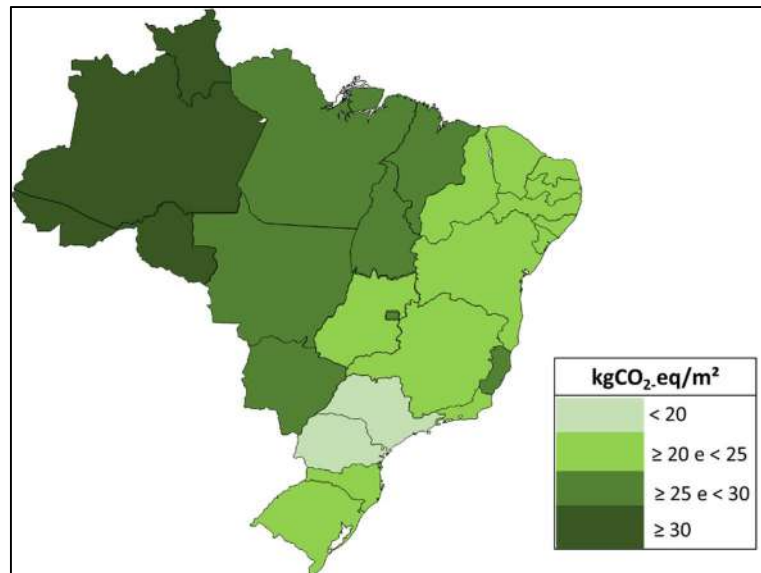


Figura 33 – Mapa de Emissão de Carbono (EC) do BBC 30/30/40 – 10 cm considerando um transporte mais eficiente.

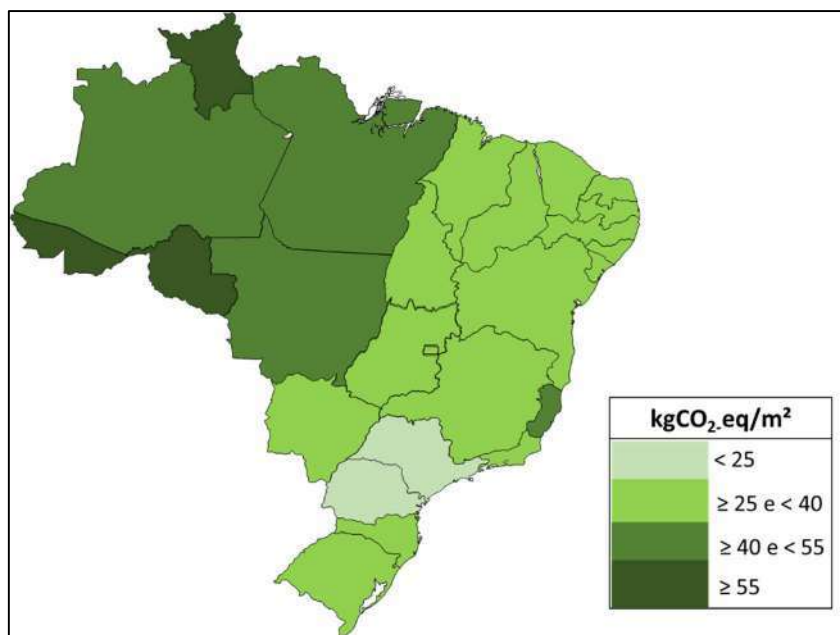


Figura 34 – Mapa de Emissão de Carbono (EC) do BBC 30/30/40 – 10 cm considerando um transporte menos eficiente.

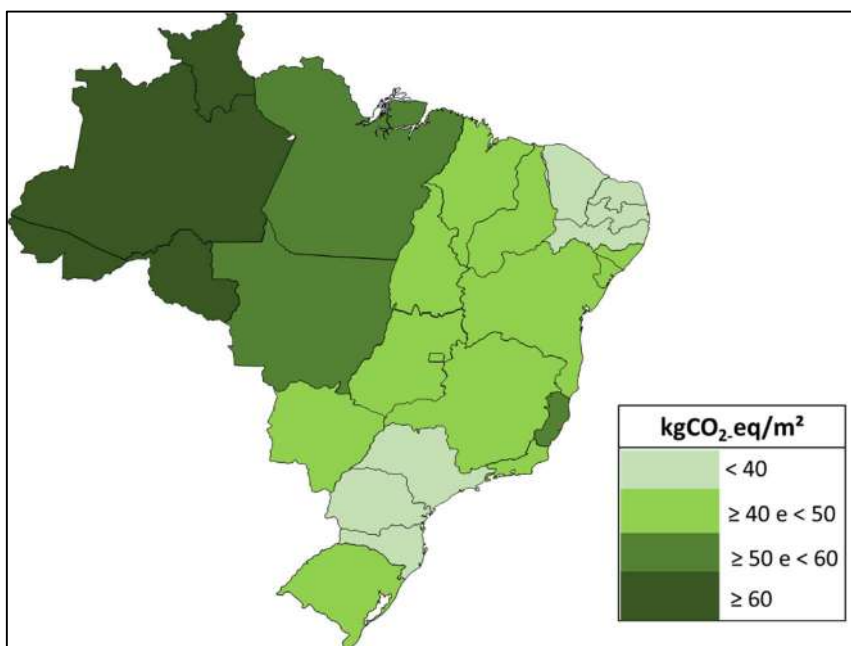


Figura 35 – Mapa de Emissão de Carbono (EC) do BBC 30/30/40 – 20 cm considerando um transporte mais eficiente.

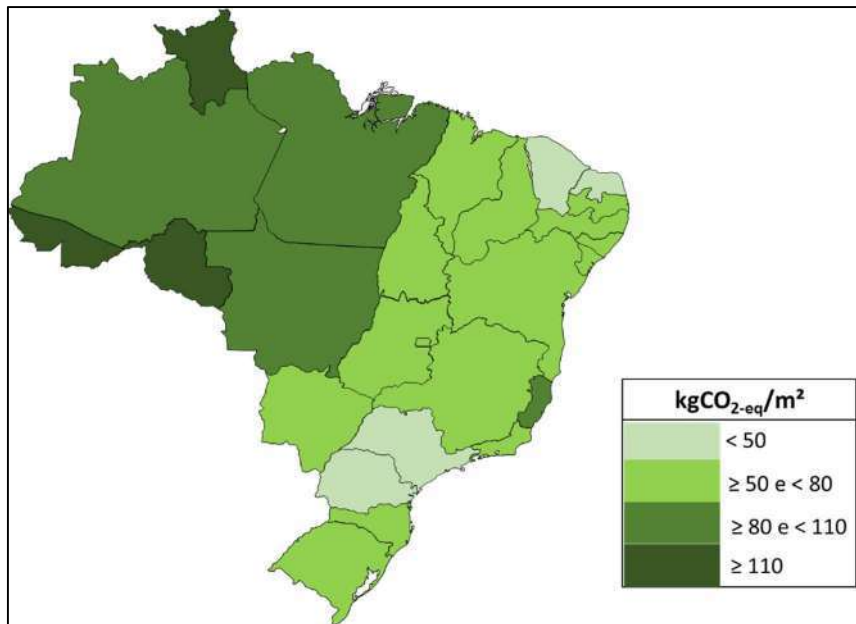


Figura 36 – Mapa de Emissão de Carbono (EC) do BBC 30/30/40 – 20 cm considerando um transporte menos eficiente.

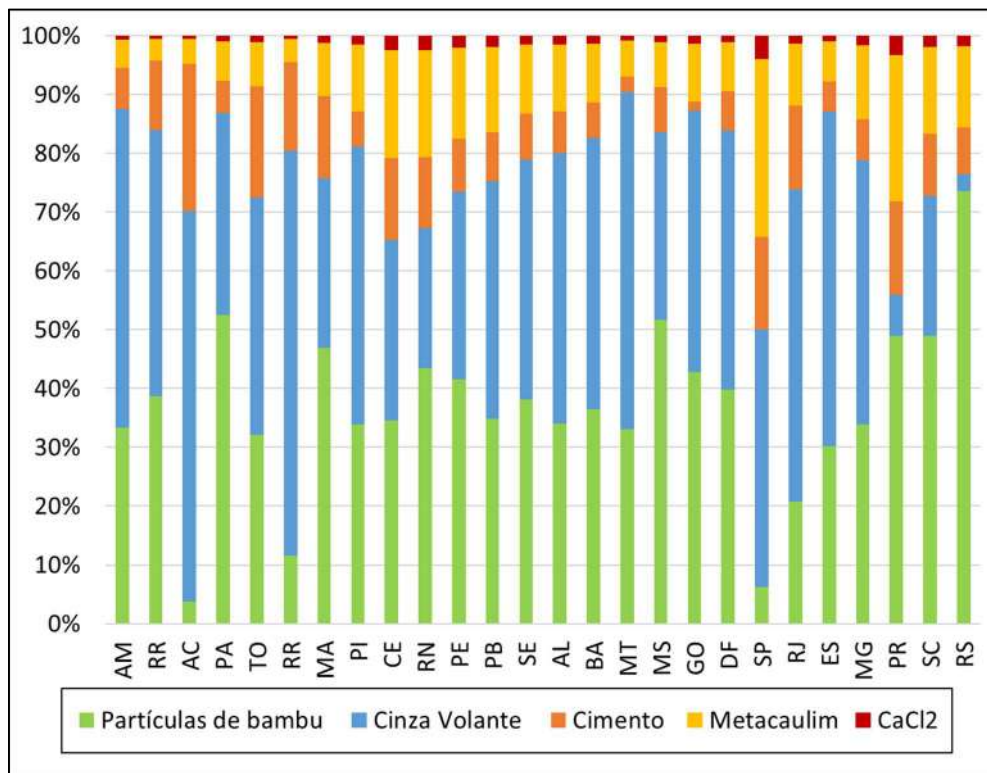


Figura 37 – Participação do transporte de cada insumo nas emissões de GEE totais do transporte.

Essa análise de sensibilidade mostrou que dependendo da origem dos resíduos de bambu e dos outros insumos para a produção de BBC, os impactos de EC podem variar

consideravelmente. A eficiência do transporte também se mostrou muito importante, chegando a dobrar as emissões de GEE.

A disponibilidade da cinza volante foi o insumo que mais impactou nos transportes, para a maioria das cidades avaliadas, sendo significativa principalmente para as regiões Norte e Centro-Oeste, que são as mais afastadas das plantas de carvão. É importante ressaltar que foram consideradas cinzas disponíveis tanto na região Sul e Nordeste. No entanto, como aponta o relatório especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2018), são geradas menor quantidade de cinzas na região Nordeste devido ao fato da qualidade do carvão nessa região ser melhor, quando comparado ao carvão da região Sul.

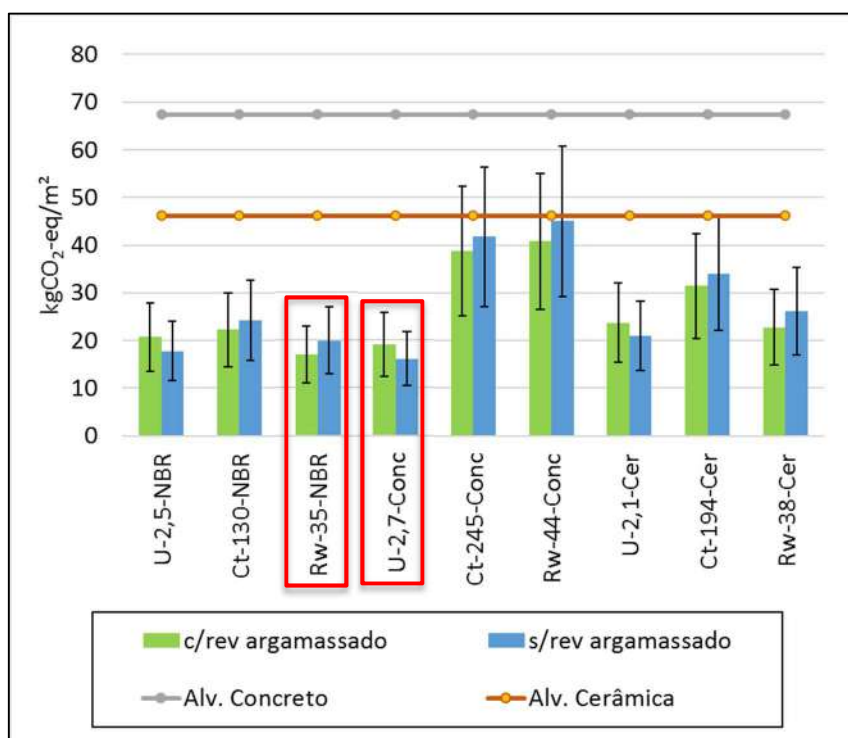
A partir dessa análise é possível concluir que para o caso do Brasil, que é um país de dimensões continentais, ainda muito dependente do modal rodoviário, o desenvolvimento de uma indústria de BBC nas regiões Sudeste, Sul e Nordeste tendem a ser as mais favoráveis, do ponto de vista de emissões de GEE, principalmente relacionadas ao transporte das matérias-primas e onde acontecerá o maior crescimento do déficit habitacional nos próximos anos (principalmente Sudeste e Nordeste), além de serem regiões com disponibilidade de infraestrutura portuária, caso seja visado um mercado internacional.

A região Sudeste especificamente tem ainda como vantagens adicionais: (1) existe uma maior concentração de indústrias e mercado consumidor; (2) existe uma grande quantidade de indústrias de madeira, que talvez possam ser adaptadas ao bambu (IBÁ, 2019); (3) e onde se concentra a maior parte do déficit habitacional brasileiro que continuará crescendo nos próximos anos, como aponta o estudo do MINISTÉRIO DAS CIDADES (2018), que avaliou projeções até 2040. Essas duas primeiras características tendem a facilitar um desenvolvimento baseado em um contexto de economia circular, se for pensado em um ecossistema industrial, com a diminuição de distâncias de transporte e facilitação de questões de logística.

8. Influência dos Critérios de Desempenho na Escolha da Unidade Funcional

8.1 Com base no Desempenho Térmico e Acústico dos Sistemas Construtivos Convencionais

Alguns resultados encontrados para diferentes unidades funcionais estão apresentados na Figura 38.



U – Transmitância térmica. Ct – Capacidade térmica. Rw – Índice de Redução Sonora Ponderada. Conc – Alvenaria de blocos de concreto. Cer – Alvenaria de blocos cerâmicos.

Figura 38 – Comparação do potencial aquecimento global do BBC utilizando o método ACVd considerando diferentes espessuras com base nos critérios de desempenho térmico e acústico.

Os critérios de desempenho adotados nesta pesquisa, o térmico e acústico, se mostraram importantes para a definição da unidade funcional, tendo em vista que o principal uso do BBC é para fechamentos verticais. Para o atendimento dos valores mínimos definidos na norma de desempenho de edificações (ABNT NBR 15575:2013), a unidade funcional de “1m²” tem espessuras totais variando de 7,5 cm (Acústico) a 12,9 cm (Térmico – Ct). Enquanto que adotando os valores dos sistemas construtivos convencionais mais utilizados no país, alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto, a espessura do fechamento aumenta, chegando a 26,5 cm (Acústico – Alvenaria concreto) o que leva a um maior consumo de material e conseqüentemente maior impacto ambiental.

Observa-se que para todos os casos o BBC se apresenta como menor EC do que os sistemas construtivos convencionais, devido as menores emissões no ciclo de vida e a menor espessura necessária para entregar o mesmo serviço (térmico ou acústico), a não ser para o desempenho acústico.

A consideração de uma camada de revestimento argamassado de 1 cm sobre o fechamento de BBC, também influenciou nos resultados, pois quando ela é considerada muda o desempenho dos sistemas (a parede como um todo), em relação aos critérios térmicos e acústico adotados, levando a um menor consumo de BBC. Para a transmitância térmica (U) ele impactou de forma negativa, levando a um aumento das emissões de GEE, já que possui uma condutividade térmica maior que o BBC. Para a capacidade térmica (Ct) e Índice de Redução Sonora Ponderada (Rw) ocorreu o oposto, pois a argamassa é um material mais denso que o BBC.

É preciso ressaltar que nessa pesquisa foi considerado um critério de desempenho acústico pela lei das massas, o que para o BBC não é tão vantajoso, pois é um material mais leve e poroso. No entanto, é possível ter bons resultados acústicos para materiais porosos, como é o caso de bio-concretos (AMZIANE; SONEBI, 2016). Nesse sentido, o BBC pode apresentar resultados ainda mais satisfatórios se for considerado essa característica de isolamento sonoro.

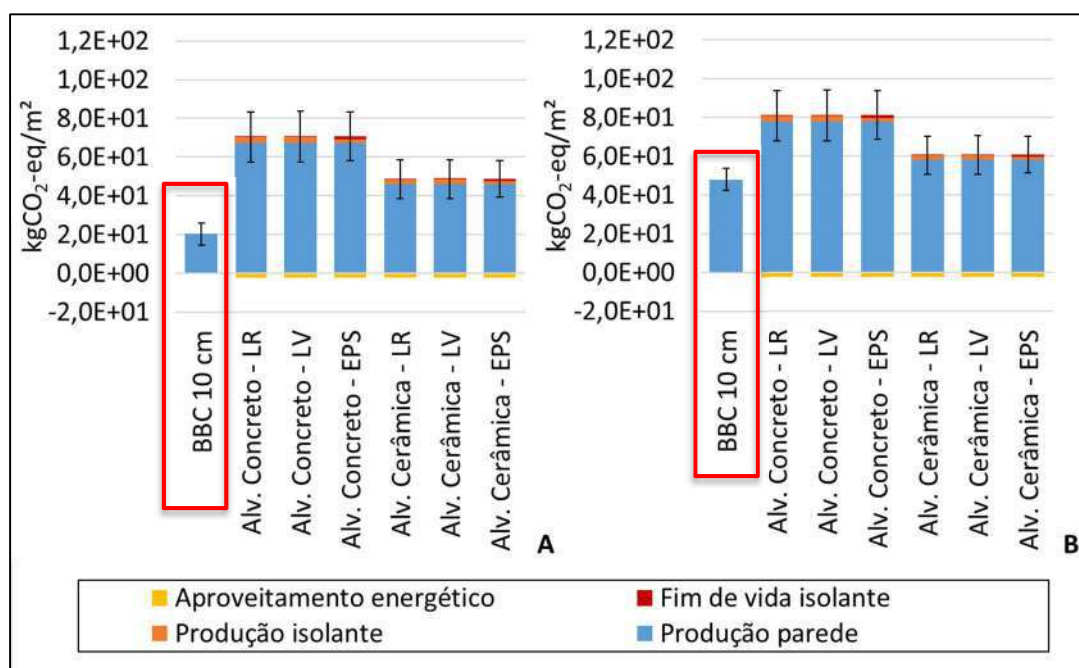
Esses resultados contribuem por apresentar a importância de se considerar critérios de desempenho para o caso de fechamentos verticais. Notou-se que é interessante considerar pelo menos dois critérios, diferentemente do que é observado nos estudos encontrados na literatura IP e MILLER (2012), PITTAU *et al.* (2018) e PITTAU *et al.* (2019), que normalmente adotam somente o térmico, que para o BBC avaliado neste estudo, o mais difícil de atender foi o acústico (considerando a Lei das Massas), quando comparado ao sistema de alvenaria de blocos de concreto. Somente o “1m²” de fechamento vertical não é suficiente para realizar a avaliação do material quando se pensa no seu uso como sistema construtivo.

Especificamente para materiais inovadores, como é o caso do BBC de bambu, a obtenção de informações relacionadas ao desempenho é muito importante para se poder realizar uma avaliação ambiental realista e possibilitar a comparação com outros sistemas construtivos convencionalmente utilizados.

Para futuros estudos podem ser pensados em outros critérios como estanqueidade, segurança contra incêndio, entre outros, sempre tendo em vista qual o uso do BBC, por exemplo fechamento vertical, laje, cobertura, piso, elemento de sombreamento, etc.

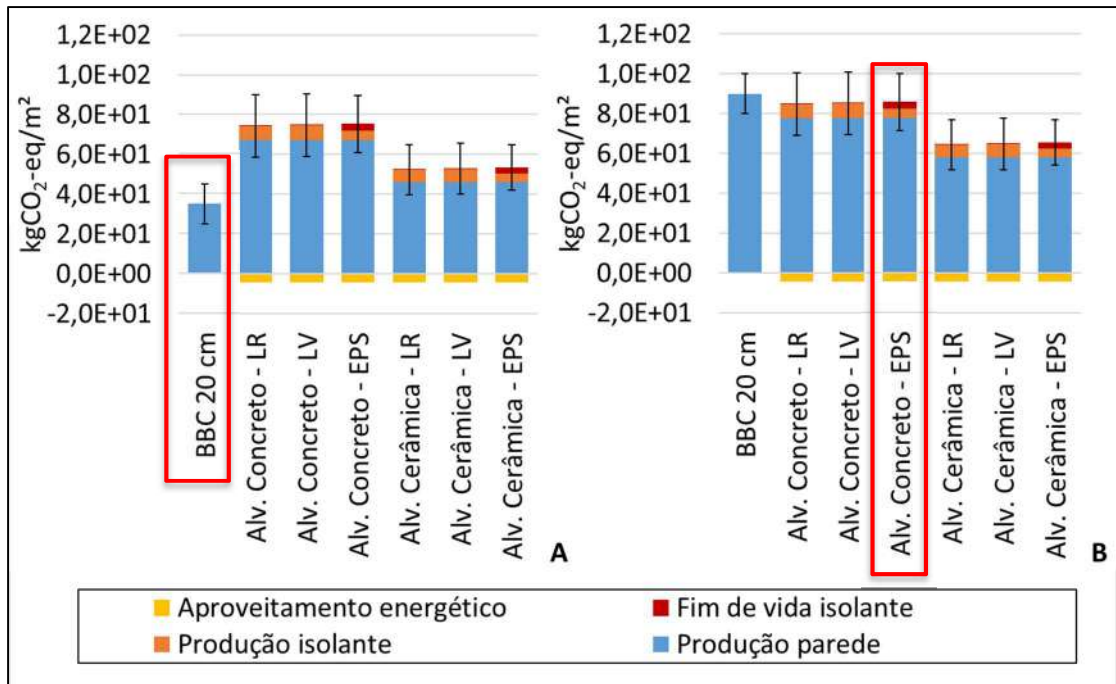
8.2 Com base no Desempenho Térmico do Bioconcreto de Bambu

Nas Figuras 39 a 42 são apresentados os resultados quando é considerado o acréscimo de isolantes térmicos nos sistemas construtivos convencionais para se manter o mesmo valor de transmitância térmica (U).



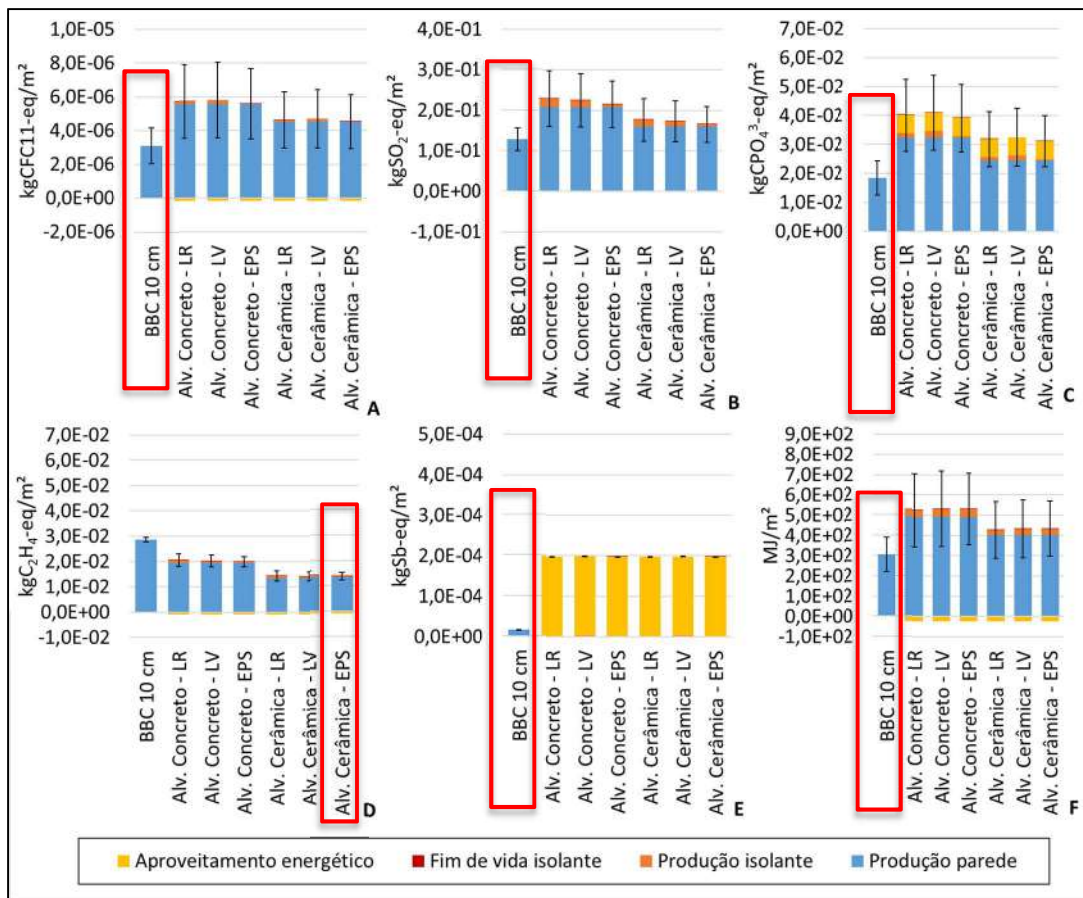
LR – Lã de rocha. LV – Lã de vidro. EPS- Poliestireno expandido.

Figura 39 – Comparação da Emissão de Carbono (EC) BBC com espessura de 10 cm comparando com os usos de diferentes isolantes térmicos. (A) ACVd e (B) IPCC.



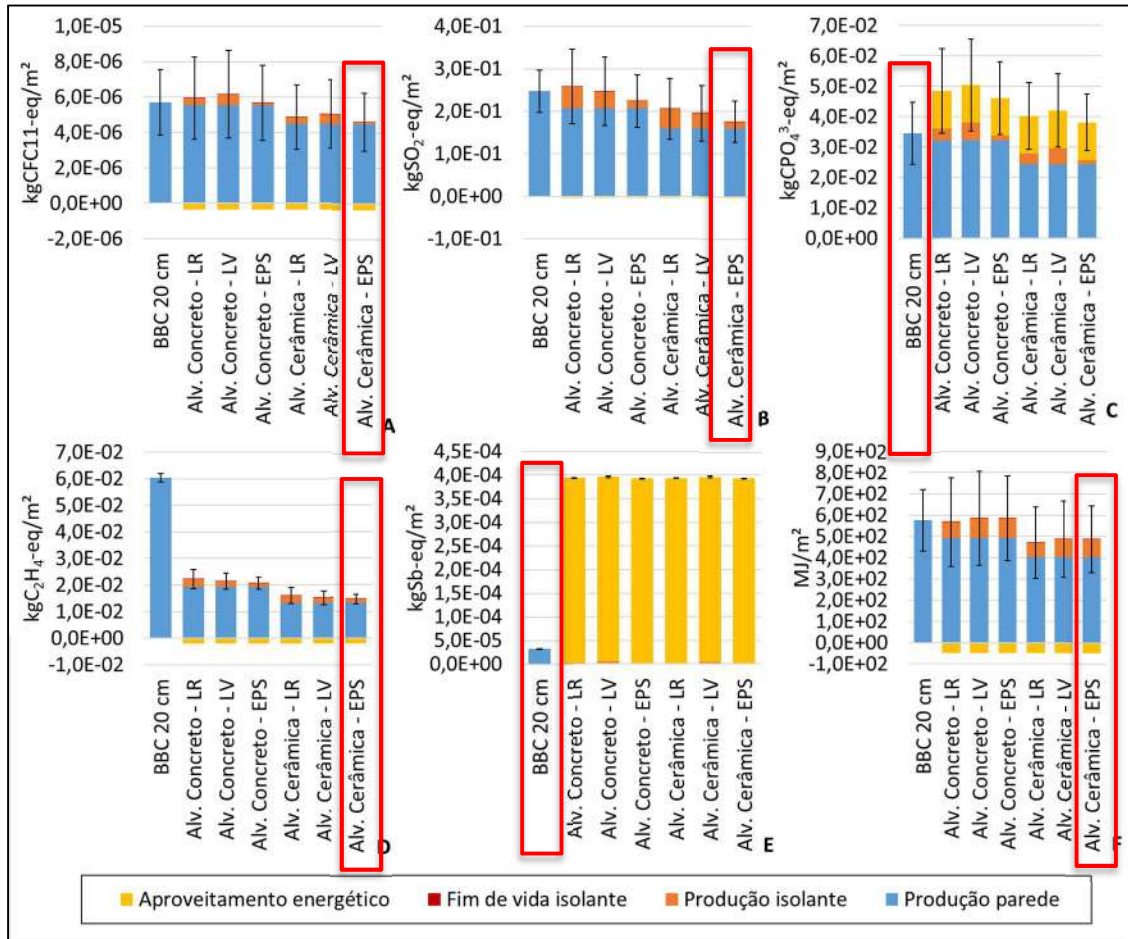
LR – Lã de rocha. LV – Lã de vidro. EPS- Poliestireno expandido.

Figura 40 – Comparação da Emissão de Carbono (EC) BBC com espessura de 20 cm comparando com os usos de diferentes isolantes térmicos. (A) ACVd e (B) IPCC.



LR – Lã de rocha. LV – Lã de vidro. EPS- Poliestireno expandido.

Figura 41 – Avaliação dos potenciais impactos ambientais considerando BBC com espessura de 10 cm comparando com os usos de diferentes isolantes térmicos. (A) Depleção da camada de ozônio. (B) Acidificação. (C) Eutrofização. (D) Formação de fotooxidantes. (E) Depleção abiótica de recursos – elementos. (F) Depleção abiótica de combustíveis fósseis.



LR – Lã de rocha. LV – Lã de vidro. EPS- Poliestireno expandido.

Figura 42 – Avaliação dos potenciais impactos ambientais considerando BBC com espessura de 20 cm comparando com os usos de diferentes isolantes térmicos. (A) Depleção da camada de ozônio. (B) Acidificação. (C) Eutrofização. (D) Formação de fotooxidantes. (E) Depleção abiótica de recursos – elementos. (F) Depleção abiótica de combustíveis fósseis.

Quando a avaliação é realizada dessa forma, nota-se que o BBC (principalmente considerando a espessura de 10 cm) continua sendo mais vantajoso que as outras alternativas para a maioria das categorias de impacto avaliadas. Esses resultados ajudam reforçar a vantagem do BBC. Para o impacto de mudanças climáticas, é possível observar mais uma vez que a contabilização do carbono biogênico (para o caso do método ACVD)

exerce uma grande influência nos resultados, principalmente para o BBC com espessura da parede de 20 cm.

Para um cenário de descarbonização da matriz de energia elétrica, os resultados seriam ainda mais favoráveis para o impacto de mudanças climáticas, para o aproveitamento dos resíduos como matéria prima do BBC. ESCAMILLA e HABERT (2016) observaram resultados semelhantes, pois verificaram que os benefícios em termos de mudanças climáticas pelo aproveitamento energético devido à queima de bambu considerando a matriz chinesa (com elevada participação de fontes fósseis) é maior que quando considerada uma matriz de menor intensidade de emissões de GEE, sendo que eles adotaram a matriz brasileira. Dessa forma, esses resultados mostram que é mais vantajoso usar os resíduos de bambu para a produção de BBC do que sua queima para aproveitamento de energia elétrica.

Os impactos de produção e fim de vida do isolante não foram significativos para todas as categorias de impacto avaliadas que foi consequência da baixa quantidade utilizada para atender o critério de transmitância térmica, quando comparados com as diferentes espessuras de BBC. Como os isolantes avaliados possuem uma condutividade térmica bastante baixa (cerca de dez vezes inferior ao valor do BBC) não foi necessário utilizar uma espessura elevada desses materiais.

Especialmente para as categorias ADP-e e EP o processo de incineração gera impactos significativos, muito superiores aos impactos evitados relacionados à geração de energia elétrica pela rede. No entanto, para o caso específico do aproveitamento energético dos resíduos de bambu, seria mais interessante fazer uma avaliação considerando a abordagem consequencial da ACV. No entanto, esses dados são escassos para a realidade brasileira.

9. Avaliação do Desempenho Termoenergético

9.1. Arquivos Climáticos Originais

Na Figura 43 são apresentados os resultados de consumo de energia para climatização quando as diferentes configurações de painéis de BBC são comparadas com sistemas construtivos convencionais quando são utilizados os dados climáticos originais.

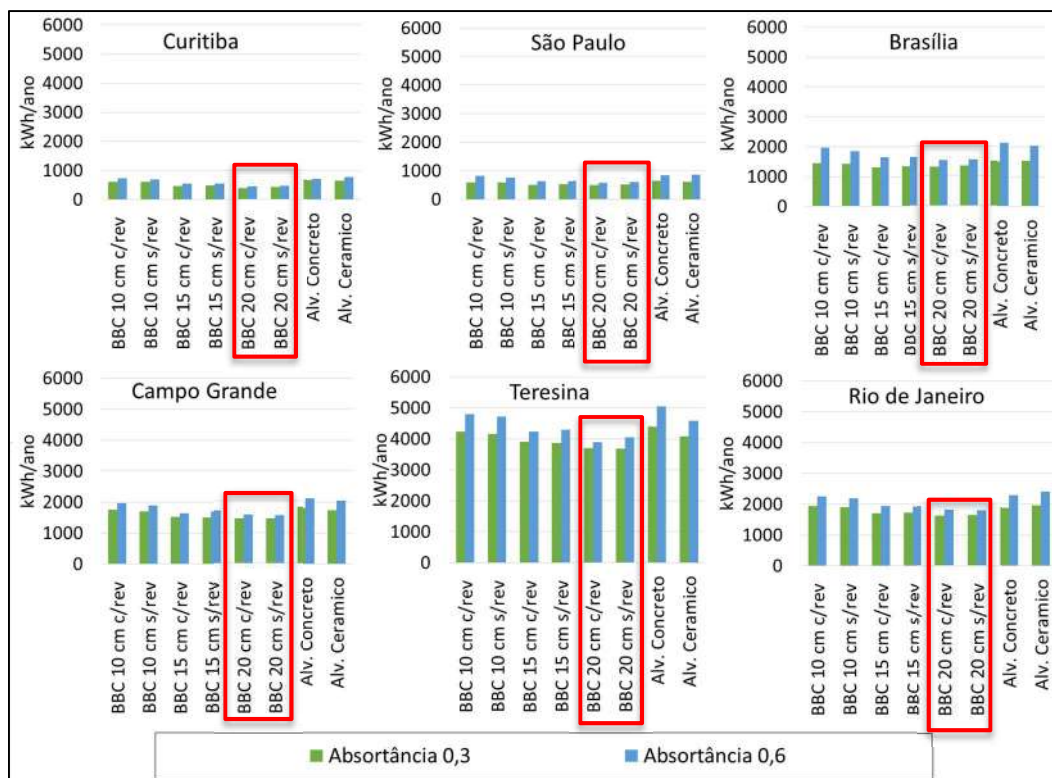


Figura 43 – Consumo de energia para climatização artificial da edificação considerando arquivos climáticos originais e diferentes valores de absorvância (0,3 e 0,6).

A partir da simulação termoenergética e considerando diferentes zonas bioclimáticas foi possível verificar que fechamentos de BBC possuem um melhor desempenho termoenergético que os sistemas construtivos convencionais utilizados no Brasil indo ao encontro do estudo de RAHIM *et al.* (2016) que compararam bioconcretos com sistemas de alvenaria cerâmica.

Para a maioria das cidades avaliadas, um fechamento com apenas 10 cm de espessura, consegue ser mais eficiente que os outros sistemas avaliados. No entanto, para alguns casos, principalmente cidades mais quentes, como Teresina e Rio de Janeiro, são necessárias espessuras maiores. Quando a espessura de 20 cm é utilizada é possível ter ganhos que variaram de 25% (cidade de Teresina) a 52% (cidade de Curitiba) em relação ao sistema de alvenaria de concreto para absorvância 0,6.

A cidade de Curitiba foi onde o BBC apresentou maior diferença em relação aos sistemas construtivos convencionais. Especificamente nesta cidade, o consumo de energia para climatização se dá tanto para o resfriamento como para o aquecimento, sendo que o BBC consegue atuar bem para esses dois casos, devido a sua baixa condutividade térmica. Portanto, o uso do BBC permite reduzir o consumo de energia tanto para aquecimento

como para resfriamento da edificação, resultando em uma maior diferença em relação aos outros sistemas construtivos. Essa constatação indica um grande potencial do BBC para uso em fechamentos verticais, em edificações habitacionais, mostrando sua versatilidade para as diferentes condições climáticas brasileiras.

A comparação entre diferentes valores de absorvância (0,3 e 0,6), que na prática se relacionariam diretamente com a cor utilizada na fachada, a primeira seria uma cor mais clara (ex. bege) e a segunda mais escura (ex. cinza) mostrou que o BBC tem uma menor influência com essa variação. Para cores mais escuras, o aumento do consumo de energia para climatização na edificação é menor quando o painel de BBC é utilizado. Isso se dá devido a maior propriedade de isolamento térmico do BBC (devido à sua baixa condutividade quando comparada com materiais cimentícios e cerâmicos). Materiais de maior condutividade térmica são mais afetados (negativamente) com o aumento do valor absorvância, como é possível ver nos estudos de VIANA *et al.* (2019) e CALDAS *et al.* (2020), que avaliaram edifícios container. Esse achado tem uma grande importância na prática de projeto e construção, pois permite que uma maior opção de cores, principalmente aquelas mais escuras, seja utilizada nas fachadas da edificação quando o BBC é empregado (em termos de desempenho térmico).

A presença ou não da camada de revestimento de argamassa no painel de BBC exerceu pouca influência nos resultados de desempenho termoenergético, com uma diferença na ordem de 1%. O uso dessa camada apresentou melhores resultados para a maioria dos casos e cidades avaliadas. Portanto, como em termos de impactos ambientais, o uso dessa camada também não representou grandes diferenças, sugere-se que ela seja utilizada pois pode contribuir para o aumento de durabilidade do painel e a questão da resistência ao fogo.

Finalmente, é preciso destacar que itens que influenciam nos resultados como questão dos *setpoints* do equipamento de ar condicionado e agendas de ocupação permaneceram fixos na simulação, o que é uma limitação comum nos estudos de simulação termoenergética de edificações (CALDAS *et al.*, 2020). Estudos futuros, com olhar específico para hábitos relacionados ao comportamento humano, como Bravaresco *et al.* (2019), devem ser conduzidos para ver até que ponto eles influenciam nos resultados finais.

9.2.Arquivos Climáticos Futuros

Na Figura 44 são apresentados os resultados de consumo de energia para climatização considerando os dados climáticos futuros. Foram considerados as alternativas de BBC de 10 cm e 20 cm (casos extremos) com revestimento e absorvância de 0,6 (pior caso).

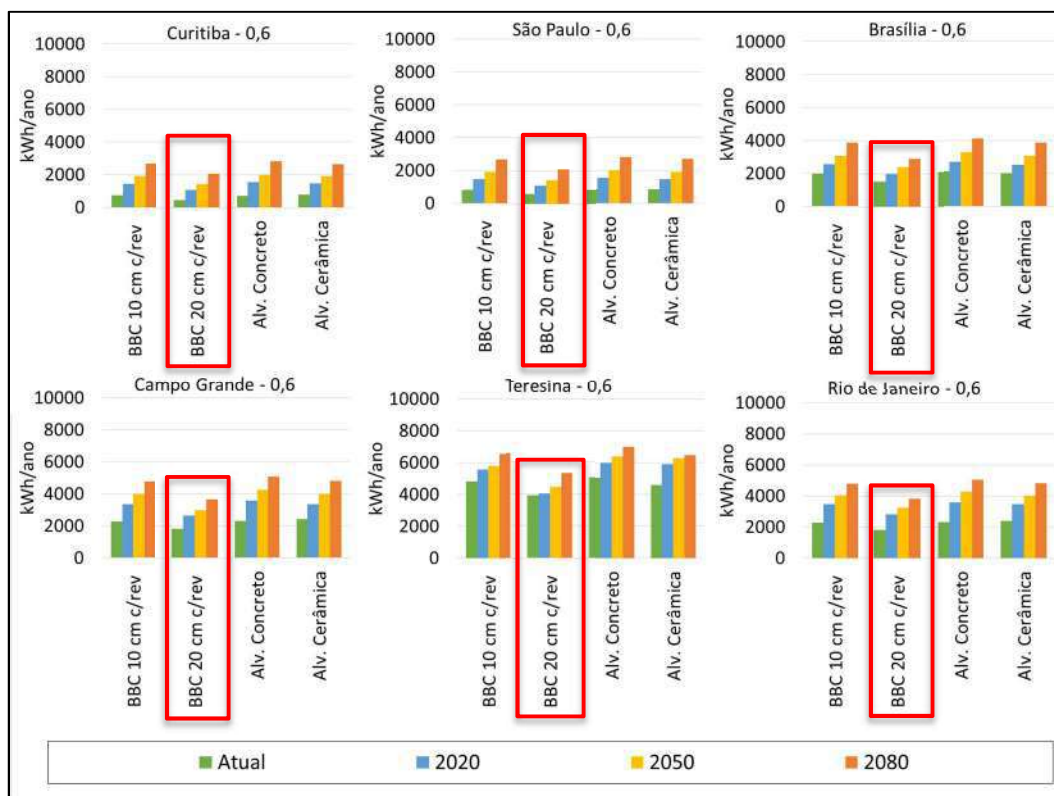


Figura 44 – Consumo de energia para climatização artificial da edificação considerando arquivos climáticos futuros (resultados para absorvância 0,6).

Quando as mesmas edificações são avaliadas para condições climáticas futuras, de acordo com o modelo utilizado, percebe-se que as alternativas de BBC (com espessuras de 10 cm e 20 cm) continuam sendo as mais vantajosas entre os sistemas construtivos avaliados. No entanto, a diferença entre as alternativas é reduzida com o aumento de temperatura, principalmente para a cidade de Curitiba que tem um clima mais frio. Por exemplo, a diferença entre o sistema de alvenaria de blocos de concreto e BBC – 20 cm que era de 72% com os dados climáticos atuais cai para 17% para o ano de 2080.

As cidades mais quentes, como o Rio de Janeiro, Cuiabá e Teresina foram as que tiveram uma menor influência do aumento de temperatura, de acordo com os dados climáticos futuros utilizados. O uso de cores mais escuras nas fachadas (absorvância 0,6) também resultou em maiores diferenças entre o BBC 20 cm com os sistemas convencionais,

similar ao caso com dados climáticos atuais. Esses resultados mostram que o uso de BBC pode ser visto como uma estratégia de adaptação das edificações, em cenários em que a temperatura do planeta irá aumentar.

Existem diferentes modelos existentes para avaliação de dados climáticos futuros, que irão influenciar o consumo de energia elétrica para climatização das edificações e, conseqüentemente os impactos de mudanças climáticas. No entanto, o mais utilizado é o modelo presente na ferramenta *CCWorldWeatherGen* (DIAS *et al.* 2020), que foi empregado na presente pesquisa. Dessa forma, sugere-se que pesquisas futuras possam ser dedicadas a esse tema, avaliando as incertezas referentes aos modelos climáticos existentes para avaliação de dados futuros de temperatura.

10. Avaliação do Impacto de Mudanças Climáticas no Ciclo de Vida da Edificação

Como foi verificado que a etapa de reposição da argamassa (B4) tem um impacto significativo para os sistemas construtivos convencionais, verificou-se como uma análise de sensibilidade adicional, como seriam os resultados caso todas as alternativas tivessem a mesma etapa B4.

Nas Figuras 45 e 46 são apresentados os resultados dos impactos de mudanças climáticas para o método de ACVd, considerando as etapas de manutenção diferentes e iguais entre os sistemas de BBC e alvenaria, respectivamente. Nas Figuras 47 e 48 são apresentados os resultados considerando o método do IPCC, para a edificação avaliada, considerando um ciclo de vida de 50 anos, para os diferentes cenários considerados e zonas bioclimáticas.

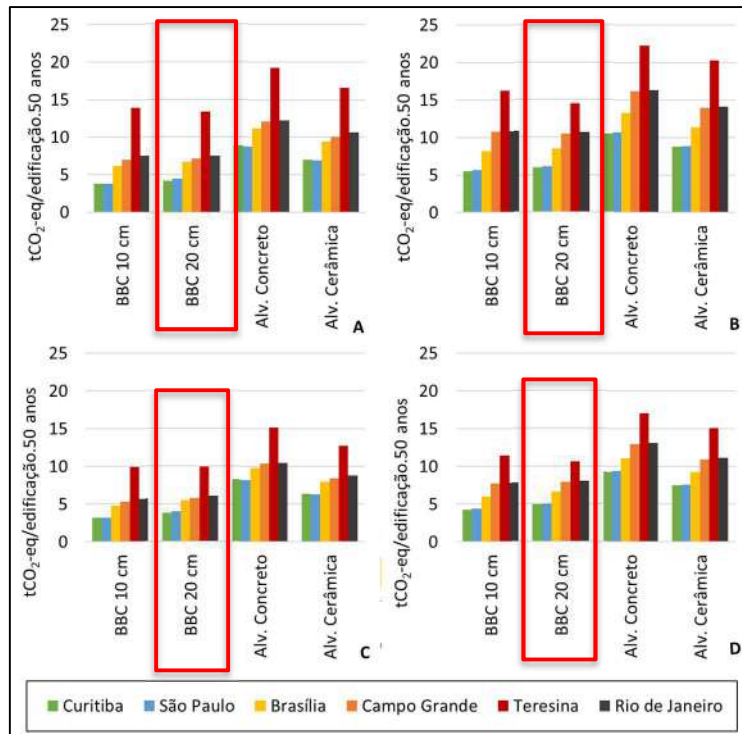


Figura 45 – Emissão de Carbono (EC) no ciclo de vida da edificação habitacional considerando os diferentes cenários e etapas de manutenção para o método de ACVd. (A) Cenário básico. (B) Mudanças Climáticas. (C) Descarbonização da Matriz de Energia. (D) Mudanças Climáticas e Descarbonização da Matriz de Energia.

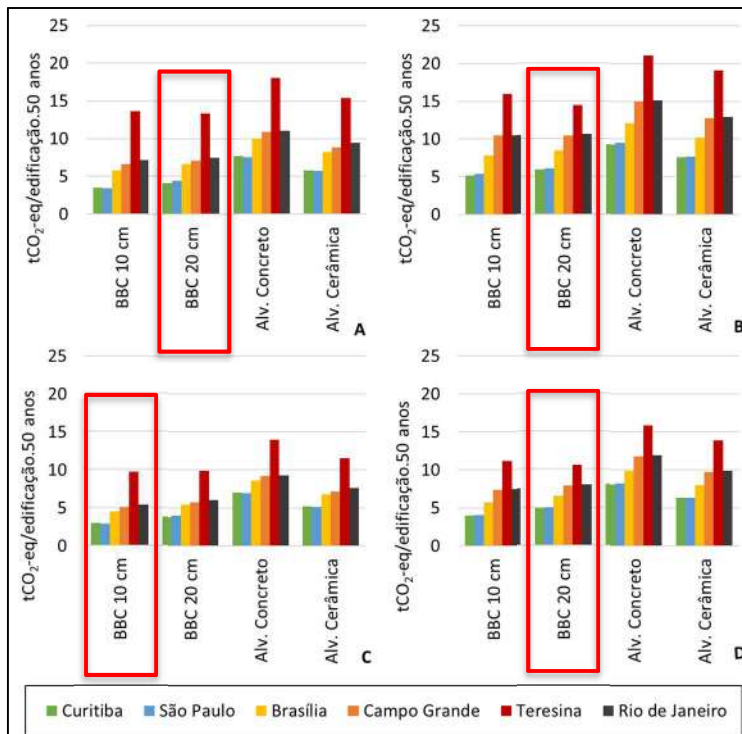


Figura 46 – Emissão de Carbono (EC) no ciclo de vida da edificação habitacional considerando os diferentes cenários e mesma etapas de manutenção para o método de ACVd. (A) Cenário básico. (B) Mudanças Climáticas. (C) Descarbonização da Matriz de Energia. (D) Mudanças Climáticas e Descarbonização da Matriz de Energia.

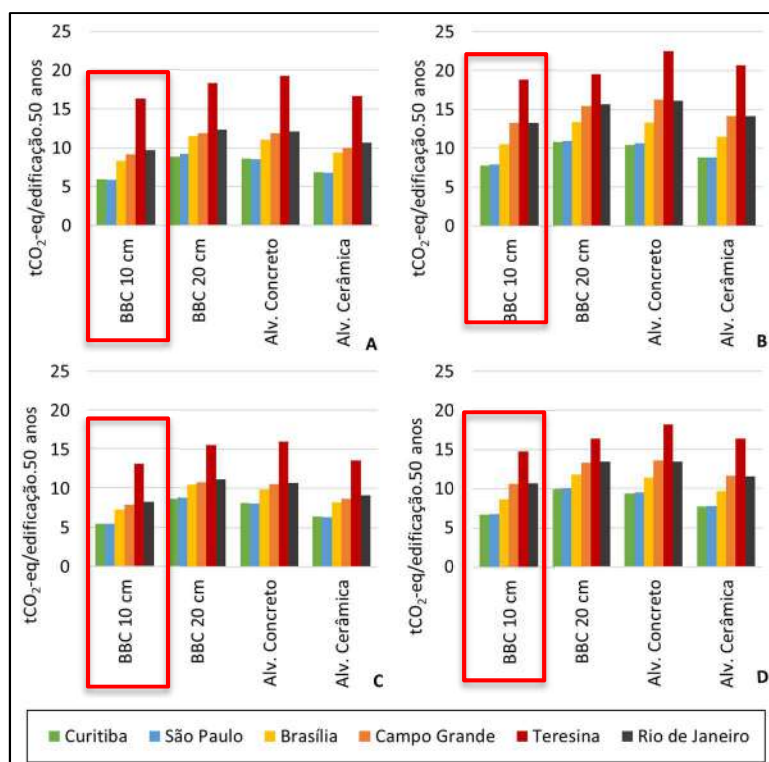


Figura 47 – Emissão de Carbono (EC) no ciclo de vida da edificação habitacional considerando os diferentes cenários e etapas de manutenção para o método do IPCC. (A) Cenário básico. (B) Mudanças Climáticas. (C) Descarbonização da Matriz de Energia. (D) Mudanças Climáticas e Descarbonização da Matriz de Energia.

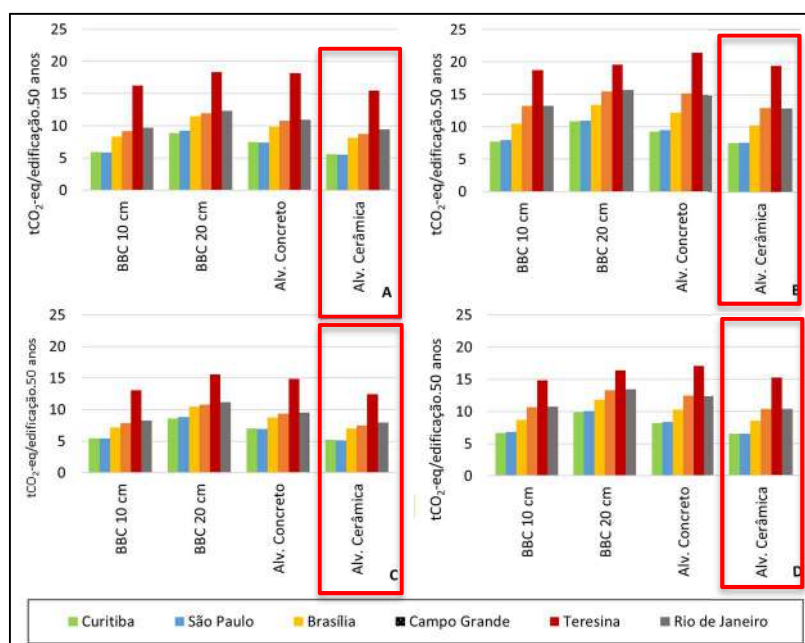


Figura 48 – Emissão de Carbono (EC) no ciclo de vida da edificação habitacional considerando os diferentes cenários e mesma etapas de manutenção para o método do IPCC. (A) Cenário básico. (B) Mudanças Climáticas. (C) Descarbonização da Matriz de Energia. (D) Mudanças Climáticas e Descarbonização da Matriz de Energia.

Quando a edificação habitacional é avaliada, considerando agora a etapa de operação com a contabilização do consumo de energia para climatização, percebe-se que o BBC se torna mais vantajoso (para ambas espessuras de parede) para o impacto de EC quando o método da ACVd é utilizado. Para a espessura de 20 cm os resultados ainda são mais favoráveis, pois, o aumento da espessura da parede na fachada leva a uma redução do consumo de energia para climatização artificial da edificação, variando de 15% (cidade do Rio de Janeiro) a 43% (cidade de Curitiba) em relação ao sistema de alvenaria de concreto e cenários de descarbonização da matriz de energia e mudanças climáticas, respectivamente. Para o cenário que foi considerado somente a descarbonização da matriz de energia a alternativa de BBC 10 cm foi o mais vantajoso tendo em vista que a participação das emissões na operação da edificação são menores fazendo as emissões do ciclo de vida de produção, manutenção e fim de vida das vedações serem mais relevantes e resultando em menores valores finais.

Embora tenha sido considerada uma matriz de energia elétrica mais limpa (para os cenários onde a descarbonização da matriz) também para a produção dos materiais da etapa de reposição e fim de vida da edificação, elas tiveram influência insignificante (menor que 3%) nos resultados finais. Isso se dá principalmente pelo fato da produção da argamassa (material utilizado na reposição) e etapas de fim de vida não terem grande influência do consumo de energia elétrica.

As argamassas tem seu impacto de mudanças climáticas influenciado principalmente pelo cimento Portland e cal hidratada, que estão relacionados principalmente ao processo de calcinação e combustíveis fósseis utilizados nesse processo, como é possível ver no estudo de CALDAS *et al.* (2020) que avaliaram diferentes formulações de argamassa produzidas no Brasil. O fim de vida é influenciado principalmente pelo consumo de diesel, utilizado no transporte dos resíduos e processo de reciclagem.

A troca (*trade-off*) entre o aumento de espessura do sistema de fechamentos verticais com a diminuição do consumo de energia operacional já foi verificado em diversos estudos da literatura, como apontam CABEZA *et al.* (2014) e ROCK *et al.* (2020). Especificamente para a realidade dos países do hemisfério Norte, uma estratégia bastante utilizada é o aumento das camadas de isolamento térmico, que acabam por aumentar os impactos da construção já que a produção desses isolantes, normalmente de fontes petroquímicas, como o EPS, poliuretano, é elevada. Nessa ótica, o emprego de materiais com

propriedades isolantes, mas com uma produção mais limpa e com uso de biomateriais, de fonte renovável, como é o caso do BBC, denominado por ROCK *et al.* (2020) de “investimento de baixo carbono”, se mostra como uma estratégia bastante atrativa. O Brasil e outros países tropicais e subtropicais ainda podem ter vantagens adicionais dada as suas características climáticas e de biodiversidade (SCARANO *et al.*, 2018).

Quando o método do IPCC é empregado as emissões incorporadas do BBC para a parede de 20 cm devido à produção dos materiais, transporte, manutenção e fim de vida são mais impactantes que as alternativas convencionais, como pode ser visto nas Figuras 47 e 48. Nesse caso o BBC com 10 cm se torna a alternativa mais vantajosa para todos os cenários apresentados, pois possui menor emissões incorporadas e sua energia para a climatização é semelhante aos sistemas convencionais.

A partir desses resultados, quando o método da ACVd é utilizado, verifica-se que para projetos habitacionais o uso mais indicado do BBC seria considerando uma parede de 20 cm, pois além ter um menor impacto de mudanças climáticas, o aumento da espessura das paredes contribui para o aumento do desempenho acústico, resistência mecânica, ao fogo, estanqueidade, entre outros requisitos importantes para um melhor desempenho da edificação. Especificamente para essa categoria de impacto, paredes mais espessas podem levar a valores negativos (geração de créditos), para as formulações de BBC com maior teor de partículas de bambu, como o BBC 354 e o BBC 319, apresentadas anteriormente.

Desta forma, qual o método seria o mais adequado para avaliação do potencial de impacto de mudanças climáticas de bioconcretos? Especificamente para biomateriais, como é o caso do BBC, a contabilização do carbono biogênico é um item essencial, e, caso não seja contabilizado não mostrará os principais benefícios climáticos quando biomateriais são empregados. A maior preocupação dos pesquisadores em termos da contabilização dos créditos gerados pelo carbono biogênico é o fato de muitas vezes não está claro qual será o fim de vida do produto, como apontam PAWEZIK *et al.* (2013) e FOUQUET *et al.* (2015). Por exemplo, se um biomaterial é incinerado no seu fim vida (o que é uma prática comum em muitos países) todo o CO₂ absorvido na fotossíntese será devolvido à atmosfera.

Especificamente para o BBC e outros bioconcretos como são biomateriais misturados com materiais cimentícios, os tipos de fim de vida possíveis são: aterramento ou

reciclagem, e, assim, dificilmente o CO₂ absorvido (ou uma parte muito pequena) irá retornar à atmosfera, tendo em vista que o material cimentício tende a mineralizar a biomassa. Dessa forma, os bioconcretos podem ser vistos como estoques de carbono. Essa característica reforça a importância de dar créditos ao carbono biogênico para esses materiais, como é visto nos estudos de IP e MULLER (2012), PRETOT *et al.* (2014), ARRIGONI *et al.* (2017) E PITTAU *et al.* (2018), que avaliaram concreto de cânhamo.

Do ponto de vista da aplicação prática e padronização dos estudos de ACV e EC, a nova versão da EN 15804:2019, tende a melhorar esse entendimento já que uma das suas mudanças é tornar a avaliação das etapas de fim de vida como um requisito mínimo e não somente as etapas de produção do material, como a versão anterior. Essa nova exigência acaba com a incerteza relacionada ao tipo de fim de vida e o carbono biogênico, que pode ser quantificado e avaliado da forma mais adequada, e estimula o desenvolvimento de produtos circulares, já que também possibilita a contabilização dos benefícios associados quando o material é reaproveitado em seu fim de vida. Dessa forma, é de se esperar que as novas formas de avaliação ambiental de produtos, principalmente no contexto da Comunidade Europeia, estimulem o desenvolvimento de biomateriais circulares, com base no contexto de mudanças climáticas e economia circular.

Nesta ótica, foi possível verificar que o uso do BBC foi mais vantajoso para os quatro cenários avaliados e para as diferentes zonas bioclimáticas brasileiras. Esses resultados reforçam a conclusão que o uso do BBC é uma boa estratégia para mitigação e adaptação de edificações habitacionais brasileiras para a questão das mudanças climáticas. Constatou-se também que a contabilização do carbono biogênico (considerado na metodologia de ACVd) exerce grande influência nos resultados finais.

Quando a análise de sensibilidade é realizada, considerando o mesmo impacto da etapa de reposição (B4) para as quatro alternativas construtivas, observa-se que a alternativa BBC 10 cm e BBC 20 cm foram ainda as mais vantajosas quando o método ACVd é utilizado. Quando o método do IPCC é empregado a alternativa de alvenaria cerâmica que se mostra a mais vantajosa para a maioria dos cenários.

Nessa ótica, foi possível constatar que o uso do BBC foi mais vantajoso para a maioria dos cenários avaliados e para as diferentes zonas bioclimáticas brasileiras. Esses resultados reforçam a conclusão que o uso do BBC é uma boa estratégia para mitigação

e adaptação de edificações habitacionais brasileiras para a questão das mudanças climáticas. Constatou-se também que a contabilização do carbono biogênico (considerado na metodologia de ACVd) exerce grande influência nos resultados finais.

Indo mais adiante, para um cenário onde a produção de energia local nas edificações, por exemplo, com uso de painéis fotovoltaicos (PV), seja uma prática mais difundida no país, o emprego de BBC nas edificações tende a diminuir a área necessária de PVs. Isso deve ocorrer, pois será necessário menor energia para climatização, e, conseqüentemente menor impacto para a produção desses painéis e manutenções necessárias, quando o ciclo de vida é considerado. Nessa ótica, o uso do BBC pode trazer vantagens indiretas, principalmente em um contexto onde edificações zero energia (*Net Zero Energy Buildings* – NZEB) sejam cada vez mais demandadas, o que tende ser uma prática cada vez mais requisitada no setor, principalmente como uma alternativa de atendimento das NDCs dos países (UNEP, 2019).

Os resultados ainda mostraram que existe uma grande incerteza quando todo o ciclo de vida de uma edificação é considerado, chegando a uma diferença de 357%, para o caso de BBC 10 cm com a edificação localizada em Curitiba e Teresina, entre os cenários básico e um cenário de aumento de temperatura devido ao aquecimento global. Há diferenças também em relação ao método utilizado, sendo comparados aqui o da ACVd de LEVASSEUR *et al.* (2010) e do IPCC. Essas diferenças demonstram a importância do FADCE, indicando a necessidade de se considerar diferentes aspectos dinâmicos quando uma edificação é avaliada em termos das mudanças climáticas. Outros autores que desenvolveram ferramentas de análise dinâmicas chegaram a diferenças de 60% (RASMUSSEN *et al.*, 2018).

Foi possível verificar uma grande diferença nos resultados entre os tipos de zonas bioclimáticas, sendo o maior para a cidade de Teresina (ZB7- clima tropical) e menor Curitiba (ZB-1 – Clima temperado). CALDAS *et al.* (2017) e CALDAS *et al.* (2020) também avaliaram essas cidades e verificaram que essas duas apresentaram maior e menor impactos no ciclo de vida de sistemas construtivos. INVIDIATA e GHISI (2016) avaliaram o consumo de energia para Curitiba e Belém (ZB8 – clima tropical) e observaram menor e maior impacto, respectivamente, com grandes diferenças entre os resultados. Esses achados indicam a importância de se considerar diferentes zonas

climáticas na avaliação das mudanças climáticas das edificações, ainda mais para o caso de países continentais, como é o caso do Brasil.

Na Figura 49 é apresentada a evolução do forçamento radiativo (em W/m^2), que representa o impacto nas mudanças climáticas, para as diferentes soluções construtivas e cenários avaliados, considerando as cidades onde ocorreu o menor (Curitiba) e maior impacto (Teresina).

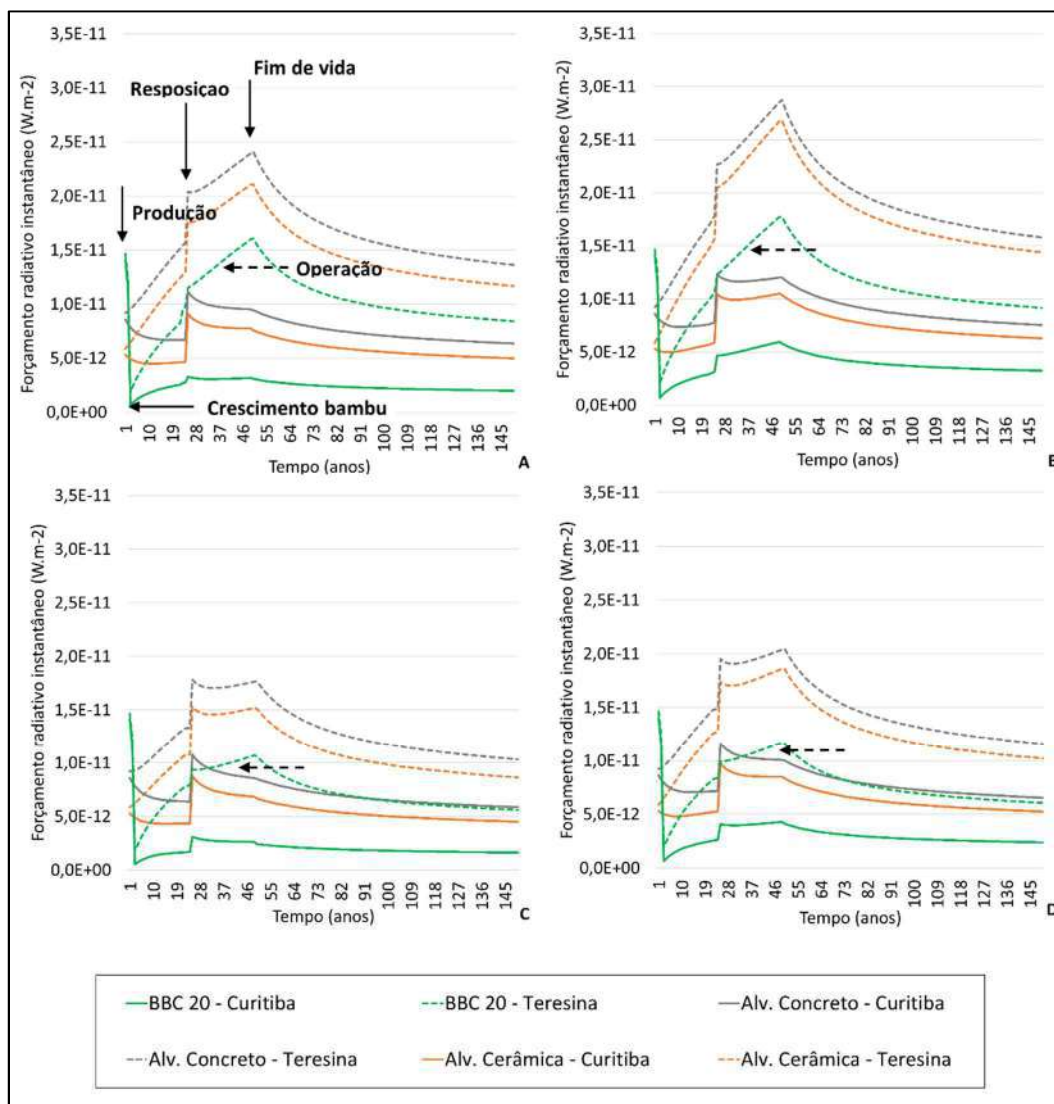


Figura 49 – Forçamento radiativo instantâneo no ciclo de vida da edificação habitacional considerando os diferentes cenários para o método ACVd para as cidades de Curitiba e Teresina. (A) Cenário básico. (B) Mudanças Climáticas. (C) Descarbonização da Matriz de Energia. (D) Mudanças Climáticas e Descarbonização da Matriz de Energia.

O forçamento radiativo ao longo do tempo permite uma avaliação visual importante, que é possível observar onde está localizado o impacto das diferentes etapas do ciclo de vida

consideradas (indicados pelas setas na Figura 49). O pico inicial se deve ao aumento do forçamento radiativo pelas emissões de GEE na produção dos materiais e transporte (ano 1). O decréscimo expressivo para o BBC está relacionado ao período que o bambu volta a crescer na plantação, diminuindo consideravelmente o impacto de mudanças climáticas. O terceiro pico notável se deve a reposição dos materiais e o último ao fim de vida, e, a partir daí começa um decréscimo até se estabilizar. Cidades mais quentes como Teresina (representada pelas curvas de linhas tracejadas) também é bastante visível.

Finalmente, as inclinações (indicadas pelas setas tracejadas), após os picos demonstram o impacto das emissões de GEE devido ao consumo de energia elétrica na edificação (operação). Para o cenário onde somente o aumento de temperatura devido às mudanças climáticas é considerado (Figura 49B) a inclinação é mais acentuada. Por outro lado, para o cenário que considera somente a descarbonização da matriz de energia (Figura 49C) a inclinação é reduzida e a estabilização ocorre mais rapidamente. As formas das curvas e picos verificados na Figura 49 se assemelham aos resultados dos estudos de FOUQUET *et al.* (2015), PEÑALOZA *et al.* (2016), PITTAUL *et al.* (2018) E PITTAU *et al.* (2019) que também compararam diferentes biomateriais de construção com sistemas construtivos convencionais como concreto e cerâmica, indicando que os resultados estão coerentes.

Nas Figuras 50 e 51 são apresentados como é a divisão entre as emissões incorporadas e operacional no ciclo de vida da edificação e posteriormente, na Figura 52, como as emissões incorporadas estão divididas de acordo com os estágios do ciclo de vida considerados.

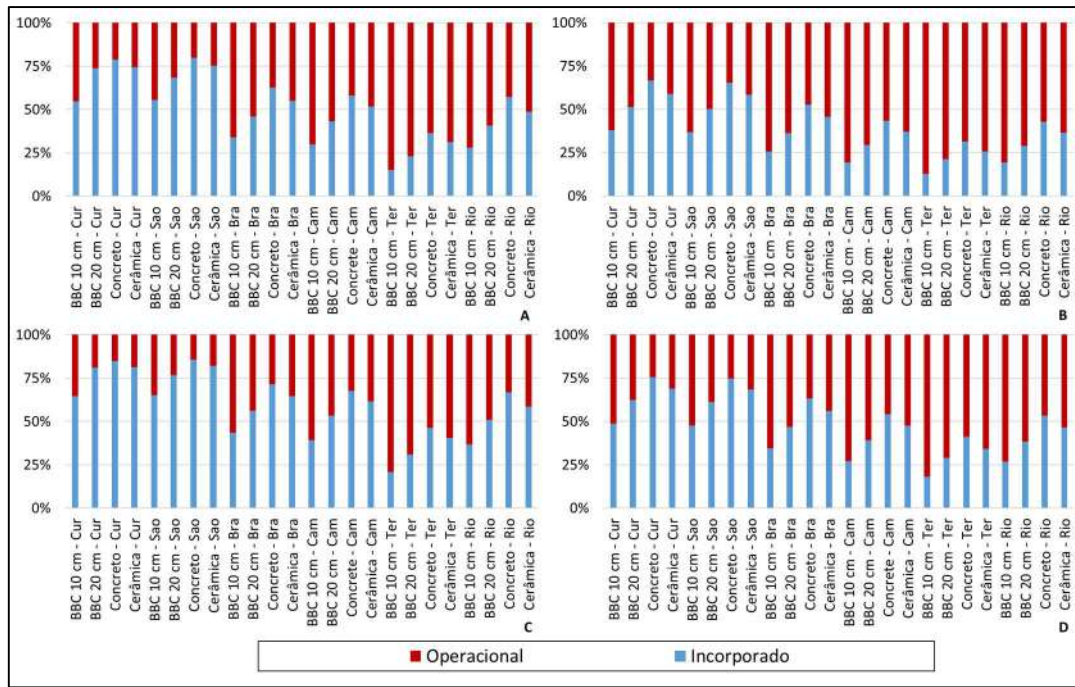


Figura 50 – Participação da Emissão de Carbono (EC) incorporada e operacional para o método da ACVd. (A) Cenário básico. (B) Mudanças Climáticas. (C) Descarbonização da Matriz de Energia. (D) Mudanças Climáticas e Descarbonização da Matriz de Energia.

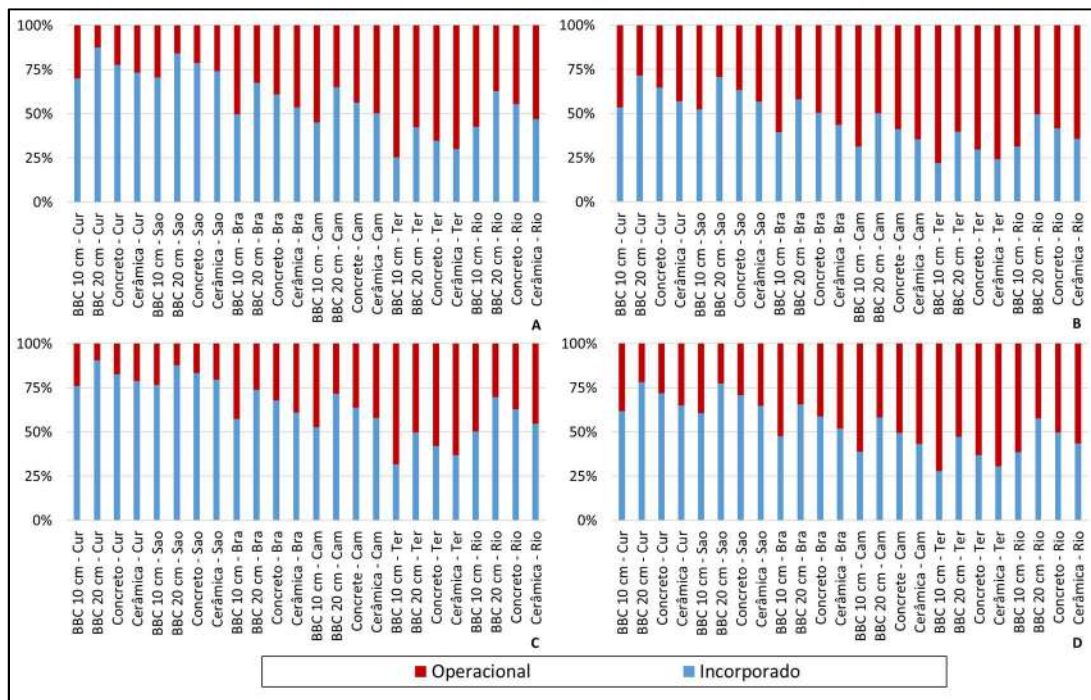
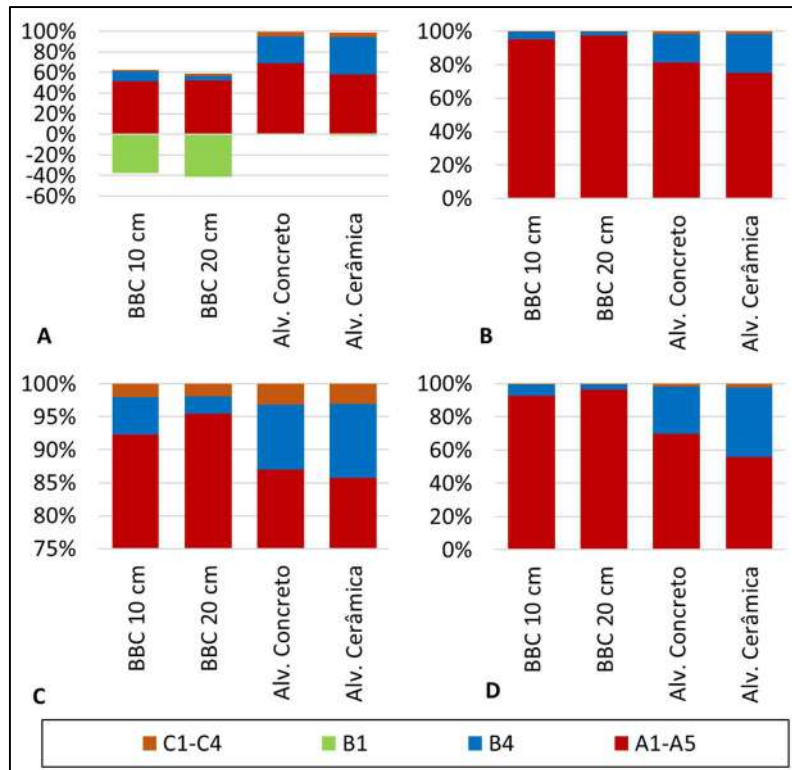


Figura 51 – Participação da Emissão de Carbono (EC) incorporada e operacional para o método do IPCC. (A) Cenário básico. (B) Mudanças Climáticas. (C) Descarbonização da Matriz de Energia. (D) Mudanças Climáticas e Descarbonização da Matriz de Energia.



A1-A5 – Etapas de produção materiais e construção. B1 – Uso (crescimento bambu e carbonatação). B4 – Reposição. C1-C4 – Fim de vida.

Figura 52 – Inventário de GEE na participação das etapas incorporadas do ciclo de vida. (A) CO₂. (B) CH₄. (C) N₂O. (D) CO.

Verifica-se que para as cidades mais quentes como Teresina, Rio de Janeiro e Campo Grande, e para o cenário de aumento de temperatura devido às mudanças climáticas (Figuras 50B e 51B), a participação da etapa de operação são as maiores, chegando a 76% para a cidade de Teresina com o uso do BBC 10. Enquanto que para as cidades de climas mais amenos, como Curitiba, São Paulo e Brasília, e para o cenário de descarbonização da matriz de energia elétrica (Figuras 50C e 51C) a etapa de operação apresenta menor participação nas emissões de GEE totais no ciclo de vida da edificação, chegando apenas a 12% para a cidade de Curitiba com o uso do BBC 20. Esses resultados mostram a importância de se considerar diferentes zonas climáticas e cenários nos modelos de ACV.

Dentre as etapas do ciclo de vida, a produção dos materiais e construção (A1-A5) são as mais impactantes, seguida pela reposição (B4) e uso (B1) para o caso dos BBC, em que ocorre o processo de fotossíntese no bambu (barras verdes na Figura 52A). Esses resultados vão ao encontro dos achados de CHAU *et al.* (2015) e ROCK *et al.* (2020), que verificaram que essas etapas (construção, reposição/manutenção) tendem a ser as

mais significativas ao longo do ciclo de vida das edificações, portanto, merecendo atenção especial dos projetistas.

Para a produção de blocos de concreto, BBC e argamassa, o cimento Portland é o principal responsável pelos impactos das mudanças climáticas, pois emite uma grande quantidade de CO₂ e N₂O, principalmente durante a produção de clínquer. A produção de blocos cerâmicos afeta principalmente a emissão de CO devido ao uso de cavacos de madeira como o principal combustível. A cal hidratada usada na argamassa também tem um impacto considerável na emissão de CO₂ e N₂O, que ocorre durante a calcinação, e devido ao combustível fóssil usado durante sua produção. Para a BBC, o uso de metacaulim (considerando carvão vegetal como combustível) resulta em uma quantidade maior de emissões de CH₄ e CO, enquanto as cinzas volantes têm a menor quantidade de todos os GEE.

Quanto às alternativas de alvenaria, o revestimento de argamassa é quase três vezes a utilizada na BBC, e o impacto nas emissões de GEE mostra um valor semelhante. SOUZA *et al.* (2016), CALDAS *et al.* (2017), CALDAS e TOLEDO FILHO (2018) e CALDAS *et al.* (2020) também confirmam que o revestimento argamassado é responsável por consideráveis impactos das mudanças climáticas nos sistemas construtivos de alvenaria brasileiros, devido ao cimento e à cal hidratada utilizados como ligantes na fabricação de argamassa. Para o BBC 20, o impacto relativo do revestimento é reduzido, pois a espessura do BBC aumenta, enquanto o revestimento argamassado permanece com a mesma espessura (1 cm).

No Quadro 26 é apresentado a classificação (ordem em termos de vantagem) das alternativas avaliadas para as outras categorias de impacto ambiental, considerando o cenário baseline.

Quadro 26 – Avaliação classificação das alternativas das outras categorias de impacto ambiental sendo 1 – mais vantajosa e 4 – menos vantajosa.

Categorias de impacto	BBC 10 cm	BBC 20 cm	Alv. Concreto	Alv. Cerâmica
Depleção da camada de ozônio (ODP)	1	2	4	3
Acidificação (AP)	1	2	4	3
Eutrofização (EP)	1	2	4	3
Formação de fotooxidantes (POCP)	3	4	2	1
Depleção abiótica de elementos (ADP-e)	3	4	2	1

Categorias de impacto	BBC 10 cm	BBC 20 cm	Alv. Concreto	Alv. Cerâmica
Depleção abiótica de combustíveis fósseis (ADP-ff)	1	2	4	3

Embora tenha sido apresentado somente o cenário baseline, os resultados foram iguais para os outros cenários. Nota-se que para a maioria das categorias a alternativa de BBC 10 cm foi a mais vantajosa. As categorias de POCP e ADP-e têm grande influência do metacaulim que é utilizado para a produção do BBC, que já foi discutido anteriormente. Especificamente, para a categoria de ADP-e o consumo de energia na operação da edificação tem um impacto bem menos significativo que as outras etapas do ciclo de vida. Dessa forma, o ganho trazido pelo melhor desempenho térmico do BBC não traz benefício significativo do ponto de vista dessa categoria de impacto.

11. Referências

Amziane, S.; Sonebi, M., 2016. Overview on bio-based building material made with plant aggregate. RILEM Technical Letters, 2016, 1 (31–38).

Bavaresco, M. V., D'Oca, S., Ghisi, E., Lamberts, E., 2019. Methods used in social sciences that suit energy research: A literature review on qualitative methods to assess the human dimension of energy use in buildings. Energy Build. 29, 394-416.

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 : A review. Renew. Sus. Energy Rev. 29, 394-416.

Caldas, L. R.; Carvalho, M. T. M.; Toledo Filho, R. D. Avaliação de estratégias para mitigação dos impactos ambientais de revestimentos argamassados no Brasil. Ambiente Construído, v. 20, n. 3, p. 343-362, 2020.

Caldas, L. R.; Lira, J. S. De M. M.; Sposto, R. M. 2017. Avaliação do ciclo de vida de habitações de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e painéis pré-moldados de concreto considerando diferentes zonas bioclimáticas. LALCA - . Revista Latino-amer. em Aval. do Ciclo de Vida, Brasília, v. 1, n. 1, p. 138-167.

Caldas, L. R.; Toledo Filho, R. D. 2018. Avaliação do Ciclo de Vida de materiais cimentícios utilizados no Brasil: estudo para argamassas, graute e bloco de concreto. R. Latino-amer. em Aval. do Ciclo de Vida, Brasília, v. 2, n. 2, p. 34-61, jul./dez. 2018.

Caldas, L.R, Abreu-Harbach, L. V., Hora, K. E. 2020. Avaliação ambiental de alternativas construtivas de um edifício contêiner. PARC Pesquisa Em Arquitetura E Construção, 12, e019011.

Celik, K.; Meral, C.; Gursel, A. P.; Mehta, P. K.; Horvath, A.; Monteiro, P. J. M., 2015. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of selfconsolidating concrete mixtures made with blended Portland cements containing fly ash and limestone powder. Cement and Concrete Composites, 2015, 56, (59–72).

- Chen C, Habert G., Bouzidi Y., Jullien A., Ventura A., 2010. LCA allocation procedure used as an initiative method for waste recycling: an application to mineral additions in concrete. *Resour Conserv Recycl.* 54 (12), 31–40.
- Conselho Brasileiro De Construção Sustentável – CBCS, 2014. Projeto Avaliação de Ciclo de Vida Modular de Blocos e Pisos de Concreto.
- Dallagnol, F. S., 2012. Estimativa de teores de carbono em seis espécies de bambu por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR). Dissertação de Mestrado, UFPR, Curitiba, PR, Brasil.
- Dias, J. B., Carrilho da Graça, G., Soares, P. M. M., 2020. Comparison of methodologies for generation of future weather data for building thermal energy simulation, *Energy Build.* 206 (2020). doi:10.1016/j.enbuild.2019.109556
- EPD System, 2013. Product Category Rules date 2013-02-12. Un cpc 375 Concrete. 2013.
- European Committee for Standardization. EN 15804: sustainability of construction works: environmental product declarations: core rules for the product category of construction products. Brussels, 2019.
- 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.* 90, 51 – 59.
- Fundação João Pinheiro, 2016. Déficit Habitacional no Brasil | 2013-2014. Belo Horizonte, Brazil. 2016.
- Garcia, R., Freire, F., 2014. Carbon footprint of particleboard: a comparison between ISO/TS 14067, GHG Protocol, PAS 2050 and Climate Declaration. *J. Clean. Prod.* 66, 199 – 209.
- Hossain, M. U., Poon, C. S., Dong, Y. H., Xuan, D., 2018. Evaluation of environmental impact distribution methods for supplementary cementitious materials. *Renew. Sust. Energy Rev.* 82, 597-608.
- Indústria Brasileira de Árvores, 2019. Anuário Estatístico da IBÁ 2019 - Ano Base 2018.
- Invidiata, A., Ghisi, E. 2016. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil, *Energy Build.* 130 (2016) 20–32. doi:10.1016/j.enbuild.2016.07.067.
- Ip, K., Miller, A., 2012. Life cycle greenhouse gas emissions of hemp–lime wall constructions in the UK. *Res. Cons. Recycl.* 69, 1-9.
- Jarre, M., Petit-Boix, A., Priefer, C., Meyer, R., Leipold, S., 2020. Transforming the bio-based sector towards a circular economy - What can we learn from wood cascading? *For. Policy Econ.* 110, 101872. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.01.017>.

Joint Research Centre, 2010. Analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle assessment: background document. (ILCD Handbook). 2010.

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.* 44, 3169-3174.

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 Minas e Energia (MME). Balanço Energético Nacional. Relatório Síntese ano base 2017. Brasília-DF, 2018.

Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas PBMC, 2018. Kahn, S., Santos, A. (Ed.). Tecnologias disruptivas de baixo carbono para setores-chave no Brasil: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. PBMC, COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.

Peñaloza, D., Erlandsson, M., Falk, A., 2016. Exploring the climate impact effects of increases use of bio-based materials in buildings. *Constr. Build. Mater.* 125, 219-226.

Pessoto, L., Silva, F. B.; Oliveira, L. A.; John, V. M. Avaliação do ciclo de vida de uma edificação residencial: análise dos impactos ambientais incorporados pelos materiais de construção. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2018, São Paulo. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2018.

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.* 129, 117-129.

Pittau, F., Lumia, G., Heeren, N., Iannaccone, G., Habert, G., 2019. Retrofit as a carbon sink: The carbon storage potentials of the EU housing stock. *J. Clean. Prod.* 214, 365-376.

Rahim, M., Douzane, O., Tran Le, A. D., Langlet, T., 2016. Effect of moisture and temperature on thermal properties of three bio-based materials. *Constr. Build. Mater.* 111, 1119–1127.

Rasmussen, T. Malmqvist, A. Moncaster, A.H. Wiberg, H. Birgisdóttir, 2018. Analysing methodological choices in calculations of embodied energy and GHG emissions from buildings, *Energy Build.* 158 (2018) 1487–1498. doi:10.1016/j.enbuild.2017.11.013.

Rock, M. et al., 2020. Embodied GHG emissions of buildings -The hidden challenge for effective climate change mitigation *Applied Energy*, 258 (2020), pp. 114107.

Scarano, F.R., Santos, A.S., Ribeiro, S.K., Nobre, C.A., Marengo, J.A., Omoto, J.P., Ceotto, P., Loyola, R., Pires, A.P.F., Ribeiro, J.B., Carneiro, B.L.R., 2018. Potência Ambiental da Biodiversidade: um caminho inovador para o Brasil: Sumário para Tomadores de Decisão, 1a ed. PBMC/COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro. 13p. ISBN: 978-85-285-0378-4.

Silva, F. B. Yoshida, O. S., Diestelkamp, E. Oliveira, L A. Relevance of including capital goods in the life cycle assessment of construction products. *LALCA Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida*, Edição Especial VI Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida, p. 7-22, 2018.

Souza, D. M., Lafontaine, M., Charron-Doucet, F., Chappert, B., Kicak, K., Duarte, F., Lima, L., 2016. Comparative life cycle assessment of ceramic block, concrete block and cast-in-place reinforced concrete exterior walls. *J. Clean. Prod.* 137, 70 –82.

Teixeira, E. R., Mateus R., Camões, A. F., Bragança, L., Branco, F., 2016. Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material. *J. Clean. Prod.* 112, 2221 – 2230.

UNEP, 2019. Global Status Report for Buildings and Construction. Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector, 2019. Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector.

Van Den Heede, P., De Belie, N., 2012. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations". *Cem. Conc. Comp.* 34 (4), 431–442.

Viana, F. S., Souza, H. A. de, & Gomes, A. P., 2019. Residência em contêiner: comparativo de estratégias para a melhoria do desempenho térmico. *PARC Pesquisa Em Arquitetura E Construção*, 10, e019011.

CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E PESQUISAS FUTURAS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões encontradas na pesquisa realizada nesta tese. Ao final, são identificados itens a serem buscados em pesquisas futuras.

1. Conclusões

Quanto à Ferramenta de Análise Dinâmica para Avaliação da Emissão de Carbono em Edificações (FADCE) pelo Uso de Biomateriais produzida na pesquisa:

- A ferramenta é mais sensível e permite uma avaliação mais robusta de biomateriais, como por exemplo o Bioconcreto de Bambu (BBC);
- A unidade funcional tem uma grande influência dos critérios de desempenho utilizados para a avaliação ambiental de biomateriais inovadores, como é o caso do BBC. Para o caso de avaliação de fechamentos verticais, recomenda-se utilizar pelo menos dois tipos de critérios de desempenho, para o uso pretendido, como por exemplo o térmico e acústico;
- O método de ACVd se mostrou mais adequado e sensível para a avaliação do BBC, quando comparado como o do IPCC, devido principalmente a contabilização do carbono biogênico. Recomenda-se que o primeiro seja empregado para a avaliação de biomateriais, ainda mais quando forem considerados produtos de longa vida útil, como é o caso de sistemas construtivos ou edificações;
- Saber o biomaterial que gerou o resíduo (exemplo do BBC: colmos ou produtos laminados) é muito importante, pois influencia na contabilização carbono biogênico e processo de alocação.

Quanto ao Bioconcreto de Bambu (BBC):

- O BBC tem potencial de mitigar os impactos de mudanças climáticas do setor de edificações (devido à redução da emissão de carbono (EC) no ciclo de vida), como também, outros impactos ambientais como depleção da camada de ozônio,

acidificação, eutrofização e depleção de combustíveis fósseis quando comparados a sistemas construtivos convencionalmente utilizados no país;

- O uso de BBC nos fechamentos verticais de edificações habitacionais, em comparação com sistemas construtivos convencionais (alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto), foi mais vantajoso, para todas as zonas bioclimáticas brasileiras (1, 3, 4, 6, 7 e 8) avaliadas nesta pesquisa;
- O BBC pode ser considerado uma alternativa estratégica para a adaptação das edificações brasileiras às mudanças climáticas, devido principalmente a seu melhor desempenho térmico em cenários futuros de aumento de temperatura média do planeta;
- O BBC pode ser considerado uma alternativa de baixo investimento de carbono (termo utilizado por ROCK *et al.* (2020)), pois além de diminuir as emissões de GEE operacionais tem um menor carbono incorporado que tecnologias convencionalmente utilizadas.

Quanto a formulação, especificação e otimização da produção do bioconcreto de bambu no Brasil:

- A produção do BBC nas regiões Sudeste e Sul se mostrou ser mais vantajosa que a região Norte e Centro-Oeste, devido a maior disponibilidade e menor distância de transporte dos insumos utilizados para sua produção (principalmente a cinza volante);
- O transporte dos insumos se torna um aspecto crítico para o impacto de mudanças climáticas quando há um aumento do teor de resíduos de bambu na composição do BBC;
- O cimento se mostrou ser o material mais impactante para a produção do BBC, seguida pelo metacaulim;
- Algumas alternativas para a diminuição do impacto de mudanças climáticas do BBC: aumento do teor de resíduos de bambu, diminuição do consumo de cimento CPV, substituição por cimento CII-E, substituição parcial por adições minerais

pozolanicas (principalmente adições provenientes de outros processos produtivos, na forma de resíduos, como cinzas agroindustriais);

- Recomenda-se a especificação de metacaulim calcinado por fontes renováveis, como cavacos de madeira, para a diminuição do impacto de mudanças climáticas;
- O uso de revestimento argamassado (em espessuras de até 1 cm) ou resina acrílica (com vida útil de pelo menos 5 anos) como alternativa de aumento da durabilidade biológica do BBC é viável ambientalmente.

Quanto ao contexto da economia circular:

- O uso de resíduos de bambu em vez de bambu virgem para a produção do BBC tende a ser mais vantajoso para o impacto de mudanças climáticas se ele estiver disponível em locais não muito distantes;
- O transporte e, principalmente sua eficiência se mostrou um item crítico. Para o caso específico do Brasil pode ser considerado um obstáculo ainda maior dada as longas distâncias de transporte e baixa eficiência de transporte;
- Verificou-se que é mais vantajoso reaproveitar os resíduos de bambu no bioconcreto do que queimar para a geração de energia elétrica no Brasil. No entanto, ainda é necessário ter dados mais robustos para uma avaliação mais assertiva, por exemplo, utilizando uma abordagem consequencial da ACV;
- Alocar impactos ambientais nos resíduos de bambu podem desestimular o desenvolvimento de bioconcretos circulares.

Quanto ao desempenho termoenergético nas fachadas de edificações residenciais:

- O uso do BBC mostrou maior vantagens para climas frios como a cidade de Curitiba já que ele diminui o consumo de energia tanto para o aquecimento como para resfriamento artificial das edificações;
- A espessura de 20 cm foi a mais vantajosa quando todo o ciclo de vida da edificação é considerado e o carbono biogênico é contabilizado;

- O uso de cores mais escuras nas fachadas (maior absorvência térmica) tem menor impacto no aumento do consumo de energia para o BBC quando comparado com sistemas de alvenaria de concreto e cerâmica;
- O BBC se mostrou mais eficiente que os sistemas convencionais mesmo considerando um aumento de temperatura do ar devido às mudanças climáticas.

A partir do que foi avaliado nesta tese e com base nas premissas e dados utilizados na FADCE, conclui-se que o BBC pode ser considerado um produto de construção multifuncional, pois traz benefícios tanto em termos de mitigação como adaptação às mudanças climáticas e ainda serve como um destino para resíduos que até então seriam descartados ou queimados. Desta forma, ressalta-se aqui a importância dos novos materiais que estão sendo desenvolvidos, levarem em consideração mais de uma das necessidades atuais e futuras da sociedade. Quando se trata de materiais inovadores, principalmente biomateriais, é importante ressaltar que ainda são necessárias mais pesquisas com maior aprofundamento sobre questões relacionadas à durabilidade (físico-química e biológica) e segurança ao fogo, que também devem ser incluídas nas avaliações ambientais e de mudanças climáticas.

2. Pesquisas Futuras

Sugere-se como pesquisas futuras:

Quanto à FADCE:

- Aplicação da FADCE para a avaliação de outros biomateriais e bioconcretos, como o de madeira, de casca de arroz e cânhamo;
- Aplicação da FADCE para avaliação de outras tipologias de edificações, como comerciais, públicas, escolares, etc;
- Atualização da FADCE com a inclusão de outros aspectos dinâmicos, como aqueles relacionados ao comportamento humano;
- Avaliação de diferentes modelos climáticos para obtenção de dados de temperatura futuros;
- Integração da FADCE em um processo BIM (*Building Information Modeling*).

Quanto ao BBC:

- Avaliação experimental termoenergética de construções a partir de construção de protótipos;
- Avaliação experimental dos traços de BBC de EC negativa encontrados nesta pesquisa;
- Avaliação experimental e ambiental do potencial de reciclagem do BBC para a produção de novos bioconcretos (projeto para um ciclo fechado ou também chamado de berço ao berço – *cradle-to-cradle*);
- Avaliação do uso do BBC para outras tipologias de edificações: comerciais, públicas, etc;
- Avaliação do uso de BBC para outras aplicações, como coberturas e elementos de sombreamento;
- Avaliação do uso do BBC para projetos de edificações zero energia (*Net Zero Energy Buildings - NZEB*);
- Avaliação experimental e ambiental de BBC com o uso de outras pozolanas como cinzas agroindustriais (ex. cinza de casca de arroz);
- Avaliação experimental e ambiental de BBC com o uso de terra, no lugar do cimento Portland, como ligante principal.

3. Referências

Rock, M. et al., 2020. Embodied GHG emissions of buildings -The hidden challenge for effective climate change mitigation *Applied Energy*, 258 (2020), pp. 114107.

CAPÍTULO 9 - APÊNDICES

Neste capítulo são apresentados os produtos (artigos científicos, trabalhos técnicos e premiações), divididos em dois grupos: (1) originados diretamente da pesquisa desenvolvida na tese; (2) produtos correlatos ao tema de pesquisa.

1. Produtos Originados a Partir da Pesquisa Desenvolvida na Tese

Artigos Submetidos em Periódicos

1. CALDAS, L. R.; PITTAU, F.; SCHAEFFER, R.; SARAIVA, A.; HABERT, G.; TOLEDO FILHO, R. D. Concrete Versus Ceramic Blocks: Environmental Impacts Evaluation Considering a Country Level Approach. Submissão no Journal **Environment, Development and Sustainability**.
2. CALDAS, L. R.; DA GLORIA, M.; PITTAU, F.; ANDREOLA, V.; HABERT, G.; TOLEDO FILHO, R. D. Evaluation of the Influence of Supplementary Cementitious Materials (SCM) on Environmental Impacts and Mechanical Performance of Wood Bio-Concretes - Submissão no Journal **Construction and Building Materials**.
3. CALDAS, L. R.; SARAIVA, A.; DA GLORIA, M.; SANTOS, A.S.; TOLEDO FILHO, R. D. Wood Waste as CO₂-sink in Bio-concrete – Part of the Solution for a Low Carbon and Circular construction industry? Submissão no Journal **Resources, Conservation and Recycling**
4. CALDAS, L. R.; RODRIGUEZ, L. MENEZES, B. TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação do potencial de mitigação das mudanças climáticas com o uso de colmos de bambu na construção civil brasileira. Submissão na **Revista Latino-Americana de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**.

Artigos aceitos em Periódicos na fase de Revisão

1. CALDAS, L. R.; SARAIVA, A.; ANDREOLA, V. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Bamboo Bio-Concrete as an Alternative for Building's Climate Change Mitigation and Adaptation. Submissão no Journal **Construction and Building Materials**.
2. MAHECHA, R. E. G.; CALDAS, L. R.; GARAFFAA, R. LUCENA, A. L.; SZKLO, A., TOLEDO FILHO, R. D. Constructive systems for social housing deployment in developing countries: a case study using life cycle carbon assessment and cost analysis in Brazil. Journal **Energy and Buildings**.

Artigos Publicados em Periódicos

1. CALDAS, L. R.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação do Ciclo de Vida de materiais cimentícios utilizados no Brasil: estudo para o bloco de concreto e diferentes argamassas. **LALCA - Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 2, p. 34-61, 2018.

2. CALDAS, L. R.; CARVALHO, M. T. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação de estratégias para mitigação dos impactos ambientais de revestimentos argamassados no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 3, p. 343-362, 2020.

Artigos Publicados em Anais de Congresso

1. CALDAS, L. R.; PITTAU, F.; ANDREOLA, V.; SARAIVA, A. ; HABERT, G. ; TOLEDO FILHO, ROMILDO DIAS . Dynamic life cycle carbon assessment of three bamboo bio-concretes in brazil. In: **International Conference on Bio-Based Building Materials**, 2019, Belfast. 3rd International Conference on Bio-Based Building Materials, 2019.
2. CALDAS, L. R.; MENEZES, A. P.; GLORIA, M. Y. R.; ANDREOLA, V. M.; SANTOS, D. O. J.; TOLEDO FILHO, R.D. Carbon footprint and water scarcity assessment of wood bio-concretes: evaluation of different life cycle impact methods. In: **International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies? Construction Materials & Technologies for Sustainability?**, 2019, Nairobi. 18th NOCMAT 2019, 2019.
3. CALDAS, L. R.; ANDREOLA, V.; TOLEDO FILHO, ROMILDO DIAS. Avaliação de indicadores de ecoeficiência na produção de bioconcretos de bambu. In: **Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção**, 2019, Belém. 6º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2019. p. 15-31.
4. CALDAS, L. R.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação ambiental de diferentes tipos e combinações de argamassas de revestimento utilizadas no Brasil. In: **Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, 2019, Goiânia. XIII SBT, 2019.
5. CALDAS, L. R.; GLORIA, M. Y. R.; SANTOS, D. O. J.; ANDREOLA, V. M.; PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D.. Carbon footprint of bamboo particles, rice husk and wood shavings cement composites. In: **International Conference on Bio-based Building Materials and International Conference on Ecological Valorisation of Granular and Fibrous materials**, 2017, Clermont-Ferrand. ICBBM EcoGRAFI 2017, 2017.

Estudos

1. PBMC, 2018. RIBEIRO, S. K.; SANTOS, A. A [Ed.] SILVA, L. C.; CALDAS, L. R.; PAIVA, R. L. M.; TOLEDO FILHO, R. D.. **Role of Bio-based Building Materials in Climate Change Mitigation: Special Report of the Brazilian Panel on Climate Change**. Rio de Janeiro: Brazilian Panel on Climate Change, 2018 (Special Report of the Brazilian Panel on Climate Change).

Orientações de Iniciação Científica com Menção Honrosa

1. RODRIGUEZ, L. O.; CALDAS, L. R.; TOLEDO FILHO, R. D. **Avaliação Física, Mecânica e Ambiental de Colmos de Bambu do Acre**. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 2020.

- (1) MENEZES, A. P. N.; CALDAS, L. R.; GLORIA, M. Y. R.; SANTOS, D. O. J. ; ANDREOLA, V. M.; TOLEDO FILHO, R. D. **Produção de bioconcreto de resíduos de madeira: avaliação experimental e ambiental.** Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 2019.

2. Produtos Correlatos ao Tema de Pesquisa da Tese

Artigos Submetidos em Periódicos

1. GRABOIS, T. M.; CALDAS, L. R.; JULIÃO, N. R.; TOLEDO FILHO, R. D. An experimental and environmental evaluation of mortars with recycled demolition waste from a hospital implosion in Rio de Janeiro. Submissão no **Journal of Material Cycles and Waste Management.**

Artigos Publicados em Anais de Congresso

1. CALDAS, L. R.; PAIVA, R. L. M.; MARTINS, A. P. S.; TOLEDO FILHO, R. D. . Avaliação ambiental de revestimentos de terra: análise da influência da vida útil no ciclo de vida. In: **Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, 2019, Goiânia. XII SBTA, 2019.
2. MARTINS, A. P. S.; CALDAS, L. R.; PAIVA, R. L. M.; TOLEDO FILHO, R. D. . Avaliação do desempenho ambiental de compósitos solo- Cimento-Fibras de sisal autoadensáveis. In: **3º Congresso Luso-Brasileiro Materiais de Construção Sustentáveis**, 2018, Coimbra. 3º Congresso Luso-Brasileiro Materiais de Construção Sustentáveis, 2018.
3. MARTINS, A. P. S.; CALDAS, L. R. ; PAIVA, R. L. M. ; TOLEDO FILHO, R. D. . Avaliação do ciclo de vida de compósitos solo-cimento-fibras de sisal considerando diferentes distâncias de transporte. In: **VII Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil**, 2018, Rio de Janeiro. VII Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, 2018. p. 17-27.
4. PAULA, R.; CALDAS, L. R.; PAIVA, R. L. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação do ciclo de vida de argamassas com resíduos de cerâmica vermelha considerando um indicador de desempenho mecânico durabilidade. In: **Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida**, 2018, Brasília. VI Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida, 2018. p. 979-985.
5. CALDAS, L. R.; PAULSE, P. C.; HORA, K. E. R.; SPOSTO, ROSA MARIA; TOLEDO FILHO, R. D. Occupational rate and global warming potential: case study of a school building in goiania city. In: **EURO ELECS 2017**, 2017, São Leopoldo. 2017. p. 75-82.

Estudos

1. PBMC, 2016. RIBEIRO, S. K.; SANTOS, A. A. RIBEIRO, S. K.; SANTOS, A. A [Ed.]; COPPOS, A. R. ; EVSUKOFF, A. ; TOLEDO FILHO, R. D. ; SILVA,

L. C. ; CALDAS, L. R. ; LIMA, E. ; PAIVA, A. B. R. ; MAMEDE, E. ; FALCAO, D. M. ; FONSECA, H. M. V. C. . **Tecnologias disruptivas de baixo carbono para setores-chave no Brasil**. Rio de Janeiro: PBMC, 2017 (Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas).

2. Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID). **Vamos construir verde? Guia prático para edificações, espaços públicos e canteiros sustentáveis no Brasil**. GONZÁLEZ-MAHECHA, E.; MINOJA, CALDAS, L. R.; TRIBOUILLARD, C. p. cm. — (Nota técnica do BID; 1807).

Artigos Publicados em Blogs Especializados

1. CALDAS, L. R. "**Ferramentas para implementar a economia circular na arquitetura e construção**" 10 Mai 2020. ArchDaily Brasil. Acessado 31 Mai 2020. <<https://www.archdaily.com.br/br/939020/ferramentas-para-implementar-a-economia-circular-na-arquitetura-e-construcao>> ISSN 0719-8906
2. CALDAS, L. R. "**Arquitetura e economia circular na era dos espaços compartilhados**" 27 Mai 2020. ArchDaily Brasil. Acessado 31 Mai 2020. <<https://www.archdaily.com.br/br/940408/arquitetura-e-economia-circular-na-era-dos-espacos-compartilhados>> ISSN 0719-8906
3. CALDAS, L. R. "**Guia rápido de economia circular para arquitetos, engenheiros e construtores**" 09 Abr 2020. ArchDaily Brasil. Acessado 2 Mai 2020. <<https://www.archdaily.com.br/br/937249/guia-rapido-de-economia-circular-para-arquitetos-engenheiros-e-construtores>> ISSN 0719-8906
4. CALDAS, L. R.; SANTOS, A.; SANTOS, L. "**Como tornar as cidades mais inteligentes diante das mudanças climáticas e pandemias?**" 05 Abr 2020. ArchDaily Brasil. Acessado 2 Mai 2020. <<https://www.archdaily.com.br/br/936764/como-tornar-as-cidades-mais-inteligentes-diante-das-mudancas-climaticas-e-pandemias>> ISSN 0719-8906
5. CALDAS, L. R.; SANTOS, A.; SANTOS, L. "**Cidades inteligentes, mudanças climáticas e vulnerabilidades**" 05 Abr 2020. <<https://caosplanejado.com/cidades-inteligentes-mudancas-climaticas-e-vulnerabilidades/>> Caos planejado. Acessado 2 Mai 2020.

Orientação de Trabalho de Conclusão de Curso

1. TOLEDO FILHO, R. D.; CALDAS, L. R.; ROCHA, C. A. A.; ODA., Sandra. Participação em banca de Livia Souza Mançãno Chaves. **Avaliação do Ciclo de Vida de uma Edificação Escolar: Diagnóstico Ambiental e Proposição de Melhorias Construtivas**.. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro

Cursos Ministrados

1. CALDAS, L. R. **Economia circular aplicada à arquitetura e construção**. Instituto Arquitetos do Brasil (IAB-RJ). Junho, 2020.
2. CALDAS, L. R. **Introdução ao SimaPro**. (NUMATS/COPPE/UFRJ). Abril, 2020.

3. CALDAS, L. R. **Como calcular a pegada de carbono do meu projeto de edificações?** Instituto Arquitetos do Brasil (IAB-RJ). Fevereiro, 2020.
4. CALDAS, L. R. **Como calcular a pegada de carbono do meu projeto de edificações?** Instituto Arquitetos do Brasil (IAB-RJ). Outubro, 2019.

Participação em Lives

1. CALDAS, L. R. **Como tornar as cidades mais inteligentes pós-covid?** MBE - COPPE/UFRJ. 2020.
2. CALDAS, L. R. **Pandemias, Economia Circular e mudanças climáticas nas cidades.** 2020. NUMATS/COPPE/UFRJ. 2020.
3. CALDAS, L. R.; CASTANHEIRA, M. **Economia circular no contexto de pandemias.** IAB-RJ. 2020.
4. CALDAS, L. R. **Cidades Esponjas.** NUMATS/COPPE/UFRJ. 2020.
5. CALDAS, L. R. **Introdução ao SimaPro.** NUMATS/COPPE/UFRJ. 2020.
6. CALDAS, L. H.; HORA, K. E. **As Cidades e seus desafios ambientais no cenário da COVID-19.** Programa de Pós-Graduação em Projeto e Cidades. FAV/UFG. 2020.
7. CALDAS, L. R. **Economia Circular nas Cidades.** MBE - COPPE/UFRJ. 2020.
8. CALDAS, L. R. **Economia Circular na Arquitetura e Construção.** Bioclimatics/UnB. 2020.