

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS COM
BIOMATERIAIS PARA DIETAS DE BAIXO CARBONO DE HABITAÇÕES

CAROLINA DE ALMEIDA XAVIER

Dissertação 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 Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Lucas Rosse Caldas

Rio de Janeiro
2025

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS COM
BIOMATERIAIS PARA DIETAS DE BAIXO CARBONO DE HABITAÇÕES

CAROLINA DE ALMEIDA XAVIER

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO 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
MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientador: Lucas Rosse Caldas

Aprovada por:

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS COM BIOMATERIAIS PARA DIETAS DE BAIXO CARBONO DE HABITAÇÕES

CAROLINA DE ALMEIDA XAVIER

Orientador: Lucas Rosse Caldas
Programa: Engenharia Civil

Resumo

A construção civil é um dos principais setores responsáveis pelas emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), o que motiva a busca por soluções tecnológicas mais sustentáveis e de baixo carbono. Este trabalho avalia a viabilidade da substituição de materiais de construção convencionais por biomateriais, com foco na redução da pegada de carbono das edificações. Adotando o conceito de dieta de materiais e de carbono, que hierarquiza os materiais com base em suas emissões de GEEs, analisam-se diferentes “cardápios” de biomateriais à base de madeira, como a madeira laminada cruzada (CLT) e a madeira laminada colada (GLT), por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Como forma de ter uma análise mais sistêmica e holística, foram avaliados mais dois aspectos ambientais: o consumo de energia e de água. Os dados de ambientais para modelagem foram obtidos a partir de Declarações Ambientais de Produto (EPDs) e comparados com os de materiais tradicionais como o concreto e o aço, amplamente utilizados no Brasil. Em um estudo de caso aplicado a uma habitação unifamiliar de interesse social, observou-se uma redução de até 47% nas emissões de CO₂ de origem fóssil, porém houve um aumento em relação ao consumo de energia (superior a 80%). Os resultados confirmam o potencial dos biomateriais em compor soluções construtivas que auxiliem na descarbonização do setor da construção, mas chama atenção para o possível aumento de outros impactos ambientais, como aqueles ligados à demanda de energia ou de água. Desta forma, esta pesquisa contribui por apresentar uma análise que considera a abordagem do ciclo de vida de edificações, de uma forma mais sistêmica e holística e não apenas focada na questão da descarbonização.

Palavras-chave: Pegada de carbono. ACV. Biomateriais. Madeira laminada.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

Abstract

The construction industry is one of the main sectors responsible for global greenhouse gas (GHG) emissions, which drives the search for more sustainable and low-carbon technological solutions. This study evaluates the feasibility of replacing conventional construction materials with biomaterials, focusing on reducing the carbon footprint of buildings. Adopting the concept of material and carbon diets, which ranks materials based on their GHG emissions, different “menus” of wood-based biomaterials — such as cross-laminated timber (CLT) and glued laminated timber (GLT) — are analyzed through Life Cycle Assessment (LCA). To ensure a more systemic and holistic analysis, two additional environmental aspects were evaluated: energy and water consumption. Environmental data for modeling were obtained from Environmental Product Declarations (EPDs) and compared with traditional materials such as concrete and steel, which are widely used in Brazil. In a case study applied to a single-family social housing unit, a reduction of up to 47% in fossil-based CO₂ emissions was observed; however, there was an increase in energy consumption (greater than 80%). The results confirm the potential of biomaterials to form constructive solutions that contribute to the decarbonization of the construction sector, while also highlighting the possible increase in other environmental impacts, such as those related to energy or water demand. Thus, this research contributes by presenting an analysis that considers the life cycle approach to buildings in a more systemic and holistic manner, rather than focusing solely on decarbonization.

Keywords: Carbon footprint. Biomaterials. LCA. Laminated wood.

Agradecimento

A jornada do mestrado foi repleta de desafios, aprendizados e crescimento. Ao final desse percurso, é com gratidão que dedico algumas palavras àqueles que caminharam comigo.

Agradeço primeiramente à minha família, pelo apoio incondicional, pela paciência nos momentos difíceis e pelo amor constante que me fortaleceu ao longo dessa trajetória. Cada palavra de incentivo e cada gesto de carinho foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Ao meu orientador, professor Lucas, minha sincera gratidão pela orientação atenta, pelos conselhos valiosos e pela confiança depositada no meu trabalho. Sua dedicação e comprometimento foram essenciais para o desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço também à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), por ter me acolhido e proporcionado um ambiente de formação acadêmica e pessoal.

Lista de Figuras

Figura 1 - A pirâmide da dieta de materiais para construção convencional e construção de carbono zero, que representam os volumes de materiais necessários para a construção, está dividida em três categorias: (i) materiais de alta emissão; (ii) materiais de baixa emissão; e (iii) materiais de emissão negativa. No topo, encontram-se os materiais de alto carbono; no meio, os materiais de baixo carbono; e na base, os materiais regenerativos de carbono negativo.	14
Figura 2 – Comparativo quanto a redução de carbono na construção de uma residência.	15
Figura 3 - Consumo de energia em edifícios por combustível no Cenário Net Zero, 2010-2030.....	20
Figura 4 - Emissões globais de CO ₂ provenientes da operação de edifícios no Cenário Net Zero, 2010-2030	20
Figura 5 - Produção de CO ₂ durante vida útil de uma construção civil.	21
Figura 6 - Modelo de economia linear e economia circular.	22
Figura 7 - Ciclo da madeira.	25
Figura 8 - Corte CLT.....	29
Figura 9 - Conceito de Madeira Laminada Colada (MLC)	32
Figura 10 – Estágios compreendidos na EPD	35
Figura 11 - Metodologia utilizada na construção da pesquisa.....	45
Figura 12 - Planta baixa da habitação estudada.....	49
Figura 13 - Corte "A" da habitação estudada. Visão do telhado.	49
Figura 14 – Recorte da parede externa e sua composição.	50
Figura 15 – Recorte da parede interna e sua composição.....	50
Figura 16 – Revestimento de paredes tradicionais.	53
Figura 17 – Revestimento de paredes CLT utilizando padrão tradicional.	53
Figura 18 – Recorte do piso e sua composição.	55
Figura 19 – Impacto de emissão de CO ₂ Fóssil (kg CO ₂ eq.) por quilograma de material produzido.....	58
Figura 20 – Impacto de emissão de CO ₂ Biogênico (kg CO ₂ eq.) por quilograma de material produzido.....	58
Figura 21 – Impacto de emissão de energia (MJ) por quilograma de material produzido.....	59
Figura 22 – Impacto de consumo de água potável (M ³) por quilograma de material produzido.....	60
Figura 23 – Pirâmide Impacto Carbono	61
Figura 24 – Pirâmide Impacto Energia.....	62
Figura 25 – Pirâmide Impacto Hídrico	63

Figura 26 – Cenário de utilização dos materiais tradicionais para construção da habitação.....	65
Figura 27 – Cenário de utilização dos materiais substitutos (madeira engenheirada) para construção da habitação.....	65
Figura 28 – Comparação dos impactos (Fóssil + LULUC) para parede com revestimento.	67
Figura 29 – Comparação dos impactos (Fóssil + Biogênico + LULUC) para parede com revestimento.....	67
Figura 30 – Comparação dos impactos (Energia) para parede com revestimento.	67
Figura 31 – Comparação dos impactos (Água potável) para parede com revestimento.	68
Figura 32 – Comparação dos impactos (Fóssil + LULUC) para o piso	69
Figura 33 – Comparação dos impactos (Fóssil + Biogênico + LULUC) para o piso ...	69
Figura 34 – Comparação dos impactos (Energia) para o piso	69
Figura 35 – Comparação dos impactos (Água potável) para o piso	70
Figura 36 – Comparação dos impactos (Fóssil + LULUC) para Estrutura	71
Figura 37 – Comparação dos impactos (Fóssil + Biogênico + LULUC) para Estrutura	71
Figura 38 – Comparação dos impactos (Energia) para Estrutura.....	71
Figura 39 – Comparação dos impactos (Água potável) para Estrutura.....	72
Figura 40 – Comparação dos impactos (Fóssil + LULUC) para Habitação separado por materiais	73
Figura 41 – Comparação dos impactos (Fóssil + Biogênico + LULUC) para Habitação separado por materiais.....	74
Figura 42 – Comparação dos impactos (Energia) para Habitação separado por materiais	75
Figura 43 – Comparação dos impactos (Água potável) para Habitação separado por materiais	76

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Aplicação dos biomateriais de madeira na construção civil.....	33
Tabela 2 – Tipos de construção apresentados na literatura.	39
Tabela 3 – Métodos de ACV utilizados pela literatura.	40
Tabela 4 – Consideração do carbono biogênico na Análise do Ciclo de Vida.....	41
Tabela 5 – Tipos de construção e pegadas de carbono.....	42
Tabela 6 - Palavras chaves pesquisa. Revisão sobre utilização das madeiras engenheiradas.	46
Tabela 7 – Legenda quanto as construções apresentadas no CUB.....	47
Tabela 8 – EPDs selecionadas da base internacional.	48
Tabela 9 – Dimensões das paredes externas e área.	51
Tabela 10 – Dimensões das paredes internas e área.....	51
Tabela 11 – Materiais complementares para utilização das madeiras engenheirada nas paredes.....	51
Tabela 12 – Valores dos materiais substituíveis em paredes internas e externas.....	52
Tabela 13 – Valores dos materiais substitutos em paredes internas e externas.....	52
Tabela 14 – Valores dos materiais padrões para construção da infraestrutura da habitação.....	53
Tabela 15 – Valores dos materiais substitutos para construção da infraestrutura da habitação.....	53
Tabela 16 – Revestimento interno em paredes tradicionais.	54
Tabela 17 – Revestimento interno em paredes GLT utilizando materiais tradicionais.	54
Tabela 18 – Revestimento externo nas paredes da habitação.....	55
Tabela 19 – Valores dos materiais tradicionais aplicados no piso interno.....	56
Tabela 20 – Valores das madeiras engenheirada aplicadas no piso interno.....	56
Tabela 21 – Comparação cenários de substituição (Fóssil + LULUC).	72
Tabela 22 – Comparação cenários de substituição (Fóssil + Biogênico + LULUC). ...	73
Tabela 21 – Comparação cenários de substituição (Energia).....	74
Tabela 21 – Comparação cenários de substituição (Energia).....	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMA DE PESQUISA	11
1.2	DIETAS DE CARBONO PARA EDIFICAÇÕES	13
1.3	RELEVÂNCIA DO TEMA	16
1.4	OBJETIVOS	17
1.4.1	<i>Objetivo Geral</i>	17
1.4.2	<i>Objetivos Específicos</i>	17
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	EMISSÃO DE CARBONO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	19
2.2	REDUÇÃO DE CARBONO A PARTIR DOS BIOMATERIAIS BASEADOS EM MADEIRA	23
2.3	UTILIZAÇÃO DA MADEIRA ENGENHEIRADA NA CONSTRUÇÃO CIVIL	26
2.3.1	<i>Madeira Laminada Cruzada (CLT)</i>	28
2.3.2	<i>Madeira Laminada Colada (MLC/GLT/Glulam)</i>	31
2.3.3	<i>Aplicação dos biomateriais de madeira na construção civil</i>	33
2.4	DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTO	34
2.5	ACHADOS DA LITERATURA E ESTADO DA ARTE	38
2.5.1	<i>Tipos de construção</i>	38
2.5.2	<i>Método ACV utilizado</i>	39
2.5.3	<i>Consideração do Carbono Biogênico</i>	40
2.5.4	<i>Pegada de Carbono</i>	42
2.5.5	<i>Lacunas e deficiências da revisão sistemática</i>	43
3	METODOLOGIA	45
3.1	LEVANTAMENTO TEÓRICO	45
3.2	LEVANTAMENTO DOS MATERIAIS E EPDS	47
3.3	SELEÇÃO DOS EPDS UTILIZADOS	48
3.3.1	<i>EPDs disponíveis em plataforma internacional</i>	48
3.3.2	<i>EPDs disponíveis na base SIDAC</i>	48
3.4	APRESENTAÇÃO DO PROJETO DA HABITAÇÃO	49
3.5	APLICAÇÃO DOS MATERIAIS NA HABITAÇÃO	50
3.5.1	<i>Paredes internas e externas da habitação</i>	50
3.5.2	<i>Estrutura</i>	52
3.5.3	<i>Revestimento das paredes internas da habitação</i>	53

3.5.4	<i>Piso interno da habitação</i>	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1	DEMONSTRATIVO E MÉTRICAS DOS MATERIAIS SELECIONADOS	57
4.2	PIRÂMIDES DE IMPACTOS AMBIENTAIS	61
4.3	CENÁRIOS DE SUBSTITUIÇÃO	64
4.4	ANÁLISE DOS CENÁRIOS	66
4.4.1	<i>Visão dos impactos na aplicação em paredes internas e externas da habitação</i>	66
4.4.2	<i>Visão dos impactos na aplicação no piso da habitação</i>	68
4.4.3	<i>Visão dos impactos na aplicação na estrutura da habitação</i>	70
4.4.4	<i>Visão geral dos impactos da habitação</i>	72
4.4.5	<i>Comparação com a literatura</i>	76
4.4.6	<i>Considerações Gerais</i>	77
5	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	81
	APÊNDICE A - EPDS SELECIONADAS NAS BASES INTERNACIONAIS	92
	APÊNDICE B - VALORES DE IMPACTO POR QUILOGRAMA (KG) DE MATERIAL PRODUZIDO CONSIDERANDO AS FASES A (A1-A3) E C (C1-C4) (PRODUÇÃO, DESCARTE E REUSO) DISPONÍVEL NA BASE INTERNACIONAL	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Problema de Pesquisa

A indústria da construção civil é um setor essencial para os seres humanos, pois fornece as infraestruturas necessárias, edifícios, empregos e prosperidade econômica. No entanto, com a rápida urbanização que o mundo está enfrentando, o setor está impondo severos impactos ambientais no planeta (Rahla; Mateus; Bragança, 2021).

O rápido crescimento da indústria da construção estimula a expansão econômica global, mas tem um impacto substancial no ambiente natural e construído. A indústria da construção consome grandes quantidades de energia, recursos naturais e água, gerando vastas quantidades de resíduos (Chen *et al.*, 2023a).

A construção de edifícios atualmente responde por 5-12% das emissões globais de carbono, e, portanto, desempenha um papel vital na resposta à emergência climática, especialmente através de seus processos de extração de materiais, fabricação de produtos de construção (Karlsson *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2024).

A alta produção de gases prejudiciais inclui a produção de cimento, alumínio, aço, tijolo e vidro, que contribui com aproximadamente 9% das emissões globais de CO₂ relacionadas à energia. Além disso, o setor é um grande consumidor de matérias-primas, respondendo por aproximadamente 50% do material extraído globalmente, incluindo recursos finitos (Santos *et al.*, 2024).

Porém, estes dados acabam divergindo na literatura, principalmente quando se trata do consumo de CO₂ das construções. Karlsson *et al.* (2021) e Santos *et al.* (2024), deve-se considerar o somatório entre a etapa da construção —diretamente ligada aos materiais de construção e transporte — e a etapa da operação — etapa mais próxima ao consumo necessário para seu funcionamento, sendo assim este somatório chega-se que a construção é responsável por 39% das emissões de CO₂ em todo o mundo. É importante ressaltar, que este valor tende a crescer a cada ano (Andersen; Rasmussen; Ryberg, 2022; Eslami *et al.*, 2024; Serrano; Kampmann; Ryberg, 2022).

Além disso, autores estimam que aproximadamente 230 bilhões de metros quadrados adicionais de área construída serão construídos até 2060, justificando a preocupação internacional quanto à mudança de paradigmas construtivos anteriormente empregados nas empreitadas (Andersen; Rasmussen; Ryberg, 2022).

Embora os GEE liberados durante a etapa operacional dos edifícios historicamente tenham sido o foco, a implementação de tecnologias de construção mais eficientes em termos energéticos está aumentando os impactos relativos das emissões de GEE incorporadas¹ (Karlsson *et al.*, 2021).

Os impactos ambientais de um edifício podem ser reduzidos otimizando os efeitos da fase operacional, juntamente com a seleção de materiais e métodos de construção (Eslami *et al.*, 2024), sem resultar, assim, em aumento das emissões incorporadas nas fases anteriores. Melhorias em tecnologias de construção são essenciais para alcançar os objetivos de sustentabilidade neste setor. No nível de material, isso pode ser realizado desenvolvendo soluções que ajudem a usar menos do mesmo material ou a utilizar materiais alternativos mais “verdes” na construção (Younis; Dadoo, 2022).

O potencial do setor da construção para reduzir seus impactos ambientais e, conseqüentemente, combater as mudanças climáticas, é destacado em diversos Protelatórios, como os do UNFCCC, da IEA e em artigos científicos. De acordo com essas descobertas, os novos edifícios devem se tornar livres de combustíveis fósseis, na etapa de operação, e quase zero energia até 2020. As construções existentes precisam ser renovadas rapidamente para aumentar sua eficiência energética, já que na Europa 80% dos edifícios que serão ocupados em 2050 já existem (Obrecht *et al.*, 2021).

Uma das estratégias que vem sendo amplamente discutida na literatura é a substituição de materiais de construção industriais tradicionais, como o aço e o concreto, por biomateriais, e aqueles de origem natural, e.g. terra crua (Younis; Dadoo, 2022). O uso de madeira no setor da construção tende a apresentar menor impacto sobre as mudanças climáticas, devido ao armazenamento de carbono e à redução das emissões de CO₂ na produção de materiais, construção e uso, entre outros benefícios substanciais (Tupenaite *et al.*, 2023).

Contudo o uso dos biomateriais, especialmente daqueles baseados em madeira, não é isento de críticas e preocupações por parte da literatura. Conforme será mais bem debatido ao longo deste trabalho, é necessário identificar que o aumento no consumo destes biomateriais pode resultar em uma maior pressão pelo uso da terra, podendo levar a um aumento desmatamento e competição por alimento e outros usos também importantes.

¹ Considera-se como GEE incorporada as emissões que ocorrem durante as fases de fabricação, transporte, construção e fim de vida dos ativos construídos (Karlsson *et al.*, 2021).

A madeira é um material de construção ecológico com longa história em países com florestas boreais (Aloisio *et al.*, 2023; Araujo *et al.*, 2023), quando sua origem e obtenção são certificados e rastreados. Mais de 80% das casas nos EUA e nos países escandinavos têm estruturas de madeira, sendo estas altamente competitivas em relação à utilização de materiais tradicionalmente empenhados nestas construções (González-Retamal *et al.*, 2022).

Autores argumentam que, enquanto a sustentabilidade convencional consiste em limitar os impactos sobre o meio ambiente devolvendo tanto quanto é retirado, a sustentabilidade regenerativa busca restaurar os ecossistemas a um estado saudável e depois desenvolver uma parceria co-criativa com a natureza. O objetivo é ter um impacto positivo sobre o meio ambiente seguindo estratégias baseadas em adaptação, resiliência e regeneração (Quintana-Gallardo *et al.*, 2021).

1.2 Dietas de carbono para edificações

O conceito de “dieta de carbono” para edificações, de maneira análoga à dieta calórica, através de uma forma mais lúdica, pode ser compreendido como um método de projetar edificações, considerando a pegada de carbono associada aos materiais e tecnologias de construção utilizados (Carcassi *et al.*, 2022; Caldas, 2023). O balanço resultante de materiais (Figura 1) em um cenário típico de construção, ou seja, baseadas em concreto (Carcassi *et al.*, 2022), gera uma hierarquia clara em que, no topo, os materiais com alta intensidade de carbono ocupam a maior parte, enquanto os materiais carbono-negativos, capazes de regenerar o clima, ocupam um espaço marginal (Ruta; Pittau; Masera, 2024).

Figura 1 - A pirâmide da dieta de materiais para construção convencional e construção de carbono zero, que representam os volumes de materiais necessários para a construção, está dividida em três categorias: (i) materiais de alta emissão; (ii) materiais de baixa emissão; e (iii) materiais de emissão negativa. No topo, encontram-se os materiais de alto carbono; no meio, os materiais de baixo carbono; e na base, os materiais regenerativos de carbono negativo.



Fonte: Ruta; Pittau; Masera (2024)

Para reduzir os impactos ambientais, é essencial considerar todo o ciclo de vida dos edifícios e tomar decisões mais sustentáveis. A produção de materiais de construção é uma grande fonte de emissões de carbono. A “dieta de carbono” é, portanto, um conceito que pode promover a redução da pegada de carbono na construção, similar a uma dieta calórica, onde materiais e tecnologias construtivas são escolhidos com base em sua emissão de carbono, visando uma construção mais sustentável. (Caldas, 2023).

A partir destas novas dietas de materiais, que também podem ser vistos como “cardápios especiais”, nas quais a quantidade de soluções biológicas é aumentada na construção, permitem a inversão da pirâmide (Figura 1), gerando uma nova hierarquia onde os materiais com alta intensidade de carbono são limitados a componentes para os quais não existem alternativas e as soluções biológicas são amplamente distribuídas pelo restante do edifício, capazes de compensar as emissões positivas de carbono e idealmente alcançar uma meta de carbono zero (Ruta; Pittau; Masera, 2024).

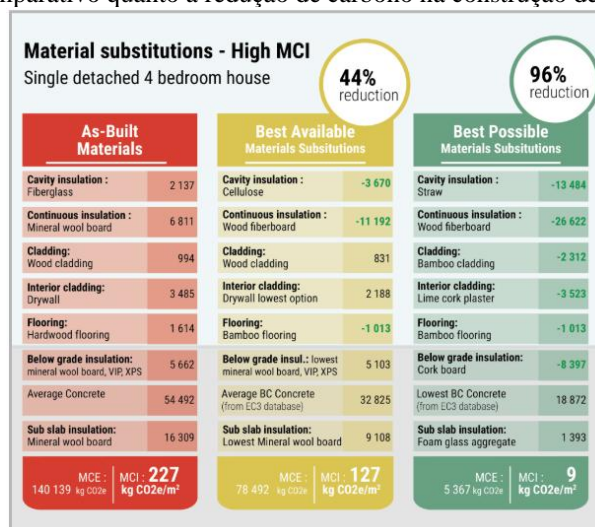
Para sua concretização, a dieta de carbono parte da categorização de materiais conforme sua pegada de carbono, desde materiais de baixo carbono ou carbono negativo até materiais com alta emissão de carbono. A literatura indica ser preferível usar materiais naturais e biomateriais de rápido crescimento que absorvam CO₂ e restringir o uso de materiais de alta pegada de carbono como certos metais e plásticos. Estes biomateriais podem gerar “créditos de carbono” por absorverem CO₂ durante a fotossíntese. Contudo,

a origem desses materiais é crucial; madeira de desmatamento ilegal pode ter uma pegada de carbono elevada. A escolha de materiais deve equilibrar desempenho técnico e emissões de carbono, buscando materiais que atendam às necessidades do projeto com menor impacto ambiental (Melo et al., 2023).

Oportuno destacar que a fabricação de materiais não é o único aspecto a considerar para reduzir a pegada de carbono no setor; a disponibilidade local dos materiais também é crucial, pois o transporte pode gerar emissões significativas. Técnicas construtivas industrializadas e racionalizadas ajudam a minimizar desperdícios e resíduos no canteiro de obras. Manutenções preventivas são essenciais para prolongar a vida útil dos materiais, evitando emissões adicionais na produção e transporte de novos materiais. Priorizar materiais reaproveitados e reciclados, bem como planejar o fim de vida desses materiais para reaproveitamento, reforça a economia circular (Caldas, 2023).

A Figura 2 visa ilustrar os níveis de redução obtidos em uma casa unifamiliar de quatro quartos, a partir de três modelos (“cardápios”) de substituição no contexto do Canadá. O primeiro deles (vermelho), à esquerda, mostra a construção padrão, de concreto, utilizada como referencial para a aplicação de substituição de materiais. A segunda (amarela), ao centro, demonstra uma substituição média, usando materiais já estabelecidos no mercado e disponíveis para uso, com redução de 44% em relação à construção padrão. A terceira (verde), à direita, mostra o melhor cenário, com redução de 96% em comparação à construção padrão.

Figura 2 – Comparativo quanto a redução de carbono na construção de uma residência.



Fonte: Magwood; Trottier (2022)

Os resultados para os “melhores materiais possíveis” (coluna verde) indicam o potencial para novas residências se aproximarem ou até excederem a “emissão zero” provenientes dos materiais. Embora essas substituições incluam alguns materiais não convencionais, todas as substituições são para produtos que estão comercialmente disponíveis em outros mercados (segundo o contexto do estudo). Avanços em tecnologias de armazenamento de carbono podem tornar esses resultados ainda mais alcançáveis na próxima década (Magwood; Trottier, 2022).

Neste viés, é possível inferir que a dieta de carbono não só busca a redução de emissões na produção e uso de materiais, mas também promove uma abordagem holística que envolve todas as etapas do ciclo de vida dos edifícios. Isso inclui a escolha consciente de materiais locais, técnicas de construção eficientes, manutenção preventiva, e um ciclo de vida sustentável para os materiais. A associação à dieta também pode facilitar o entendimento da questão do carbono pelos diferentes atores do setor Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), especialmente projetistas e construtores, que normalmente são os responsáveis pela especificação dos materiais.

1.3 Relevância do tema

O tema proposto é relevante para estudo e análise, evidenciando uma carência de publicações em língua portuguesa, conforme será detalhado no estado da arte. Também se verifica a falta de artigos que abordem a realidade brasileira.

Três lacunas justificam o presente estudo: (a) escassez de publicações em português; (b) ausência de análises sobre o Brasil e outros países do Sul Global, considerando sua diversidade de biomas e climas; e (3) pelo estudo não focar somente na descarbonização, identificando possíveis *trade-offs* entre diferentes impactos ambientais. A análise desses fatores busca demonstrar a viabilidade, em termos de impactos ambientais, de substituição de materiais tradicionais por biomateriais, especialmente os derivados de madeira, como a *cross-laminated timber* (CLT) e a *glued-laminated timber* (GLT/Glulam).

Do ponto de vista acadêmico, pretende-se contribuir com o panorama existente, ampliando o estado da arte e demonstrando a aplicabilidade das técnicas no contexto brasileiro. O objetivo final é reduzir as lacunas descritas, incentivar o uso de biomateriais e diminuir as emissões de carbono na construção civil e considerando a influência em

outros aspectos ambientais, como energia e água, influenciando também países do Sul Global, como na América Latina e na África.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Investigar a viabilidade, em termos da redução da pegada de carbono e identificação de possíveis *trade-offs* ambientais via a substituição dos materiais convencionais utilizados na construção civil, por biomateriais, a partir do conceito de “Dieta de Materiais”

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analisar o ciclo de vida dos biomateriais à base de madeira, especialmente a CLT e a GLT, norteado a partir de seu desempenho ambiental;
- Comparar aspectos ambientais (carbono, energia e água) dos biomateriais com os materiais convencionais usualmente utilizados na construção civil brasileira;
- Proposição de pirâmides ambientais (carbono, energia e água) de materiais de construção para auxiliar a composição de dietas de baixo impacto ambiental;
- Quantificar o potencial de redução de carbono, energia e água em um projeto típico de habitação de interesse social no Brasil quando esses biomateriais são empregados.

1.5 Estrutura do trabalho

O estudo está estruturado em cinco capítulos, organizados para garantir coerência e profundidade na abordagem do tema.

O **primeiro capítulo** introduz a temática, contextualizando o problema e as preocupações no cenário internacional, além de apresentar o conceito das dietas de carbono e a relevância do tema, bem como os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

O **segundo capítulo** dedica-se ao referencial teórico, abordando conceitos fundamentais e aspectos que evidenciam a relevância dos biomateriais em comparação aos materiais convencionais. Discute ainda as emissões de carbono no ciclo de vida das edificações e a possibilidade de sua redução por meio de biomateriais, com foco específico na CLT e na GLT.

No **terceiro capítulo**, apresenta-se a metodologia empregada, incluindo o levantamento do referencial teórico, a coleta de dados, a apresentação do projeto que será utilizado e a aplicação dos materiais no referido projeto.

O **quarto capítulo**, dividido em quatro seções, apresenta: (i) o demonstrativo e as métricas dos materiais; (ii) as pirâmides de impactos ambientais; (iii) os cenários de substituição; e (iv) a análise dos cenários, sendo esta análise subdividida entre as aplicações específicas e, posteriormente, uma comparação geral da habitação. Além disso, este quarto capítulo traz a comparação dos resultados obtidos com os apresentados na literatura e as considerações gerais.

Por fim, o **quinto capítulo** traz a conclusão dos resultados obtidos, os pontos de atenção observados nos estudos e os próximos passos para pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Emissão de carbono na construção civil

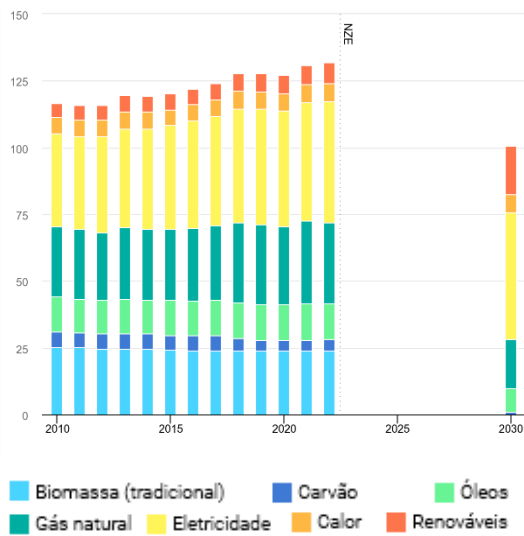
A redução de carbono denominada aqui neste trabalho se refere a emissão dos Gases de Efeito Estufa (GEEs), e, portanto, esse termo será padronizado. A redução da emissão de carbono, a abordagem da escassez de recursos, a poluição ambiental e a otimização do gerenciamento de resíduos tornaram-se temas globais em destaque. Países em todo o mundo têm identificado esforços para mitigar as mudanças climáticas, estabelecendo compromissos para reduzir as emissões ou utilizando tecnologias mais avançadas para limitar as emissões de GEEs (Yang et al., 2023).

O aquecimento global é principalmente causado pelo acúmulo de GEEs a longo prazo, que resultam de atividades humanas extensivas (Bherwani et al., 2022), como a queima de combustíveis fósseis e mudanças prejudiciais no uso da terra (Dsilva; Zarmukhambetova; Locke, 2023). Bherwani et al. (2022) aponta que a atividade humana depende inteiramente do ecossistema natural e causam mudanças nele, mas essas atividades no ambiente natural não podem ser compreendidas de forma independente.

Estas atividades antropogênicas (tais como a queima de combustíveis fósseis, atividades florestais, agricultura e disposição de resíduos (aterros sanitários e incineração)) (Figura 3), contribuem direta e ativamente para o agravamento das mudanças climáticas e o aumento dos GEEs (Barañano et al., 2022; Bherwani et al., 2022; Jaramillo et al., 2023).

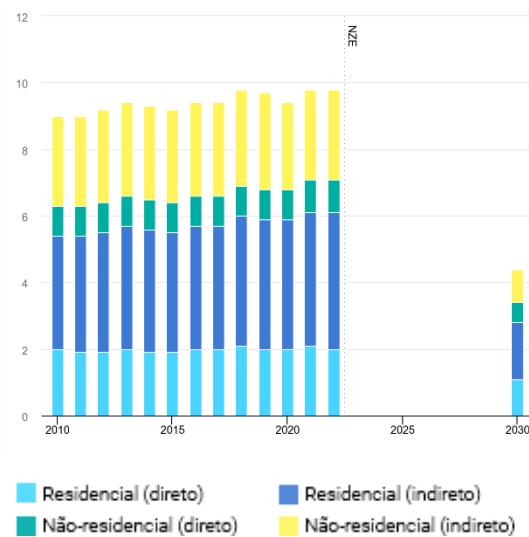
O setor da construção contribui com uma quantidade significativa de emissões de GEEs antropogênicos, representando um terço das emissões de carbono e quase 40% do consumo de energia no mundo (Figura 4) (Gan; Cheng; Lo, 2019), podendo chegar até a 50% de toda a produção mundial (Dsilva; Zarmukhambetova; Locke, 2023). Estima-se que, sem o surgimento de melhorias na eficiência energética dos edifícios, o aumento atual da urbanização pode levar a uma duplicação das emissões de GEE associadas à indústria da construção nos próximos 20 anos (Akbarnezhad; Xiao, 2017).

Figura 3 - Consumo de energia em edifícios por combustível no Cenário Net Zero, 2010-2030



Fonte: Adaptado de (IEA, 2023a)

Figura 4 - Emissões globais de CO2 provenientes da operação de edifícios no Cenário Net Zero, 2010-2030



Fonte: Adaptado de IEA (2023b)

Entre diversas indústrias, a construção civil tem oferecido produtos de longa duração com cadeias de suprimentos complexas, desempenhando um papel crucial no desenvolvimento econômico dos países. No entanto, também tem sido uma grande contribuidora para a depleção insustentável de recursos naturais e para diversas formas de poluição. Notavelmente, a indústria da construção tem sido relativamente lenta em adotar o framework da economia circular, apesar do considerável potencial para reduzir o carbono incorporado e operacional usando materiais reciclados e alcançar maior sustentabilidade (Dsilva; Zarmukhambetova; Locke, 2023).

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma metodologia amplamente reconhecida e utilizado para avaliar os impactos ambientais e o uso de recursos associados a produtos, serviços ou processos, especialmente dentro do contexto da construção civil (Chen et al., 2024). Seu emprego fornece uma compreensão ampla do ciclo de vida, desde a aquisição de matéria-prima até as etapas de produção e operacionais (Jaramillo et al., 2023). Realizar ACV é essencial para aprimorar processos, facilitar a tomada de decisões e reduzir efetivamente o consumo de carbono para equipes de projeto e formuladores de políticas (McLaughlin et al., 2023; Yang et al., 2023).

É possível observar que as práticas tradicionais de construção dependem fortemente de materiais intensivos em recursos e prejudiciais ao meio ambiente, contribuindo significativamente para as emissões de GEEs, consumo de energia e

esgotamento de recursos não renováveis, não se adequando à realidade ambiental que se pretende alcançar (Chen et al., 2024). Não obstante, a utilização de materiais tradicionais acarreta em consideráveis de resíduos, exacerbando o impacto ambiental da indústria da construção (Aguiar et al., 2023; Chen et al., 2024).

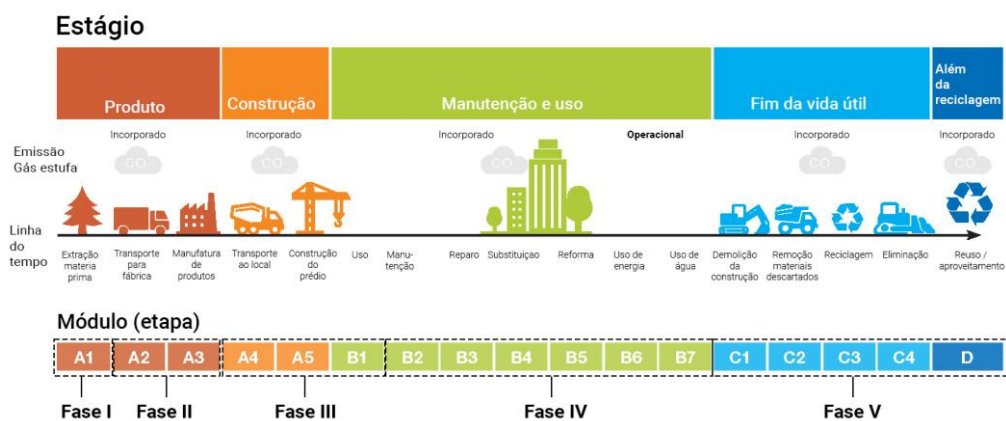
Estudos projetam que o crescimento populacional intensificará os desafios ambientais (Göswein et al., 2021), especialmente pela densidade populacional e pela necessidade da construção de novas moradias. Esta enorme densidade é abrigada nos grandes centros urbanos, colocando as cidades como principal protagonista no processo de redução das emissões de GEE (Bherwani et al., 2022).

Devido a este crescimento, associado as consequências climáticas decorrentes deste fenômeno, tem havido interesse em pesquisa na incorporação de materiais de construção ambientalmente mais sustentáveis que apresentem propriedades mecânicas similares aos blocos atualmente utilizados no setor de alvenaria para construção (Jaramillo et al., 2023).

As emissões de carbono associadas ao uso de energia ao longo da vida útil na operação de edifícios (como iluminação, ar-condicionado etc.) eram frequentemente mensuradas em modelos antigos de eficiência energética e de carbono. Recentes análises têm mostrado que as emissões de carbono da construção são principalmente concentradas pelo carbono incorporado oriundo da etapa de fabricação dos materiais de construção, urgindo pela utilização de novos materiais na construção civil (Gan; Cheng; Lo, 2019).

O uso de energia e as emissões de carbono ocorrem em todas as diferentes etapas do ciclo de vida de um edifício, e não apenas em sua etapa final, que podem ser definidas como (1) produto (A1-A3); (2) construção (A4-A5); (3) manutenção e uso (B1-B7); (4) fim de vida (C1-C4); e além da reciclagem (D) (Figura 5) (Akbarnezhad; Xiao, 2017).

Figura 5 - Produção de CO₂ durante vida útil de uma construção civil.



Fonte: Adaptado de Akbarnezhad; Xiao (2017) e New Building Institute (2022)

Por exemplo, quanto mais processamento um produto de madeira passa, maior é o impacto de carbono incorporado. O madeiramento colado (glulam) e outros produtos de madeira processada em engenharia emitem mais CO₂ do que a madeira serrada (crua) devido aos processos de fabricação adicionados (Asa et al., 2024).

Um dos pilares para a redução da emissão de CO₂, e consequente redução das emissões de gases que compõe o gás-estufa é a utilização da economia circular, em detrimento à tradicional economia linear, ainda utilizada por diversas indústrias (Figura 6) (Bherwani et al., 2022).

A Economia Circular representa um sistema econômico que visa minimizar o desperdício e maximizar a utilização de recursos, em contraste com a economia linear (Chen et al., 2024). O modelo econômico linear tradicional, com sua filosofia de “extrair, utilizar e descartar”, tem apresentado ameaças significativas recentemente, incluindo mudanças climáticas e desmatamento generalizado. Em contraste, o sistema circular promove o uso cuidadoso de materiais, design sustentável e aderência aos princípios dos 3R de reduzir, reutilizar e reciclar, tudo isso pode minimizar os impactos negativos da economia linear (Dsilva; Zarmukhambetova; Locke, 2023).

A aplicação da economia circular está principalmente preocupada em evitar o consumo de recursos e otimizar a estrutura do ciclo de energia e material em seus vários níveis: empresas e consumidores no nível micro, agentes econômicos integrados de forma simbiótica no nível micro e cidades, regiões e governos no nível macro (Yang et al., 2023).

Figura 6 - Modelo de economia linear e economia circular.



Fonte: Adaptado de Ministry for the Environment; Manatū Mō Te Taiao (2022)

Inserido neste contexto surge a utilização de uma bioeconomia, pautada na produção sustentável e conversão de recursos biológicos renováveis e resíduos gerados em produtos e serviços, que abraça intimamente a ética e a circularidade para promover simultaneamente o bem-estar humano e a conservação da natureza (Barañano et al., 2022).

Esta utilização será mais bem comentada no Capítulo 2.2 deste trabalho, haja vista oportunidade de discorrer sobre a íntima relação entre a economia circular, bioeconomia e utilização de biomateriais para redução da emissão de CO₂ decorrentes da produção de insumos destinados à construção civil.

2.2 Redução de carbono a partir dos biomateriais baseados em madeira

Alcançar os objetivos do Acordo de Paris depende, entre outros fatores, da quantidade de recursos utilizados nas fases de construção e operação, quais materiais são usados, como esses materiais são obtidos e como são produzidos e utilizados. A produção e uso de materiais de construção - especialmente materiais de construção baseados em minerais e intensivos em energia - têm implicações significativas para a mudança climática induzida pelo homem (Keena; Duwyn; Dyson, 2022).

Biomateriais são substâncias derivadas de fontes orgânicas, como resíduos agrícolas, subprodutos ou até mesmo organismos vivos, como fungos e bactérias. Nos últimos anos, pesquisadores e engenheiros têm explorado seu potencial uso em várias aplicações de construção para reduzir o impacto ambiental dos materiais de construção tradicionais (Jaramillo et al., 2023). Alguns biomateriais, derivados de recursos renováveis, surgiram como uma solução promissora para revolucionar o setor da construção, reduzindo seu impacto no meio ambiente enquanto fornecem alternativas inovadoras e economicamente viáveis aos materiais convencionais. Oportuno destacar que sua existência antecede as práticas modernas de construção, tendo estes tão somente ganhado relevância em tempos modernos frente à sua capacidade mitigatória dos danos causados pelos atuais processos de construção civil (Chen et al., 2024).

Nesse sentido, é possível dizer que sua utilização se torna relevante pelos seguintes motivos: (1) origem renovável; (2) capacidade de estocagem de CO₂; (3) apresentar características biodegradáveis. Este conjunto de fatores torna relevante sua utilização no contexto da construção civil atual.

Uma estratégia de economia circular é um sistema econômico que prioriza a reutilização e a mínima depreciação de recursos e produtos, o que afeta substancialmente o uso da terra (Yang et al., 2023). A reutilização sustentável de biomassa proveniente de resíduos agroindustriais, visando a produção de alimentos, medicamentos, compostos biologicamente ativos, biomateriais e geração de energia sustentável, é, sem dúvida, um dos maiores desafios do século XXI (Freitas et al., 2021).

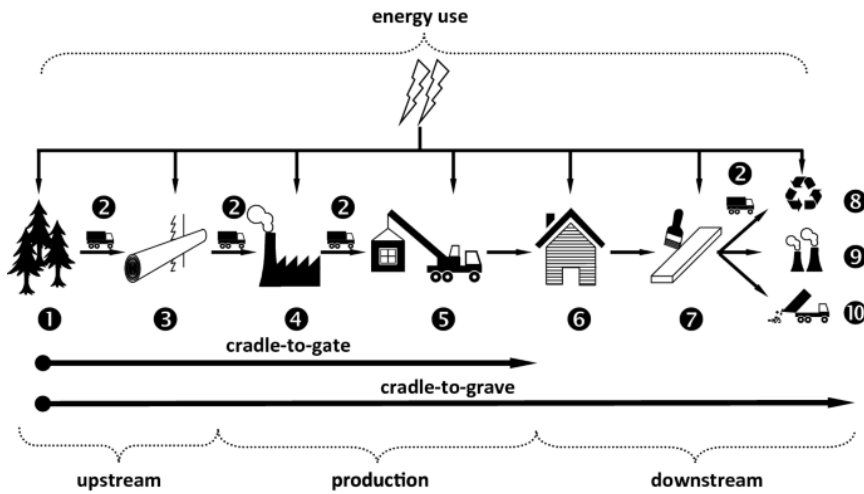
O desenvolvimento da bioeconomia circular e sustentável é considerado um meio de enfrentar muitos desafios da sociedade moderna, como a dependência de combustíveis fósseis e materiais não renováveis, a produção de alimentos e a degradação ambiental. A bioeconomia tem sido associada ao conceito de economia circular, que se concentra na utilização de materiais residuais como recursos e favorece um alto grau de reciclagem, mantendo assim os recursos e materiais em uso pelo maior tempo possível (Aguiar et al., 2023; Maximo et al., 2022).

Quando se trata de sustentabilidade e circularidade, a madeira como matéria-prima natural apresenta diversas vantagens sobre outros materiais de construção (UNCE, 2022).

A madeira é altamente reciclável e várias opções de reutilização a tornam um excelente material para o uso em cascata atualmente desejado. A madeira e outros produtos de construção à base de biomassa têm a vantagem de apresentar redução na emissão de carbono significativamente menor do que o aço, vidro ou concreto. Como as árvores absorvem CO₂ da atmosfera e armazenam carbono no tecido da madeira, a madeira gera um impacto de aquecimento global menor em comparação com outros materiais de construção (Sandak et al., 2019).

O ciclo natural da madeira começa na floresta, onde as árvores crescem, com energia solar e dióxido de carbono como principais insumos para a formação da madeira. Quando utilizada na indústria, a madeira circula no ciclo técnico, onde pode ser recuperada no final de sua primeira vida útil, ou na forma de resíduos ou subprodutos dos processos de produção (UNCE, 2022).

Figura 7 - Ciclo da madeira.



Fonte: Adaptado de Sandak et al. (2019)

A pegada de carbono da madeira nativa serrada bruta varia entre 25 e 19.860 kgCO₂/m³, dependendo do tipo de extração florestal. Além disso, apenas as madeiras manejadas atuam como armazenamento temporário de carbono biogênico, com uma capacidade de armazenamento de 353 kgC/m³ de madeira serrada bruta seca ao ar. Os resultados consideram as emissões desde a exploração florestal até a conclusão do processamento na serraria, abrangendo apenas os fluxos de carbono acima do solo. Recomenda-se, para trabalhos futuros, que se contabilize igualmente a variação do estoque de carbono abaixo do solo, tornando a análise da pegada de carbono dos produtos de madeira nativa destinados à construção mais abrangente. Contudo, destaca-se a importância da adoção de uma metodologia estruturada e transparente que permita o cálculo das emissões de CO₂ abaixo do solo de forma compreensível, realista e facilmente reproduzível (Oliveira *et al.*, 2024).

Garantir a rastreabilidade ao longo da cadeia produtiva e promover o uso de madeira oriunda de manejo sustentável, com exploração de baixa intensidade (inferior a 15 m³/ha), possui o potencial de quase eliminar a pegada de carbono da madeira nativa. Isso ocorre porque toda a biomassa florestal removida se regenera dentro do período entre os ciclos de corte, resultando em um balanço de carbono ao longo do ciclo de vida do produto igual a zero. (Oliveira *et al.*, 2024).

Além disso, a madeira nativa de manejo sustentável aumenta o estoque temporário de carbono na biomassa renovável presente em produtos de construção. Ademais, o manejo sustentável apoia a manutenção dos serviços ambientais oferecidos pela floresta,

preservando a biodiversidade e evitando atividades ilegais como invasões, queimadas e desmatamento por meio da exploração comercial sustentável da floresta (Oliveira *et al.*, 2024).

2.3 Utilização da madeira engenheirada na Construção Civil

A madeira é um dos recursos naturais mais ecológicos para construção, caracterizando-se por: (i) ampla disponibilidade na natureza; (ii) relativa facilidade de manipulação (Caniato *et al.*, 2021); (iii) biodegradabilidade (Andersen; Rasmussen; Ryberg, 2022); (iv) potencial de regeneração e renovabilidade; e (v) possibilidade de reutilização e reciclagem (Santos *et al.*, 2024). Além disso, a madeira pode ser empregada em diversas etapas do processo construtivo (Caniato *et al.*, 2021).

O desenvolvimento de novos produtos de madeira engenheirada (EWP, do inglês *engineered wood products*) permitiu sua utilização em vários elementos estruturais. Materiais como a madeira laminada cruzada (CLT), madeira laminada em folheado (LVL), madeira laminada colada (GLT/Glulam) e painel de partículas orientadas (OSB) passaram a ser empregados em edificações de médio e grande porte (Eslami *et al.*, 2024).

No contexto ecológico, é essencial distinguir degradação florestal de desmatamento, conceitos que frequentemente são utilizados como sinônimos. Hart e Pomponi (2020) esclarecem essa diferença: a degradação ocorre quando há danos à qualidade da floresta, como perda da densidade das árvores e alterações na biodiversidade, mas com possibilidade de regeneração. Já o desmatamento implica na redução da área florestal para outros usos, sem regeneração natural da vegetação.

Dois fatores são fundamentais na avaliação dos impactos ambientais decorrentes do uso de biomateriais na construção civil. Primeiro, as emissões associadas ao crescimento e decomposição das árvores não são incluídas na ACV, tornando essencial compreender melhor sua importância e a forma ideal de manejar diferentes tipos de terra ao longo do tempo para otimizar os fluxos de gases de efeito estufa (Woodard; Milner, 2016; Ramage *et al.*, 2017; Alemu; Tafesse; Mondal, 2022). Segundo, é necessário considerar a disponibilidade de terras para manutenção e replantio das florestas.

Os estudos sobre a CLT concentram-se majoritariamente na Europa, influenciando a percepção sobre o impacto do desmatamento naquela região. No entanto, Hart e Pomponi (2020) argumentam que essas conclusões não podem ser automaticamente aplicadas a outras partes do mundo. Nos trópicos, por exemplo, o

desmatamento é predominante, tornando indesejável um aumento na demanda por madeira.

Essa perspectiva é corroborada por Ramage et al. (2017), que apontam que o desmatamento ocorre, sobretudo, devido à conversão descontrolada de florestas em terras agrícolas, tanto para cultivo comercial quanto para subsistência. Na América do Sul e na Ásia, o desflorestamento é fortemente impulsionado pelo setor agroindustrial e pela extração ilegal de madeira, transformando o cenário ambiental dessas regiões (Woodard; Milner, 2016).

Diante desse panorama, torna-se urgente a implementação de políticas e leis que protejam as áreas florestais e impeçam sua conversão para usos predatórios. No caso da extração ilegal, é necessário adotar medidas coercitivas para reduzir incentivos — especialmente daqueles países que buscam matéria-prima a preços abaixo do mercado (Woodard; Milner, 2016) — e aumentar a punibilidade dos responsáveis por tais práticas (Hart; Pomponi, 2020).

Algumas pesquisas assumem uma visão mais pessimista, sugerindo que o uso de produtos de madeira na construção pode resultar em desmatamento e mudanças climáticas inesperadas (Alemu; Tafesse; Mondal, 2022). No entanto, essa conclusão não é unânime na literatura, pois as condições regionais e climáticas influenciam diretamente a disponibilidade da madeira, sem necessariamente causar prejuízos ambientais (Hart; Pomponi, 2020).

A preocupação com a América do Sul, especialmente com a Amazônia, é recorrente nos estudos devido à sua importância climática global (Matricardi et al., 2020). Essa atenção se justifica por dois fatores principais: primeiro, a rápida conversão florestal para expansão do setor agroindustrial, que se diferencia da agricultura de subsistência; segundo, o avanço do desmatamento ilegal (Woodard; Milner, 2016).

Com base nas referências analisadas e nas discussões desta seção, verifica-se que os impactos ecológicos do uso de biomateriais devem ser considerados em todas as etapas da substituição dos materiais convencionais. Dentro destes cuidados vale ressaltar a origem da madeira utilizada, pois o uso de madeiras ilegais acaba contribuindo para o desmatamento de áreas florestais. Esse cuidado visa garantir que a adoção desses recursos não cause danos irreversíveis ou mais severos do que os padrões atuais de construção. Entre os principais fatores a serem levados em conta estão a disponibilidade do material e a viabilidade de replantio.

Para a escolha dos materiais foi considerado o estudo feito por Melo *et al.* (2023), que também estuda o uso de biomateriais em habitações brasileiras. Como um completo o presente estudo considera dois biomateriais de madeira engenheirada que não foram considerados, a CLT e a GLT. Além disso, ambos os materiais têm um grande potencial para armazenar carbono por conta da quantidade de madeira utilizada e também demonstram boas características mecânicas para a substituição, como mostrado abaixo.

2.3.1 Madeira Laminada Cruzada (CLT)

A madeira laminada cruzada (CLT, do inglês *cross laminated timber*) se apresenta como um material construtivo, a base de madeira (Eslami *et al.*, 2024; Younis; Dodoo, 2022), que pode ser usado como principal suporte para a construção civil (Andersen; Rasmussen; Ryberg, 2022). Por conta desta funcionalidade, artigos sinalizam que a CLT passou a ganhar atenção no campo acadêmico na última década (Cadorel, Xavier; Crawford, Robert, 2018; Caniato *et al.*, 2021).

A origem da CLT é datada de 1990, originalmente projetado na Europa, e, desde então, vem ganhando popularidade e aceitação geral (Espinoza; Buehlmann, 2018; Li *et al.*, 2019; Younis; Dodoo, 2022).

A CLT é um tipo de “madeira engenheirada” que pode ser usada para construir painéis fechados. As propriedades mecânicas do CLT permitem seu uso em edifícios de médio e alto padrão como uma alternativa mais leve ao concreto e ao aço. As estruturas celulares da madeira atuam como isolante natural, proporcionando vantagens térmicas sobre muitos outros materiais usados para paredes de carga. Ao contrário dos edifícios de armação de madeira padrão, os painéis de CLT não sofrem com pontes térmicas repetitivas causadas por montantes de madeira. A adição de material isolante a um elemento de parede aumenta a espessura geral da parede, mas resulta em uma menor transmitância térmica, que pode ser especialmente importante para locais de clima frio (Vagtholm *et al.*, 2023).

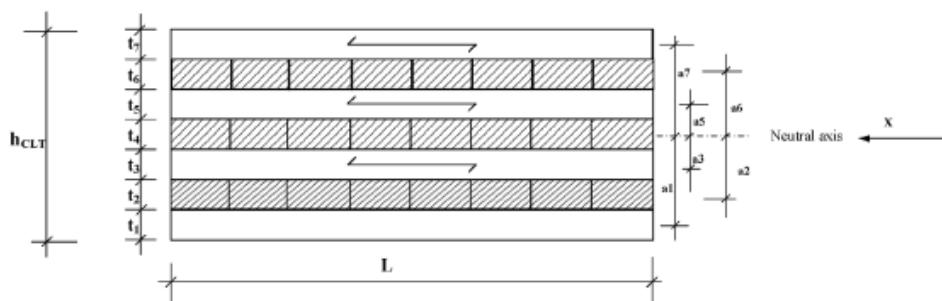
A CLT ainda apresenta, na literatura, relevantes ligações terminológicas, especialmente quanto à elementos estruturais, tais como a laminação e acústica (Caniato *et al.*, 2021). Sua utilização, contudo, mostra-se predominantemente relacionada à estrutura e revestimento de prédios e construções residenciais, servindo como método alternativo aos tradicionais materiais construtivos baseados em minerais (Andersen; Rasmussen; Ryberg, 2022; Hassan; Öberg; Gezelius, 2019).

De igual sorte, a CLT se relaciona com pesquisas ligadas à prevenção e resistência à incêndios, especialmente sob a égide de suas propriedades termodinâmicas (Caniato *et al.*, 2021; Vagtholm *et al.*, 2023).

A CLT é usualmente moldada em camadas de placas de madeira cruzadas, geralmente compostas por um número ímpar de camadas, para que as camadas externas fiquem na mesma direção, já que estão mais distantes do eixo neutro e absorvem a maior parte da carga dos momentos de flexão (Hassan; Öberg; Gezelius, 2019). Normalmente este painel é composto por lâminas de madeira que são coladas juntas em uma configuração de 90° (Younis; Dodoo, 2022).

Para a *American National Standards Institute* (ANSI), a CLT é definida como um produto de madeira pré-fabricada composto por pelo menos três camadas de madeira serrada sólida, ortogonalmente unidas e laminadas por colagem das camadas longitudinais e transversais com adesivos estruturais, formando um elemento sólido em forma de retângulo, destinado a aplicações de telhado, piso ou parede (Espinoza; Buehlmann, 2018).

Figura 8 - Corte CLT



Fonte: Hassan et al. (2019)

Os edifícios de CLT são construídos um nível de cada vez, com os painéis de parede sendo temporariamente mantidos por cofragem² enquanto os painéis de piso são posicionados e fixados. Durante a construção, os painéis podem ser fixados paralelamente

² Segundo (Pires, 2015): “A cofragem consiste num molde para betonagem in situ que tem como grande potencialidade para casos de produção em massa a sua reutilização intensiva. Esta opção é exequível através de cofragem recuperável racionalizada. Uma das maiores vantagens que advém do uso deste tipo de cofragem é o facto de estes edifícios serem normalmente modelados, ou seja, recorrem a um standard. Assim, apesar dos elementos de cofragem terem um elevado custo de investimento inicial, este é amortizado no número de utilizações que lhe é dado no seu período de vida útil. Uma cofragem racionalizada tem elevada capacidade de reutilização, o que amortiza o investimento inicial na aquisição de cofragem para valores muito atrativos”.

às paredes externas por suportes para servirem como painéis de preenchimento ou mantidos juntos por vigas de madeira apoiadas por paredes de carga, vigas anelares de madeira e blocos de madeira entre as vigas (Vagtholm *et al.*, 2023).

Em que pese suas propriedades e valia, ainda há pouca informação sobre casas produzidas com CLT. Sua frequência na literatura, segundo artigos, está limitada à edifícios industriais ou comerciais, sendo raramente discutida na literatura sua utilização em domicílios (Araujo *et al.*, 2023).

Sua utilização, contudo, não se desenvolveu sem repercussões científicas. Considerando o aumento expressivo pela busca à sustentabilidade dos prédios construídos, surgem estudos que buscam identificar os efetivos ligados ao desmatamento florestal causado pela busca da matéria-prima da CLT, qual seja a madeira (Andersen; Rasmussen; Ryberg, 2022; Quintana-Gallardo *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2024). De igual sorte, surge necessidade de avaliar seus impactos ambientais via alguma metodologia cientificamente aceita, como é o caso da ACV deste material de sorte a garantir uma compreensão abrangente desses impactos envolvidos em sua aplicação (Obrecht *et al.*, 2021; Younis; Dodoo, 2022).

Um dos contornos para o problema, segundo artigos selecionados, seria a implementação de uma economia circular, como visto anteriormente, com a possibilidade de reaproveitamento da CLT de antigas construções, minimizando a demanda e as emissões de carbono derivadas de sua construção (Andersen; Rasmussen; Ryberg, 2022; Santos *et al.*, 2024).

Não obstante, a literatura sinaliza que a CLT ainda apresenta um problema fundamental. Carece-se de normas regulares para sua fabricação, podendo esta variar não apenas de tamanho, mas também de madeira utilizada, laminações, colas, acabamentos e junções (Araujo *et al.*, 2023; Espinoza; Buehlmann, 2018, 2018; Rahla; Mateus; Bragança, 2021). Esta variação implica em iguais modificações de suas propriedades, dificultando uma aplicação uniforme deste método construtivo.

Edifícios com estrutura de madeira, especialmente o edifício de madeira estudado com seus sistemas de piso pré-fabricados projetados para ambientes internos, são adequados para desmontagem e subsequente reutilização (Eslami *et al.*, 2024; Quintana-Gallardo *et al.*, 2021).

Enquanto que a reciclagem serve, portanto, como uma estratégia de fim de vida destinada a fechar os ciclos de recursos através do reprocessamento de materiais para uso em outro produto, prevenindo assim a geração de resíduos e a extração de matérias-primas

(Eslami *et al.*, 2024). A reciclagem envolve a conversão de resíduos em novos produtos ou matérias-primas, que podem ser posteriormente utilizados para diversos fins (Santos *et al.*, 2024). No entanto, a reutilização tem maior potencial ambiental pois necessita de menor quantidade de beneficiamento e processamento para a transformação em um novo produto.

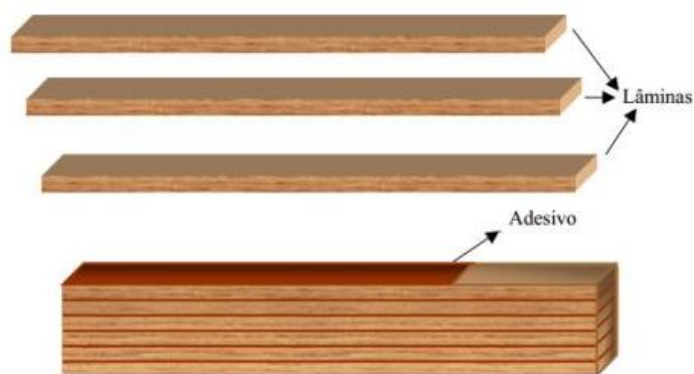
2.3.2 Madeira Laminada Colada (MLC/GLT/Glulam)

A primeira produção de vigas estruturais baseadas em Madeira Laminada Colada (MLC, do inglês *glued-laminated timber* (GLT/Glulam)) remonta a 1906, quando cola de caseína foi utilizada, aprimorando as técnicas de utilização da matéria-prima na construção. No Brasil, as primeiras fábricas foram estabelecidas na Região Sul durante a primeira metade do século passado, enquanto a primeira empresa fabricante de MLC na Região Sudeste foi inaugurada apenas em 1996. No entanto, ainda há uma carência significativa na publicação de estudos conclusivos nacionais sobre o uso de espécies tropicais nativas na fabricação de elementos estruturais de MLC (Nogueira, 2017).

A MLC, comumente referida como Glulam, é um importante produto de madeira estrutural, adequado para uso em aplicações externas, desde que seja protegida contra a deterioração por meio de design de construção, durabilidade natural ou tratamento (Stirling *et al.*, 2022).

A MLC descreve o material resultante da colagem das extremidades e/ou das faces de peças de madeira, seja em forma reta ou curva, com as fibras de todas as lâminas paralelas ao eixo da peça. As lâminas, que possuem comprimento suficientemente grande, são obtidas através de emendas longitudinais de tábuas e podem ser coladas face a face e borda a borda para alcançar a altura e largura desejadas. Todos esses fatores proporcionam uma ampla gama de opções no projeto, sujeitas apenas às restrições econômicas envolvidas na produção e/ou uso (Oliveira, 2016).

Figura 9 - Conceito de Madeira Laminada Colada (MLC)



Fonte: Extraído de Nogueira (2017)

O processo de fabricação da MLC tem como objetivo melhorar as características físicas e mecânicas dos elementos estruturais. Os processos incluem: 1) separação e classificação das lâminas; 2) secagem e acondicionamento; 3) junção das emendas; 4) dimensionamento das lâminas; 5) aplicação do adesivo; 6) prensagem; 7) dimensionamento da viga; 8) teste de resistência da linha de cola; 9) aplainamento; 10) acabamento da viga (Oliveira, 2016).

As peças compostas podem ser produzidas em uma variedade de tamanhos, seções e formas, possibilitando seu uso em projetos estruturais, incluindo a capacidade de cobrir grandes vãos. Como material estrutural, a MLC pode ser empregada em vigas, pilares, pergolados, coberturas, passarelas, escadas, painéis e diversos revestimentos, oferecendo uma ampla gama de possibilidades arquitetônicas e estruturais (Souza, 2021).

A MLC utiliza lâminas de madeira serrada coladas em paralelo com um adesivo estrutural durável e resistente à umidade para criar um membro estrutural maior (Stirling *et al.*, 2022). Produtos de madeira, incluindo a MLC, utilizados em aplicações externas precisam ser protegidos contra a biodegradação que naturalmente ocorre neste tipo de material, quando não tratado este material geralmente está limitado a aplicações que são totalmente protegidas (American Wood Council (AWC), 2018).

Neste sentido é possível afirmar que a dureza e qualidade do MLC está estreitamente ligada ao adesivo utilizado em sua construção e à classificação das peças que serão distribuídas na estrutura. O adesivo deve apresentar características de uma união resistente, estável e durável, mas é importante não esquecer que essas características estão diretamente relacionadas com as propriedades da madeira (Oliveira, 2016).

Adicionalmente, fatores como a idade da árvore no momento da poda e o tipo de espécie são de extrema importância para atender adequadamente aos esforços solicitados pela estrutura, pois podem existir diferenças significativas na resistência entre troncos mais jovens e mais maduros devido ao grau de desenvolvimento interno das fibras. Peças de madeira que possuem altas proporções de lenho juvenil geralmente apresentam resistência relativamente inferior em comparação com aquelas com uma maior concentração de lenho adulto, exigindo assim maior critério na seleção do material estrutural.

2.3.3 Aplicação dos biomateriais de madeira na construção civil

Os artigos selecionados foram sistematizados na forma da Tabela 1 - Aplicação dos biomateriais de madeira na construção civil., evidenciando as principais aplicações trazidas pela literatura científica retornada.

Tabela 1 - Aplicação dos biomateriais de madeira na construção civil.

Referência	Fund.	EE	Rev.	MC	P	F	W
(Aloisio <i>et al.</i> , 2023)	●	●	●	●	●	●	●
(Andersen; Rasmussen; Ryberg, 2022)	●	●	●	●	●	●	●
(Andersen <i>et al.</i> , 2024)	●			●			
(Araujo <i>et al.</i> , 2023)		●	●	●	●	●	●
(Ben-Alon <i>et al.</i> , 2021)		●	●	●			
(Bui <i>et al.</i> , 2023)	●						
(Cabeza <i>et al.</i> , 2014)		●	●	●	●	●	●
(Caniato <i>et al.</i> , 2021)		●	●		●	●	●
(Chen <i>et al.</i> , 2023a)			●	●			
(Crafford; Wessels; Blumentritt, 2021)		●	●	●	●	●	●
(Eslami <i>et al.</i> , 2024)	●	●	●	●	●	●	●
(Espinoza; Buehlmann, 2018)		●	●	●			
(Gauch <i>et al.</i> , 2023)	●	●				●	●
(González-Retamal <i>et al.</i> , 2022)		●			●	●	●
(Hansen <i>et al.</i> , 2024)		●					
(Hassan; Öberg; Gezelius, 2019)	●	●	●	●	●	●	●
(Hong; Arehart; Srubar, 2020)			●		●		●
(Jackson, 2023)	●		●			●	
(Jeswani; Saharudin; Azapagic, 2022)			●		●	●	●
(Karlsson <i>et al.</i> , 2021)			●	●	●	●	●
(Li <i>et al.</i> , 2019)	●	●		●	●		●
(Liang <i>et al.</i> , 2023)		●					
(Liu <i>et al.</i> , 2022)		●					
(Mukkavaara <i>et al.</i> , 2020)		●		●			●
(Newberry; Harper; Norman, 2023)	●	●	●	●	●	●	●
(Obrecht <i>et al.</i> , 2021)			●		●		●
(Odey <i>et al.</i> , 2021)		●					●
(Quintana-Gallardo <i>et al.</i> , 2021)			●	●	●	●	●
(Santos <i>et al.</i> , 2024)		●	●		●	●	●
(Serrano; Kampmann; Ryberg, 2022)	●	●	●	●	●	●	●
(Tupenaite <i>et al.</i> , 2023)			●	●	●	●	●
Total	11	21	21	18	19	18	22

Abordagem direta	3	9	5	3	1	5	1
Abordagem indireta/parcial	8	12	16	15	18	13	21

Legenda: (●) autor aborda diretamente o assunto na pesquisa conduzida; (◐) autor aborda de forma parcial o assunto; (VAZIO) o autor não aborda o assunto na pesquisa. (Fund.) fundação (*foundation*); (E.E.) element estrutural (*structural element*); (Rev.) revestimento; (M.C.) material construtivo (*building material*); (P) piso (*floor*); (F) frame; (W) parede (*wall*).

Fonte: Autora (2024)

2.4 Declarações Ambientais de Produto

As Declarações Ambientais de Produto (EPD, do inglês *Environmental Product Declarations*) fornecem informações quantitativas sobre os potenciais impactos ambientais de um produto ou serviço ao longo de seu ciclo de vida. Elas abrangem diversos aspectos, desde a extração de matérias-primas até a disposição final do produto, considerando fatores como consumo e eficiência energética, composição de materiais e substâncias químicas, emissões para o ar, solo e água, além da geração de resíduos (Strazza et al., 2016).

Um EPD é um documento verificado e registrado de forma independente, que comunica de maneira transparente os impactos ambientais associados ao ciclo de vida de um produto. Sua elaboração baseia-se na metodologia de ACV detalhada, e o ideal é que siga as Regras de Categoria de produto (PCR), diretrizes definidas por consenso para cada categoria de produto.

As PCRs são fundamentais para garantir a comparabilidade das EPDs dentro de uma mesma categoria, pois estabelecem diretrizes específicas para o desenvolvimento da ACV dos produtos. No entanto, como os EPDs são elaboradas com base em diferentes PCRs, elas não devem ser comparadas diretamente para avaliar o impacto ambiental de produtos distintos. Atualmente, há PCRs para uma ampla variedade de materiais da construção civil, como concreto usinado, concreto pré-moldado, tubos de concreto e blocos de alvenaria (Bovea; Ibáñez-Forés; Agustí-Juan, 2014).

No setor da construção civil, os EPDs desempenham um papel crucial na promoção da sustentabilidade. Elas possibilitam a avaliação comparativa do impacto ambiental de diferentes materiais e produtos, auxiliando na escolha de alternativas mais sustentáveis. Além disso, fornecem dados essenciais para a análise de edifícios, permitindo a identificação de produtos com menor impacto ambiental ao longo do ciclo de vida de um projeto. A harmonização e padronização dos EPDs acontecem pelas normas ISO 14025 e ISO 21930, complementadas pela EN 15804, que estabelece um

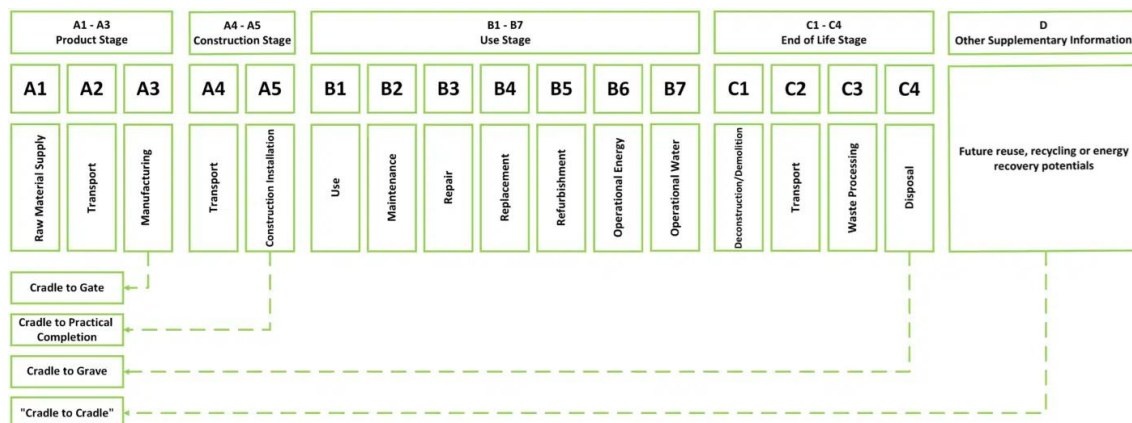
método consistente para a divulgação de informações ambientais sobre produtos de construção na Europa (Del Borghi, 2012).

A transparência e a credibilidade dos EPDs são garantidas pela verificação por terceiros e pela publicação dessas declarações em programas especializados. Isso as torna uma ferramenta valiosa para fabricantes e projetistas, pois facilitam a seleção de materiais com base em seu desempenho ambiental. Além disso, os EPDs podem ser incorporadas nos processos de compras e contratações, especialmente no setor público, contribuindo para o cumprimento de padrões ambientais (Strazza et al., 2016).

O uso de EPDs também incentiva a melhoria contínua nas práticas empresariais, impulsionando a inovação e a adoção de soluções mais sustentáveis. Essas declarações são particularmente relevantes para empresas que desejam acessar mercados globais, como o da União Europeia, onde há exigências rigorosas sobre informações ambientais de produtos. O objetivo principal das EPDs é fornecer indicadores ambientais padronizados por meio da metodologia de ACV, regulamentada pelas normas ISO 14040-44 (2006) (Del Borghi, 2012).

O ciclo de vida de um projeto é composto por quatro estágios principais (Figura 10): Fabricação dos Produtos, Construção, Uso e Fim de Vida (Bovea; Ibáñez-Forés; Agustí-Juan, 2014). O escopo de uma EPD é definido com base nos estágios do ciclo de vida contemplados, podendo ser classificado da seguinte forma:

Figura 10 – Estágios compreendidos na EPD



- *Cradle-to-Gate*: Inclui os impactos ambientais dos Estágios A1 a A3, abrangendo desde a extração de matérias-primas até a fabricação do produto. Esse escopo é conhecido como EPD Tipo III, conforme definido pela Norma Europeia EN 15804.

- *Cradle-to-Site*: Abrange os impactos do *Cradle-to-Gate*, além dos Estágios A4 e A5, estendendo a avaliação até o final da fase de construção de um projeto.
- *Cradle-to-Grave*: Expande o escopo do *Cradle-to-Site*, incorporando os impactos da fase de Uso (B1-B7) e Fim de Vida (C1-C4). Esse tipo de EPD é especialmente relevante para projetistas, pois permite considerar benefícios associados ao design e ao uso dos materiais de construção, como redução do consumo energético e da geração de resíduos, maior durabilidade dos materiais — minimizando a necessidade de manutenção e reparos — e aspectos específicos, como a carbonatação do concreto triturado na fase de descarte.

Além desses escopos, existe o Módulo D, que é opcional e está fora do limite do sistema. De acordo com a ISO 21930, esse módulo fornece transparência sobre os benefícios ambientais potenciais decorrentes do reaproveitamento de produtos, materiais reciclados, combustíveis secundários e energia recuperada, que deixam um sistema de produto para serem utilizados em um sistema subsequente (Strazza et al., 2016).

Embora os EPDs sejam ferramentas válidas para identificar os parâmetros ambientais de um material, sua utilização exige três ressalvas. A primeira diz respeito à autoria das Declarações. Como são elaboradas pelas próprias empresas, ainda que seguindo os parâmetros estabelecidos pelas normas ISO, não há garantia absoluta de que os resultados apresentados reflitam com precisão a realidade da produção, descarte e reuso dos materiais.

Essa limitação pode levar à ocorrência do chamado *greenwashing*, que consiste na produção de documentos — neste caso, os EPDs — com dados que subestimam o impacto ambiental dos materiais, promovendo uma suposta sustentabilidade que, na prática, não condiz com a realidade (Ministério Público do Estado Do Espírito Santo, 2024). Essa prática gera dois problemas principais: primeiro, induz consumidores e pesquisadores ao erro, pois os resultados podem não representar fielmente os impactos ambientais do material; segundo, compromete políticas de redução de emissões de carbono, ao conferir um selo de sustentabilidade a produtos que, de fato, não atendem a esses critérios (KPMG, 2023).

A segunda ressalva quanto à utilização dos EPDs refere-se à padronização dos resultados e à apresentação dos valores nelas contidos. Como mencionado anteriormente, as declarações são elaboradas pelas próprias empresas que as disponibilizam, o que

levanta a questão de que, muitas vezes, essas empresas não fornecem informações completas sobre todas as fases do ciclo de vida (A1-A3; C1-C5). Em consequência, é comum que haja a omissão ou condensação de dados relevantes. Além disso, embora os EPDs sigam diretrizes estabelecidas pelas normas ISO, elas frequentemente não detalham de maneira clara os métodos utilizados para calcular os resultados apresentados, o que dificulta a comparação entre EPDs de um mesmo material.

O terceiro ponto de atenção diz respeito à consideração das fases dos EPDs. Essa questão ganha relevância porque, na fase C (C1-C4), materiais substitutos, como a madeira engenheirada, são frequentemente tratados como se devolvessem integralmente o carbono biogênico sequestrado na fase A (A1-A5). Essa abordagem decorre da incerteza das empresas quanto ao destino final do material, o que pode comprometer a precisão da análise.

Além disso, como mencionado anteriormente, a fase D é de elaboração facultativa, o que prejudica a compreensão do potencial de reutilização, reciclagem e recuperação dos materiais no futuro. Essa lacuna limita a avaliação dos benefícios ambientais ao longo do ciclo de vida do produto, dificultando a formulação de estratégias mais sustentáveis para seu reaproveitamento. Considerando a fragilidade, sua inclusão não foi realizada no presente estudo.

Diante dessas considerações, torna-se evidente que, embora os EPDs representem um avanço na quantificação dos impactos ambientais dos materiais, sua utilização deve ser realizada com cautela. A ausência de verificações externas rigorosas pode comprometer a confiabilidade das informações divulgadas, consequentemente, induzindo decisões equivocadas. Além disso, a variabilidade na inclusão das fases do ciclo de vida, especialmente a facultatividade da fase D, limita a compreensão do potencial de reaproveitamento dos materiais, restringindo sua contribuição para uma economia verdadeiramente circular.

2.5 Achados da literatura e estado da arte

2.5.1 Tipos de construção

Identificar os tipos de construção reportados na literatura se apresenta como uma tarefa relevante, uma vez que será a partir destas noções que se torna possível explorar sua aplicação com a construção estudada neste trabalho. Compreender os diferentes tipos de construção mencionados em estudos anteriores permite estabelecer um fundamento sólido para a pesquisa atual, além de proporcionar um entendimento mais abrangente das diversas abordagens e metodologias existentes. Essa análise inicial é essencial para garantir que a pesquisa seja bem-informada e alinhada com o que já foi explorado na área.

Não obstante, essa identificação permite, ainda, discernir tendências de pesquisa. Ao examinar quais tipos de construção têm sido mais frequentemente abordados e em que contextos, os pesquisadores podem identificar padrões e direções predominantes no campo de estudo. Isso, por sua vez, pode oferecer insights valiosos sobre as áreas que têm recebido maior atenção e aquelas que podem estar emergindo como focos de interesse. Entender essas tendências ajuda a posicionar a pesquisa dentro de um panorama mais amplo, facilitando a identificação de contribuições inovadoras.

Além disso, a análise dos tipos de construção reportados pode favorecer a identificação de lacunas teóricas a serem investigadas. Ao mapear as áreas já cobertas pela literatura, torna-se possível observar onde existem poucos estudos ou onde os resultados ainda são inconclusivos. Essas lacunas representam oportunidades para novas pesquisas que possam avançar o conhecimento e oferecer novas perspectivas sobre o tema. Identificar essas áreas de necessidade não apenas direciona os esforços de pesquisa, mas também pode contribuir para o desenvolvimento de teorias mais robustas e abrangentes.

A sistematização dessas informações se faz representar na Tabela 2, na qual se apresenta a relação entre os autores e os tipos de construção reportados no referido estudo. Essa tabela serve como uma ferramenta visual e prática para organizar e resumir os dados coletados, facilitando a análise e a comparação. A tabela não só ajuda a estruturar o conhecimento existente de maneira clara e acessível, mas também pode servir como um ponto de partida para discussões e futuras investigações no campo da construção.

Tabela 2 – Tipos de construção apresentados na literatura.

Autor	Residencial				
	Uni	Multi.	Campo/Fazenda	Comercial	Outros
(Andersen; Rasmussen; Ryberg, 2022)		•			
(Ben-Alon <i>et al.</i> , 2021)		•			
(Eslami <i>et al.</i> , 2024)	•				
(Gauch <i>et al.</i> , 2023)					•
(Hansen <i>et al.</i> , 2024)	•	•		•	
(Hassan; Öberg; Gezelius, 2019)					•
(Hong; Arehart; Srubar, 2020)	•				
(Karlsson <i>et al.</i> , 2021)		•			
(Mukkavaara <i>et al.</i> , 2020)	•	•			
(Quintana-Gallardo <i>et al.</i> , 2021)	•				
(Serrano; Kampmann; Ryberg, 2022)			•		
(Tefamariam, 2022)					•

Legenda: “Uni.” (Unifamiliar). “Multi.” (Multifamiliar)

Fonte: Autora (2024)

2.5.2 Método ACV utilizado

Na literatura selecionada, foram verificados diversos métodos de ACV. Esses padrões, consolidados na Tabela 3, indicam a inexistência de um padrão único de medição. Em muitos casos, observou-se que diferentes padrões de medição podem ser utilizados dentro de um mesmo território, como um país, o que demonstra a variação e a flexibilidade nas abordagens adotadas. Essa diversidade metodológica pode complicar a comparação direta dos resultados entre diferentes estudos e realça a importância de uma descrição clara e detalhada dos métodos empregados.

Foram percebidos, inclusive, autores que, embora utilizassem a ACV, não descreviam precisamente o padrão utilizado. Em outras palavras, não indicavam uma norma técnica que fundamentasse os resultados obtidos. Essa falta de especificidade pode comprometer a transparência e a replicabilidade dos estudos, dificultando a validação dos resultados por outros pesquisadores. A ausência de uma norma técnica clara pode levar a interpretações variadas e, por consequência, a conclusões potencialmente divergentes.

Não obstante, é necessário destacar que muitos artigos revisados foram do tipo “revisão sistemática”, os quais, por sua natureza, não incluíam parâmetros de ACV bem delimitados. Revisões sistemáticas são importantes para consolidar e sintetizar conhecimentos existentes, mas podem não fornecer detalhes operacionais sobre os métodos de ACV empregados nos estudos revisados. Esse aspecto deve ser levado em consideração ao interpretar os resultados e as conclusões dessas revisões, já que a falta de especificidade metodológica pode influenciar a consistência dos dados apresentados.

Por fim, na Tabela 3 foram indicados apenas os trabalhos que apresentavam um modelo de construção. Essa seleção foi feita para garantir a relevância e a aplicabilidade dos dados na pesquisa atual. Ao focar em estudos que oferecem modelos de construção específicos, a tabela visa proporcionar uma base sólida e contextualizada para a análise e o desenvolvimento subsequente do trabalho. Essa sistematização facilita a comparação entre diferentes abordagens e a identificação de melhores práticas no campo da ACV.

Tabela 3 – Métodos de ACV utilizados pela literatura.

Autor	Tipo de ACV
(Andersen <i>et al.</i> , 2024)	Padrão europeu EN15978
(Andersen; Rasmussen; Ryberg, 2022)	Diretrizes ILCD LCA
(Ben-Alon <i>et al.</i> , 2021)	Série ISO de normas de ACV
(Chen <i>et al.</i> , 2023)	Considerado, sem padrão delimitado.
(Eslami <i>et al.</i> , 2024)	ISO 14040
(Espinoza; Buehlmann, 2018)	Considerado, sem padrão delimitado.
(Gauch <i>et al.</i> , 2023)	EN 15978
(Hansen <i>et al.</i> , 2024)	EXIOBASE v.3.3.16b2
(Hong; Arehart; Srubar, 2020)	Avaliação do ciclo de vida do berço ao túmulo (normas ISO 14040/14044)
(Karlsson <i>et al.</i> , 2021)	Considerado, sem padrão delimitado.
(Liang <i>et al.</i> , 2023)	ISO-14040
(Mukkavaara <i>et al.</i> , 2020)	EN 15804
(Quintana-Gallardo <i>et al.</i> , 2021)	ISO 14040:2006; EN 15804:2020
(Serrano; Kampmann; Ryberg, 2022)	Metodologia de avaliação de impacto do ciclo de vida (LCIA) ILCD

Fonte: Autora (2024)

Observa-se que os artigos que discutiam e apresentavam aplicações práticas, mostraram-se inclinados a incluir em suas revisões padrões ISO ou outras Normas Técnicas para aferição da ACV. Esta delimitação se faz relevante ao passo em que permite uma reprodutibilidade dos resultados, bem como realização de comparativos com outras normas ou outras construções, tornando viável comparação entre os resultados obtidos.

2.5.3 Consideração do Carbono Biogênico

Posteriormente, verifica-se como a literatura aprecia a inclusão do carbono biogênico na ACV dos materiais (Tabela 4), sendo o Carbono biogênico é o CO₂ que os biomateriais tem a capacidade de armazenar ao longo da sua vida. A consideração do carbono biogênico é um aspecto crucial na ACV de produtos biológicos, pois envolve o carbono armazenado em materiais biológicos, como madeira e outros produtos vegetais, que capturam dióxido de carbono da atmosfera durante o crescimento das plantas. Essa captura de carbono pode influenciar significativamente o balanço de GEEs associados a

um produto ao longo de seu ciclo de vida (Carcassi *et al.*, 2022; Ruta; Pittau; Maserà, 2024).

A literatura aponta para diferentes abordagens quanto à inclusão do carbono biogênico na ACV. Alguns estudos o contabilizam na determinação da pegada de carbono ocasionada pela escolha do biomaterial; outros, contudo, não o incluem no cálculo final das pegadas.

Sua verificação é de relevante atenção, uma vez que esse enfoque pode revelar os benefícios ambientais de materiais biogênicos, que atuam como sumidouros temporários de carbono, reduzindo a pegada de carbono de produtos construídos a partir desses materiais. No entanto, a variabilidade nas metodologias de cálculo e nos períodos de tempo considerados pode resultar em diferenças significativas nos resultados apresentados pelos estudos.

Ademais, a inclusão do carbono biogênico na ACV está frequentemente sujeita a incertezas relacionadas ao destino final dos materiais e à sua gestão ao fim da vida útil. A forma como os resíduos são tratados — se são reciclados, incinerados ou enviados para aterros — pode alterar o balanço de carbono originalmente considerado. Por isso, a literatura sugere a necessidade de abordagens mais integradas e detalhadas para capturar de maneira abrangente os fluxos de carbono associados aos materiais biogênicos, visando melhorar a precisão e a utilidade das avaliações de ciclo de vida (Bherwani *et al.*, 2022; Freitas *et al.*, 2021; Jaramillo *et al.*, 2023).

Tabela 4 – Consideração do carbono biogênico na Análise do Ciclo de Vida.

Autor	Considera Carbono biogênico
(Andersen; Rasmussen; Ryberg, 2022)	Sim
(Ben-Alon <i>et al.</i> , 2021)	Não
(Eslami <i>et al.</i> , 2024)	Não
(Gauch <i>et al.</i> , 2023)	Não
(Hansen <i>et al.</i> , 2024)	Sim
(Hassan; Öberg; Gezelius, 2019)	Não
(Hong; Arehart; Srubar, 2020)	Não
(Karlsson <i>et al.</i> , 2021)	Sim
(Mukkavaara <i>et al.</i> , 2020)	Não
(Quintana-Gallardo <i>et al.</i> , 2021)	Sim
(Serrano; Kampmann; Ryberg, 2022)	Sim

Fonte: Autora (2024)

2.5.4 Pegada de Carbono

Último ponto analisado é a pegada de carbono das construções analisadas pela literatura. Estas encontram-se sistematizadas na Tabela 5. Sua apresentação entrelaça os resultados expostos na Tabela 2, quanto ao tipo de construção analisada, e na Tabela 4, quanto à consideração do carbono biogênico na medição da pegada de carbono.

É possível observar que a utilização de materiais substitutivos apresenta melhores resultados do que a construção padrão de concreto, indicando que esses materiais apresentam menores pegadas de carbono em sua utilização. Os estudos demonstram que as madeiras engenheiradas, devido ao seu processo de crescimento natural, capturam e armazenam dióxido de carbono, reduzindo assim a pegada de carbono total das construções. Essa vantagem se torna especialmente evidente quando comparada com a produção e o uso do concreto, que envolve emissões significativas de dióxido de carbono devido à fabricação do cimento, um dos componentes principais.

A inclusão do carbono biogênico resulta em números ainda melhores, evidenciando que a consideração deste critério na ACV é relevante e deve ser contabilizada nos estudos que buscam viabilizar a substituição do concreto por biomateriais. Quando o carbono biogênico é incluído na avaliação, o balanço total de carbono das construções que utilizam materiais biogênicos torna-se ainda mais favorável. Isso ocorre porque o sequestro de carbono durante o crescimento das plantas pode compensar, parcial ou totalmente, as emissões de gases de efeito estufa associadas ao processo de construção e ao ciclo de vida dos materiais.

Tabela 5 – Tipos de construção e pegadas de carbono.

Autor	Tipo de construção	CB	Pegada de carbono
(Andersen; Rasmussen; Ryberg, 2022)	Construção residencial multifamiliar	Sim	Para o aquecimento global, o impacto total caracterizado foi de 903,7 kg CO ₂ -eq/m ² e 454,2 kg CO ₂ -eq/m ² no cenário base, e 892,9 kg CO ₂ -eq/m ² e 288,5 kg CO ₂ -eq/m ² no cenário de carbono biogênico para o edifício de concreto e o edifício de CLT, respectivamente.
(Ben-Alon <i>et al.</i> , 2021)	Construção residencial de dois andares	Não	Os conjuntos de construção natural demonstraram reduzir a demanda de energia incorporada em 38–83%, o potencial de mudanças climáticas incorporado em 60–82%, a acidificação do ar incorporada em 57–98% e a poluição por partículas incorporada em 27–99% em comparação com os conjuntos de paredes convencionais. Além disso, o operacional...

Autor	Tipo de construção	CB	Pegada de carbono
(Eslami <i>et al.</i> , 2024)	Residencial dois pavimentos e porão	Não	O edifício de concreto emite 77,1% mais GWP (Potencial de Aquecimento Global) do que o edifício de madeira.
(Hansen <i>et al.</i> , 2024)	Casas unifamiliares (SFH), casas multifamiliares (MFH) e edifícios de escritórios (OB)	Sim	Os resultados obtidos mostram que a construção convencional tem uma pontuação de potencial de aquecimento global inferior à da construção à base de madeira para as tipologias de edifícios de casas unifamiliares e edifícios de escritórios, respectivamente, em 35–36% e 23–25% para vida útil de 60 e 100 anos. Por outro lado, as casas multifamiliares apresentaram impactos 36–39% menores no caso da construção à base de madeira para RSP60 e RSP100.
(Hassan; Öberg; Gezelius, 2019)	Casas de vários pavimentos em países ricos em florestas.	Não	Não descrito pelo autor.
(Hong; Arehart; Srubar, 2020)	Passive House	Não	A EE total dos edifícios residenciais investigados aqui representou de 22% a 91% do LCE total, dependendo do clima e do arquétipo do edifício.
(Karlsson <i>et al.</i> , 2021)	Edifício residencial	Sim	As emissões de GEE incorporadas de referência para os cinco sistemas de construção estão na faixa de 195–299 kgCO ₂ e/m ² de área bruta, com materiais representando em média 82%.

Legenda: “CB” (Carbono biogênico).
Fonte: Autora (2024)

2.5.5 Lacunas e deficiências da revisão sistemática

Uma das principais lacunas identificadas na revisão sistemática é a escassez de estudos sobre o uso de biomateriais no Brasil, destacando a necessidade de novas pesquisas, especialmente estudos de caso. Outra lacuna relevante diz respeito à consideração da disponibilidade de matérias-primas regionais para a produção de variantes engenheiradas. Muitos estudos indicam que a viabilidade da substituição de materiais tradicionais pelos biomateriais depende do ecossistema local, tornando essencial avaliar essa realidade no contexto brasileiro.

Além disso, três outras lacunas devem ser ressaltadas. A primeira refere-se à falta de estudos sobre a aplicação de biomateriais em construções unifamiliares, sendo a maior parte das pesquisas voltada para edifícios multifamiliares e comerciais. A segunda diz respeito à escassez de comparações diretas entre diferentes biomateriais. A terceira lacuna envolve a ausência de estudos que, além de abordarem a substituição dos materiais, apresentem metodologias claras e quantifiquem as emissões de carbono incorporado, especialmente no que se refere ao carbono biogênico.

A ACV, por sua vez, apresenta grande heterogeneidade nos estudos analisados, sem um padrão uniforme para seu cálculo, dificultando a comparação entre pesquisas. Além disso, muitas análises não seguem normas específicas, o que compromete a reprodutibilidade dos resultados. Mesmo quando normas como a EN 15978:2011 e a EN 15804:2019 são empregadas, a comparação entre estudos continua desafiadora devido às diferenças de escopo, premissas e inventários adotados.

Outro fator que compromete a comparabilidade dos resultados da ACV é a variação na consideração do carbono biogênico. A inclusão ou exclusão desse parâmetro pode alterar significativamente as conclusões, influenciando a escolha entre diferentes biomateriais. Assim, torna-se fundamental estabelecer diretrizes padronizadas para garantir análises mais consistentes e confiáveis.

Essas lacunas teóricas fundamentam o presente estudo, que investiga a aplicabilidade dos biomateriais na construção civil brasileira sob a ótica do carbono incorporado, com foco em residências unifamiliares. O estudo também busca comparar diferentes biomateriais, identificando aqueles com melhor desempenho em termos de substituição e adequação ao contexto nacional.

3 METODOLOGIA

A definição da metodologia empregada neste trabalho é essencial para assegurar seu rigor científico. Para tanto, a metodologia foi estruturada em seis etapas principais. Inicialmente (**Etapa 1**), foi realizado levantamento bibliográfico e teórico que embasou o uso de madeiras engenheiradas na construção civil, identificando padrões construtivos referenciados na literatura científica. Em seguida (**Etapa 2**) foi efetuado levantamento dos EPDs dos materiais substituíveis, substitutos e não substituíveis, considerando tanto padrões internacionais quanto nacionais. Por fim (**Etapa 3**), foi apresentado projeto e características da habitação que suportará a substituição dos materiais, possibilitando análises e discussões posteriores. Após essas etapas (**Etapa 4 e 5**), os dados foram apresentados na seção de resultados e aplicados na planta da habitação selecionado, permitindo uma comparação detalhada e uma discussão aprofundada sobre a validade dos materiais e seus impactos ambientais.



Figura 11 - Metodologia utilizada na construção da pesquisa.
Fonte: Autora (2025)

3.1 Levantamento teórico

A primeira etapa da metodologia consistiu em um mapeamento sistemático da literatura, realizado entre janeiro e março de 2024. Foram utilizadas as palavras-chave “Cross-Laminated Timber”, “Cross Laminated Timber”, “Cross-Laminated”, “CLT” e “Timber” nas bases de dados IEEE Xplorer, ASCE, Science Direct e Google Scholar. O processo seguiu as diretrizes recomendadas para revisões sistemáticas, abrangendo as fases de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão. Foram utilizadas as palavras-chaves apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Palavras chaves pesquisa. Revisão sobre utilização das madeiras engenheiradas.

Revisão sobre utilização das madeiras engenheiradas.	
	("cross laminated timber" OR "CLT" OR "GLT" OR "glulam" OR "glued laminated timber")
AND	("análise ciclo de vida" OR "acv") OR ("life-cycle analysis" OR "lca") OR ("efeito gás estufa" OR "ege") OR ("greenhouse gas" OR "ghg")
AND	("case study" OR "estudo de caso")
AND	("engenharia civil" OR "civil engineering") OR ("construção civil" OR "civil construction") OR ("edificação" OR "edification") OR ("estrutura" OR "structure") OR ("reforma" OR "remodeling" OR "reform") OR ("construção" OR "construction")

Fonte: Autora (2025)

Os critérios de inclusão para a seleção das publicações foram os seguintes: artigos publicados entre 2014 e 2024; textos em inglês ou português; discussões objetivas sobre a CLT ou GLT/Glulam; foco exclusivo em construções residenciais; publicação em revistas indexadas; e presença de, pelo menos, dois termos-chave no título e/ou resumo. Após a seleção das publicações, foram analisadas as EPDs dos materiais classificados como substituíveis, ou seja, aqueles que podem ser comparados à madeira engenheirada. Esses materiais foram agrupados nas seguintes categorias: materiais substituíveis (derivados da madeira), materiais substituídos (tradicionais) e materiais não substituíveis.

A seleção dos EPDs seguiu os seguintes critérios: (1) utilização do material no Brasil; (2) EPDs com aplicação global; (3) EPDs utilizados no contexto europeu; e (4) EPDs que apresentassem a maior quantidade de dados sobre os parâmetros estudados. Todas os EPDs selecionados foram extraídas do portal Environdec, sendo escolhidas apenas aquelas dentro do prazo de validade conforme as declarações submetidas na plataforma.

Com os dados levantados, foi realizada uma análise quantitativa para calcular a emissão de CO₂ por quilograma de material produzido. Essa análise possibilitou uma comparação precisa do impacto ambiental entre os materiais, com foco na emissão de gases de efeito estufa durante o processo de produção. Os resultados obtidos foram aplicados a uma planta real de imóvel, permitindo uma comparação prática entre o uso de materiais substitutos e materiais tradicionais.

Além disso, a análise avaliou a adequação da madeira engenheirada ao projeto arquitetônico, considerando aspectos como o desempenho estrutural, a compatibilidade funcional e a redução do impacto ambiental.

3.2 Levantamento dos materiais e EPDs

Para realizar o levantamento adequado dos materiais e de seus EPDs, foi utilizada a planilha Custo Unitário Básico (CUB). O CUB, desenvolvido pela Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), fornece o custo básico da construção civil no Brasil e especifica as quantidades de materiais utilizados para diferentes padrões de construção. Esses dados são fundamentados na ABNT NBR 12721:2006 e a Lei nº 4.591, de 16 de dezembro de 1964, que estabelecem diretrizes para a construção civil no país.

Um conceito fundamental trazido pelo CUB são os tipos de construções e seus respectivos padrões (Tabela 7). Os tipos de construção variam conforme a quantidade de cômodos, e os padrões mais altos utilizam uma quantidade maior de materiais em comparação aos padrões mais baixos, conforme instrução da Norma ABNT NBR 12.721.

Tabela 7 – Legenda quanto as construções apresentadas no CUB

Sigla	Descrição
R1	Residência unifamiliar.
PP4	Prédio popular
R8 e R16	Residência multifamiliar.
PIS	Projeto de interesse social.
RP1Q	Residência popular.
CAL8	Projeto comercial de andares livres.
CSL8 e CSL16	Projeto comercial de salas e lojas.

Fonte: Norma ABNT NBR 12.721

Embora a quantidade de materiais descritos pelo CUB não seja diretamente utilizada na comparação dos materiais (etapas 5 e 6 da Figura 11), a planilha em questão possibilita a identificação dos materiais comumente empregados na construção civil brasileira, bem como de suas propriedades. Assim, os EPDs foram pesquisadas considerando as propriedades apresentadas na planilha CUB. Essa abordagem busca assegurar que os materiais analisados sejam compatíveis com a realidade brasileira, mesmo quando não desenvolvidos ou amplamente utilizados no território nacional.

Os materiais tiveram seus EPDs levantadas a partir do repositório internacional Environdec e SIDAC³, permitindo com que houvesse comparação entre os resultados obtidos a partir dos materiais disponíveis no repositório internacional e aqueles apresentados na base nacional do SIDAC.

³ <https://sidac.org.br/>

3.3 Seleção dos EPDs utilizados

3.3.1 EPDs disponíveis em plataforma internacional

Considerando os materiais referenciados na planilha CUB e aqueles utilizados na construção-referência citada anteriormente, foram selecionadas 44 EPDs, sendo estas correspondentes a 17 materiais. O Apêndice A apresenta de forma organizada os EPDs selecionadas para integrar o trabalho. Anota-se que, quando o material possuir mais de uma EPD, os valores finais do referido material corresponderão a mediana dos EPDs de referência, de sorte a permitir a captura de um estado normal de utilização, afastando riscos relacionados à utilização de apenas um único produtor ou fabricante.

Os dados levantados nas EPDs foram todos passados para kg do material e feita a mediana desses impactos para aplicação na habitação, estes valores se encontram no Apêndice B. Sendo considerados para o estudo as fases A (A1-A5) e a fase C (C1-C4), a fase B foi desconsiderada pois as EPDs não especificam esta fase e a fase D também não foi considerada por mostrar uma imprecisão em seus dados e sobre o destino final dos matérias.

3.3.2 EPDs disponíveis na base SIDAC

Ao realizar pesquisa semelhante na base SIDAC, não foi possível identificar um conjunto abrangente de materiais, incluindo os substitutos. Observou-se que a base fornecia ampla referência aos materiais brutos e básicos da construção civil, porém sem detalhar outros componentes relevantes da obra. A Tabela 8 apresenta os dados encontrados na referida base.

Tabela 8 – EPDs selecionadas da base internacional.

Material	Categoria
Tijolo	Material substituível
Telhas	Material substituível
Concreto	Material substituível
Cimento	Material substituível
Brita	Material substituível
Bloco concreto	Material substituível
Areia	Material substituível
Vergalhão	Material não substituível

Fonte: Autora (2024)

É relevante destacar uma importante observação acerca dos resultados obtidos na base SIDAC. Diferentemente da base internacional, os valores apresentados no SIDAC não fornecem detalhamento sobre as fases do ciclo de vida do produto (A, compreendendo a fase A1-A3; C, compreendendo a fase C1-C4), nem distinguem a origem do CO₂ emitido, seja ele fóssil, biogênico ou relacionado a mudanças no uso da terra (LULUC). Os resultados são apresentados de forma simplificada, sem tais especificidades.

3.4 Apresentação do projeto da habitação

O presente estudo conta com a utilização de projeto real do programa da caixa minha casa minha vida, na Figura 12 e Figura 13. Este projeto já possui seu quantitativo de materiais contabilizado. O imóvel apresenta área construída de 43,0392m², e área útil de 37,59m² largura construída de 681cm, e comprimento de 632cm; tendo sido idealizada a construção de telhado com cobertura, expandindo o imóvel 70cm para cada um dos lados, alcançando largura final de 821cm, e comprimento de 772. O imóvel apresenta paredes internas e externas em largura fixa de 14cm. As descrições de cada espaço, bem como somatório das áreas construídas e dos materiais utilizados serão expostos na seção de discussão deste trabalho.

A habitação contém total de seis janelas, quatro portas e mobília básica de banheiro e cozinha, e apresenta telhado utilizando telhas cerâmicas.

Figura 12 - Planta baixa da habitação estudada.

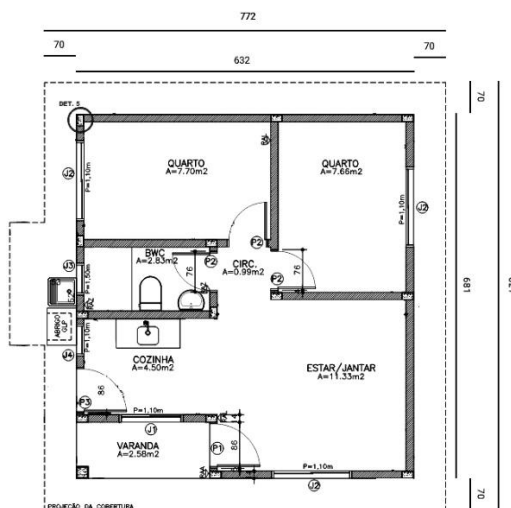
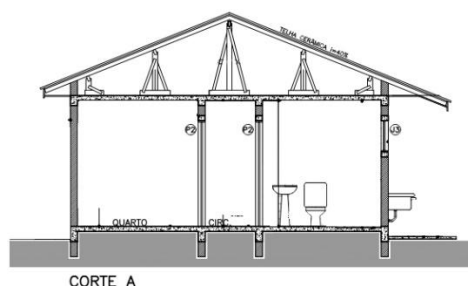


Figura 13 - Corte "A" da habitação estudada. Visão do telhado.



3.5 Aplicação dos materiais na habitação

Inicialmente observa-se que a aplicação dos materiais na planta da habitação segue o Guia de instalação de CLT/Glulam, sendo a primeira (CLT) aplicada nas paredes e no piso, e a segunda (GLT/Glulam) aplicada nas vigas estruturais da habitação.

Considerou-se que a utilização direta das estruturas apresentadas no Guia não se mostra utilização adequada, uma vez que estas utilizam isolamentos térmicos incompatíveis com o clima tropical do Brasil. Assim, o emprego destes materiais poderia resultar em aumento da temperatura e piora no desempenho energético geral da habitação. Nesse sentido buscou-se aplicar maior rigidez na estrutura a partir do aumento do número de placas CLT/GLT nas áreas de substituição.

A aplicação do material denominado de “barreira de vapor” se faz necessária para conter a propagação de chamas e vapores em caso de queima do material, sua aplicação, portanto, se faz medida de segurança recomendada pelo Guia e mantida neste trabalho.

3.5.1 Paredes internas e externas da habitação

A estrutura das paredes externas da habitação segue adaptação do diagrama disponível na 6.7 do Guia de instalação de CLT, conforme descrito acima. A utilização foi sumarizada e representada na Figura 14 e Figura 15.

Figura 14 – Recorte da parede externa e sua composição.

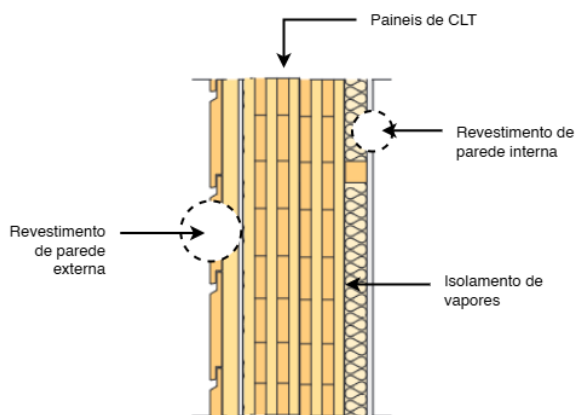
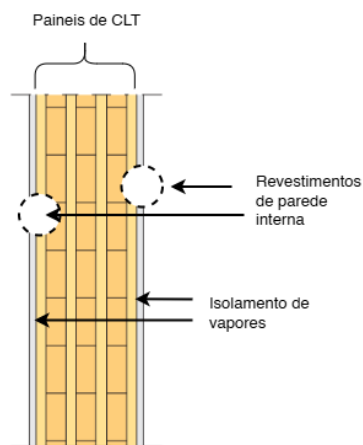


Figura 15 – Recorte da parede interna e sua composição.



Considerando o diagrama de utilização, passa-se a analisar a efetiva substituição dos materiais tradicionais pelos materiais substitutos.

Tabela 9 – Dimensões das paredes externas e área.

Parede	Faces	Largura (m)	Comprimento (m)	Área (M2)	Espessura (M)	Área (M3)
1	1	0,14	0,49	0,07	0,21	0,01
2	1	0,14	6,32	0,88	0,21	0,19
3	1	0,14	0,98	0,14	0,21	0,03
4	1	0,14	0,79	0,11	0,21	0,02
5	1	0,14	0,54	0,08	0,21	0,02
6	1	0,14	0,21	0,03	0,21	0,01
7	1	0,14	0,8	0,11	0,21	0,02
8	1	0,14	0,5	0,07	0,21	0,01
9	1	0,14	1,16	0,16	0,21	0,03
10	1	0,14	1,16	0,16	0,21	0,03
11	1	0,14	4,33	0,61	0,21	0,13
Total				2,42	Total	0,51

Fonte: Autora (2025)

Identificadas as onze paredes externas da casa, foi observado que sua metragem era de, respectivamente, 2,41m² e 0,508m³, sendo parâmetros para identificação dos demais materiais utilizados para aplicação da CLT no projeto.

Tabela 10 – Dimensões das paredes internas e área.

Parede	Faces	Largura (m)	Comprimento (m)	Área (M2)	Espessura (M)	Área (M3)
1	2	150	2	0,14	1,5	0,42
2	2	236	2	0,14	2,36	0,66
3	2	236	2	0,14	2,36	0,66
4	2	14	2	0,14	0,14	0,04
5	2	19	2	0,14	0,19	0,05
6	2	14	2	0,14	0,14	0,04
7	2	236	2	0,14	2,36	0,66
8	2	254	2	0,14	2,54	0,71
Total				3,25	Total	0,65

Fonte: Autora (2025)

Identificadas as onze paredes internas da casa, foi observado que sua metragem era de, respectivamente, 3,245m² e 0,649m³, sendo parâmetros para identificação dos demais materiais utilizados para aplicação da CLT no projeto.

Tabela 11 – Materiais complementares para utilização das madeiras engenheirada nas paredes.

Material	Quantidade	Unidade	Justificativa
Barreira vapor	5,66	M2	Equivalente ao total de metro quadrado da parede.
Esquadria de madeira	1,16	M3	Considera equivalência entre a quantidade de esquadria e a parte interna das paredes (metro cúbico (vezes) 19,5cm padrão).

Fonte: Autora (2025)

Importante anotar que, conforme previsto na tabela 8.12 do manual, a aplicação de CLT em paredes deve obedecer a regra mínima de três painéis da madeira engenheirada para as paredes internas (totalizando 80mm de espessura) e cinco para as paredes externas (totalizando 120mm de espessura), sendo então necessário considerar estes parâmetros para cálculo das emissões derivadas da substituição dos materiais tradicionais pelos substitutos. Para fins de compensação dos revestimentos internos, todas as paredes, internas e externas, terão espessura de cinco placas, permitindo maior rigidez da estrutura.

O valor do conjunto de paredes corresponder ao somatório das paredes internas e externas, uma vez que não há sobreposição das mesmas e que não há, no projeto original, distinção quanto aos materiais empregados para construção das paredes internas e externas da habitação.

Tabela 12 – Valores dos materiais substituíveis em paredes internas e externas.

Material	Fossil (kg CO2 eq.)	Biogênico (kg CO2 eq.)	LULUC (kg CO2 eq.)	Energia (MJ)	Água potável (M3)
Tijolo	483,28	12,22	0,36	7.079,86	0,81
Cimento	34,01	0,01	0,01	97,53	0,23
Soma aplicação tradicional	517,29	12,23	0,37	7.177,39	1,04

Fonte: Autora (2025)

Tabela 13 – Valores dos materiais substitutos em paredes internas e externas.

Material	Fossil (kg CO2 eq.)	Biogênico (kg CO2 eq.)	LULUC (kg CO2 eq.)	Energia (MJ)	Água potável (M3)
CLT	902,98	-4.529,94	6,94	110.450,45	6,77
Barreira vapor	28,49	0,00	0,00	489,35	0,11
Esquadria de madeira	263,73	-805,32	1,69	13.807,04	2,92
Soma aplicação CLT	1.195,20	-5.335,26	8,63	124.746,84	9,80

Fonte: Autora (2025)

3.5.2 Estrutura

Para comparar as paredes de infraestrutura, adotou-se a aplicação já prevista no projeto da habitação, com as seguintes métricas para a construção em alvenaria convencional: (i) concreto 20 MPa – 1,48 m³ e (ii) aço – 116,90 kg.

Na solução alternativa, utilizaram-se placas GLT, seguindo a espessura padrão adotada na habitação, com a aplicação de cinco placas. Essa escolha se justifica por proporcionar maior robustez e estabilidade estrutural à construção. Optou-se, em iguais parâmetros, pela dispensa de modelos construtivos que utilizassem enchimento/isolamento térmico, em prol de evitar aumento na temperatura do imóvel.

Tabela 14 – Valores dos materiais padrões para construção da infraestrutura da habitação.

Material	Fossil (kg CO2 eq.)	Biogênico (kg CO2 eq.)	LULUC (kg CO2 eq.)	Energia (MJ)	Água potável (M3)
Concreto	477,63	0,21	0,25	3.960,58	4,68
Vergalhão	58,38	0,43	0,05	1.222,75	0,37
Soma	536,01	0,64	0,31	5.183,33	5,04

Fonte: Autora (2025)

Tabela 15 – Valores dos materiais substitutos para construção da infraestrutura da habitação.

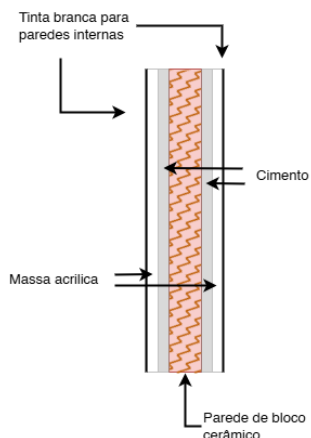
Material	Fóssil (kg CO2 eq.)	Biogênico (kg CO2 eq.)	LULUC (kg CO2 eq.)	Energia (MJ)	Água potável (M3)
GLT	2.139,56	-7.962,25	1,85	164.402,69	21,39
Soma	2.139,56	-7.962,25	1,85	164.402,69	21,39

Fonte: Autora (2025)

3.5.3 Revestimento das paredes internas da habitação

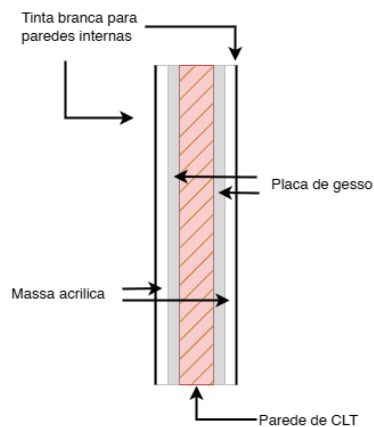
O revestimento das paredes internas da habitação é relevante ponto de ser observado, uma vez que a adoção de determinados materiais pode influenciar no desempenho do material construtivo utilizado. Considerando sua aplicação, foram desenvolvidos dois conjuntos de revestimentos internos a serem utilizados na construção analisada (Figura 16, e Figura 17).

Figura 16 – Revestimento de paredes tradicionais.



Fonte: Autora (2025)

Figura 17 – Revestimento de paredes CLT utilizando padrão tradicional.



Fonte: Autora (2025)

O primeiro conjunto de revestimento (Tabela 15) consiste na aplicação de revestimento em paredes tradicionais, ou seja, construídas em alvenaria. Neste contexto emprega-se o cimento, este em contato direto com o bloco cerâmico instalado, revestido por massa acrílica e finalizado com tinta para interiores. Adota-se como padrão de cobertura três demãos de massa acrílica e quatro de tinta.

Tabela 16 – Revestimento interno em paredes tradicionais.

Material	Fóssil (kg CO2 eq.)	Biogênico (kg CO2 eq.)	LULUC (kg CO2 eq.)	Energia (MJ)	Água potável (M3)
Cimento	349,53	0,06	0,10	1.002,45	2,41
Massa acrílica	5,66	0,00	0,08	99,01	0,08
Tinta	26,91	-4,68	0,00	564,33	0,78
Soma	536,01	-4,62	0,18	1.665,79	3,27

Fonte: Autora (2025)

O segundo conjunto (Tabela 16) consiste na aplicação dos mesmos materiais em paredes de CLT. Neste cenário há substituição do cimento pela instalação de placas de gesso. Foram utilizadas as mesmas quantidades de demão para massa acrílica e tinta, de modo a manter o mesmo padrão construtivo e de revestimento.

Tabela 17 – Revestimento interno em paredes GLT utilizando materiais tradicionais.

Material	Fóssil (kg CO2 eq.)	Biogênico (kg CO2 eq.)	LULUC (kg CO2 eq.)	Energia (MJ)	Água potável (M3)
Gesso	19,48	0,08	0,00	248,71	0,31
Massa acrílica	5,66	0,00	0,08	99,01	0,08
Tinta	26,91	-4,68	0,00	564,33	0,78
Soma	52,05	-4,60	0,08	912,05	1,17

Fonte: Autora (2025)

Optou-se por utilizar no revestimento externo os mesmos materiais já empregados na construção. Essa escolha facilita a aplicação e se alinha à realidade da construção brasileira. Além disso, o revestimento será padronizado tanto para paredes convencionais quanto para CLT, garantindo uma comparação objetiva entre os materiais, sem interferências decorrentes do uso de diferentes revestimentos.

Tabela 18 – Revestimento externo nas paredes da habitação.

Material	Fossil (kg CO2 eq.)	Biogênico (kg CO2 eq.)	LULUC (kg CO2 eq.)	Energia (MJ)	Água potável (M3)
Cimento	103,12	0,02	0,03	295,75	0,71
Massa acrílica	1,78	0,00	0,03	31,11	0,03
Tinta	1,73	-0,30	0,00	36,21	0,05
Soma	106,62	-0,28	0,06	363,07	0,79

Fonte: Autora (2025)

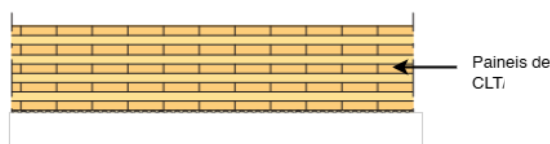
Os revestimentos não serão incorporados nos cálculos das paredes, uma vez que se pretende identificar qual melhor revestimento a ser utilizado nos cenários de substituição. Contudo, há de se observar que o piso substituído pelas placas CLT passou pela aplicação de verniz, sendo incorporado em sua instalação.

Esta incidência se justifica ao passo em que, diferente das paredes, o piso tradicional apenas ofertava um único revestimento, qual fosse a instalação de pisos em toda a extensão da habitação. Assim, com o objetivo de considerar também o preparo final da instalação nas hipóteses dos painéis CLT, aplicou-se verniz em toda a extensão do piso substituído.

3.5.4 Piso interno da habitação

Para construção do piso interno, optou-se pela estrutura 6 disponível na Tabela 5.4 do Guia de instalação de CLT/Glulam, uma vez que apresenta o menor número de materiais suplementares para sua instalação. De igual sorte, sua utilização também dispensa o emprego de materiais tradicionalmente utilizados nos pisos, permitindo uma aplicação mais simplificada dos materiais substitutos no imóvel. Sua representação pode ser verificada na Figura 18.

Figura 18 – Recorte do piso e sua composição.



A instalação sugerida pelo Guia não impõe quantidade mínima de madeiras CLT/Glulam, de modo a deixar “livre” sua escolha. Considerando, contudo, a espessura mínima sugerida nas paredes internas da habitação, adota-se igual utilização no piso, ou seja, a utilização de cinco painéis de madeiras CLT/Glulam para instalação do material.

Tabela 19 – Valores dos materiais tradicionais aplicados no piso interno.

Material	Fossil (kg CO2 eq.)	Biogênico (kg CO2 eq.)	LULUC (kg CO2 eq.)	Energia (MJ)	Água potável (M3)
Brita	886,98	0,21	0,17	7.107,32	9,54
Concreto	1.111,16	0,48	0,59	9.214,03	10,88
Argamassa	1.834,54	0,30	0,54	5.261,52	12,67
Azulejo	776,36	11,58	0,00	12.220,58	2,65
Soma aplicação tradicional	4.609,04	12,57	1,30	33.803,45	35,73

Fonte: Autora (2025)

Tabela 20 – Valores das madeiras engenheirada aplicadas no piso interno.

Material	Fossil (kg CO2 eq.)	Biogênico (kg CO2 eq.)	LULUC (kg CO2 eq.)	Energia (MJ)	Água potável (M3)
CLT	1.783,51	-8.947,25	13,71	218.154,79	13,37
Verniz	3.303,85	0,00	2,86	485,66	0,36
Azulejo	23,57	2,57	0,00	2.706,82	0,59
Soma aplicação CLT	1.979,09	-8.944,93	13,71	221.353,38	14,31

Fonte: Autora (2025)

A substituição apresentada na Tabela 18 indica que, dentre os sete atributos analisados, os materiais tradicionais (Tabela 17) se destacaram positivamente apenas dois deles (LULUC, e energia), a CLT apresentou os melhores índices de resultados, com aproveitamento superior em duas categorias (CO₂ Fóssil, consumo de água potável para fabricação do material), enquanto que a Glulam apresentou performance superior em três atributos (CO₂ Biogênico, resíduos gerais produzidos).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Demonstrativo e métricas dos materiais selecionados

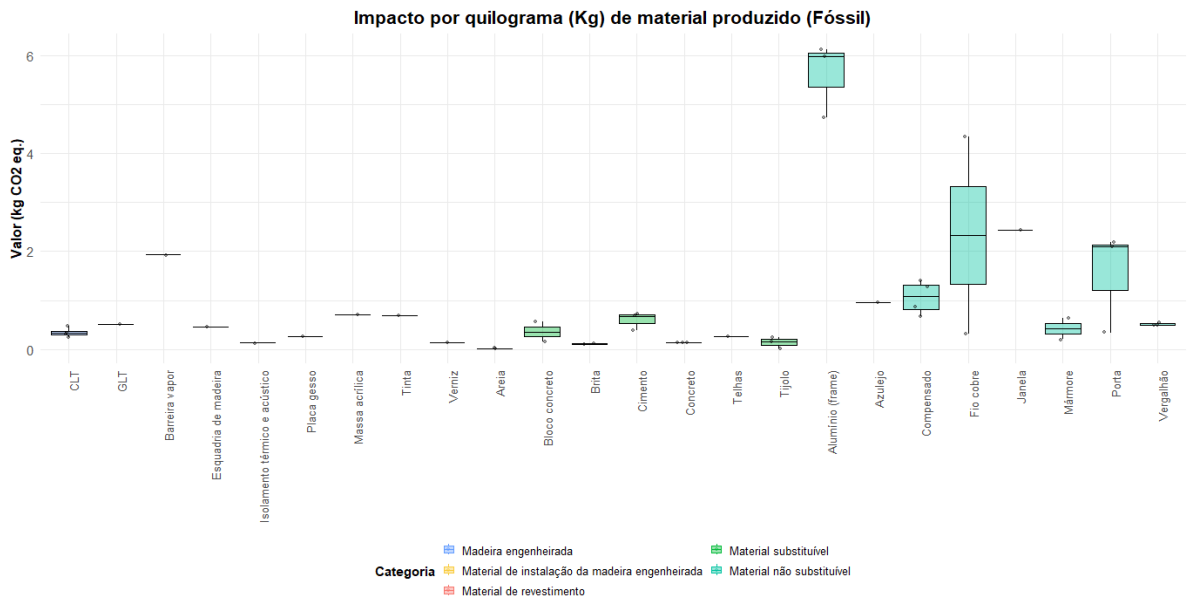
A análise dos demonstrativos individuais revela uma ampla variação nos impactos ambientais dos materiais (disponíveis nos Anexos B). Observa-se que um material pode apresentar desempenho inferior em determinado critério, mas destacar-se positivamente em outro. Dessa forma, a escolha final não deve se basear em um único parâmetro, mas sim em uma avaliação abrangente de múltiplos fatores que subsidiam a decisão.

Foram considerados os seguintes impactos: emissão de CO₂ fóssil (kg CO₂-eq.), CO₂ biogênico (kg CO₂-eq.), CO₂ LULUC (kg CO₂-eq.), energia necessária para fabricação e fim de vida do material (MJ), consumo de água potável (m³), geração de resíduos (kg) e a capacidade de reuso e reciclagem (kg), todos considerando a fase A (A1-A3), e C (C1-C4) dos materiais, desconsiderando seus respectivos valores da fase B e D como explicado anteriormente.

É relevante destacar que, diferentemente das bases internacionais, a base SIDAC não inclui diversos materiais analisados no estudo, restringindo a comparação apenas àqueles disponíveis no banco de dados nacional. Além disso, mesmo nos casos em que há equivalência entre materiais, a base SIDAC não fornece detalhamento suficiente sobre os impactos decorrentes da fabricação e do fim de vida do material, o que limita sua aplicabilidade na análise comparativa.

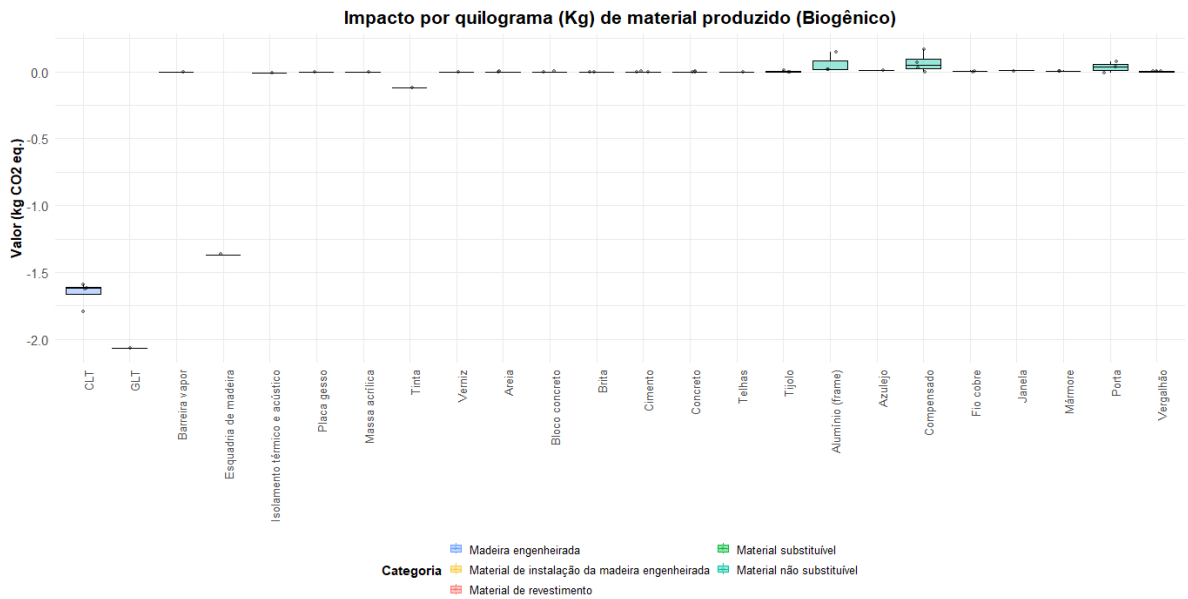
Observa-se que, ao comparar os materiais substituíveis com as madeiras engenheiradas, os primeiros tendem a apresentar impactos ambientais mais elevados em diversos aspectos. Os dados mostram que, em termos de emissões de CO₂ equivalente, por exemplo, materiais como o concreto, o cimento e o tijolo possuem valores significativamente mais altos do que a madeira engenheirada, como o CLT e o GLT.

Figura 19 – Impacto de emissão de CO2 Fóssil (kg CO2 eq.) por quilograma de material produzido.



Fonte: Autora (2025)

Figura 20 – Impacto de emissão de CO2 Biogênico (kg CO2 eq.) por quilograma de material produzido.



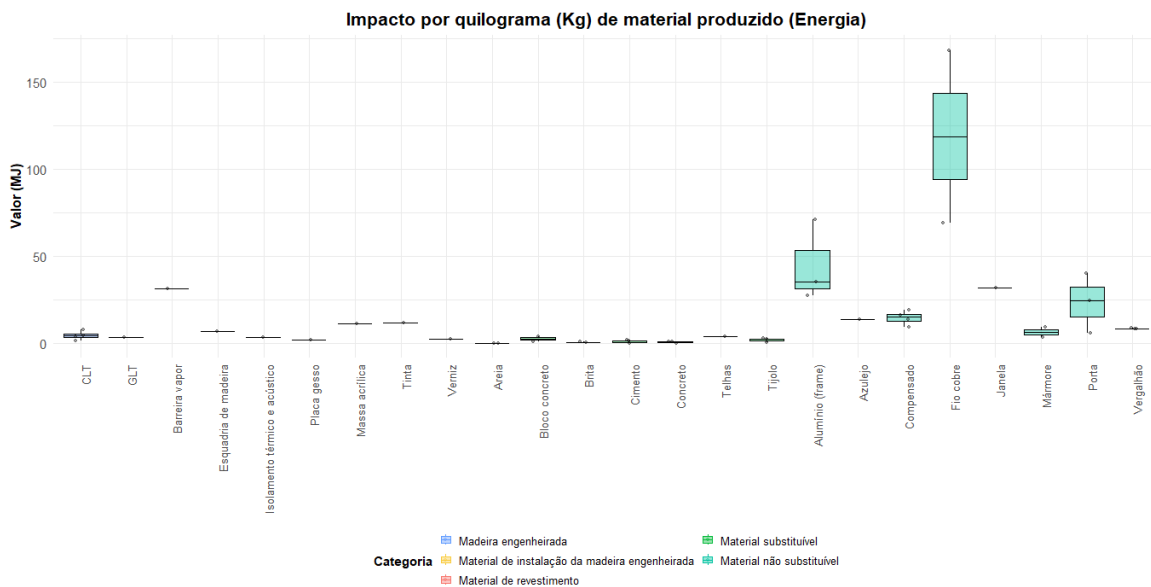
Fonte: Autora (2025)

Necessário considerar que, ao nos limitarmos somente à emissão de CO2 fóssil, os materiais substituíveis apresentaram melhor desempenho do que as madeiras engenheiradas. Por exemplo, o tijolo, o concreto e o cimento, apesar de apresentarem emissões de CO2 fóssil consideráveis, ainda possuem valores inferiores às emissões observadas nas madeiras engenheiradas, como o CLT e o GLT. O tijolo, por exemplo,

emite 0,2036 kg de CO₂ equivalente fóssil, enquanto o CLT, uma madeira engenheirada, emite 0,3189 kg de CO₂ equivalente fóssil. No entanto, ao analisar a emissão de CO₂ biogênico, as madeiras engenheiradas apresentam um grande diferencial.

O CLT, por exemplo, apresenta uma emissão negativa de -1,6213 kg de CO₂ equivalente biogênico, o que significa que o material contribui para a captura de carbono durante sua vida útil. Esse comportamento biogênico favorece consideravelmente as madeiras engenheiradas em termos de impacto ambiental positivo, equilibrando, e até superando, a maior emissão de CO₂ fóssil observada em outros materiais substituíveis. Portanto, enquanto os materiais substituíveis apresentam menor impacto em termos de CO₂ fóssil, as madeiras engenheiradas se destacam pelo efeito de sequestro de carbono, resultando em um desempenho ambiental superior quando se considera o CO₂ equivalente total.

Figura 21 – Impacto de emissão de energia (MJ) por quilograma de material produzido.

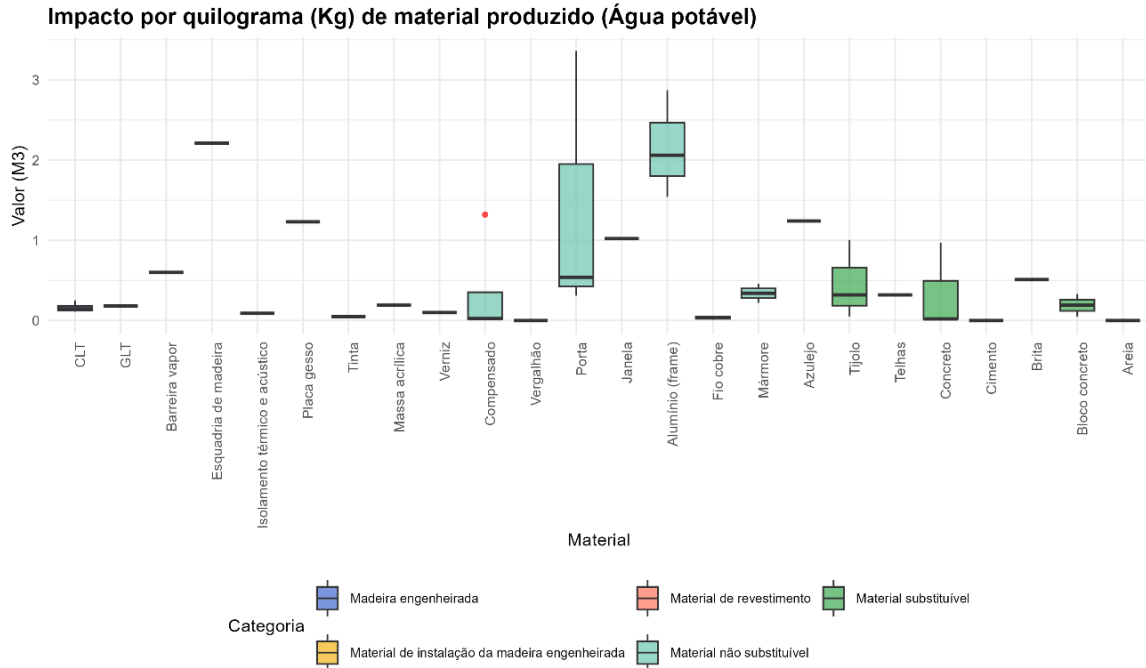


Fonte: Autora (2025)

Considerando o impacto relacionado ao consumo de energia, os materiais substituíveis apresentaram um desempenho mais favorável em comparação às madeiras engenheiradas. O consumo de energia dos materiais substituíveis, como o tijolo (2,7682 MJ), o concreto (1,1362 MJ) e a brita (0,4724 MJ), é consideravelmente mais baixo em relação às madeiras engenheiradas. Por exemplo, o CLT e o GLT, apesar de suas vantagens ambientais, exigem uma quantidade significativamente maior de energia para sua produção, com o CLT consumindo 40,5043 MJ e o GLT 39,6724 MJ. Este alto

consumo de energia nas madeiras engenheiradas reflete o impacto energético da sua produção, que envolve processos mais complexos e intensivos.

Figura 22 – Impacto de consumo de água potável (M3) por quilograma de material produzido.



Fonte: Autora (2025)

Considerando o impacto relacionado ao consumo de água potável, os dados apresentados não permitem uma conclusão definitiva sobre se as madeiras engenheiradas são, neste aspecto, piores ou melhores que os materiais substituíveis tradicionais. Enquanto materiais como o tijolo (0,0004 m³), o concreto (0,0013 m³) e a brita (0,0006 m³) consomem quantidades muito pequenas de água potável, as madeiras engenheiradas, como o CLT (0,0026 m³) e o GLT (0,0051 m³), apresentam valores de consumo de água mais elevados, especialmente no caso do GLT. Esse consumo mais alto de água nas madeiras engenheiradas pode ser atribuído ao processo de fabricação e ao tratamento dos materiais.

No entanto, as diferenças não são suficientemente expressivas para afirmar de maneira conclusiva que as madeiras engenheiradas têm um impacto ambiental pior ou melhor que os materiais substituíveis tradicionais em relação ao consumo de água potável, dado que os valores estão próximos e as variações são relativamente pequenas.

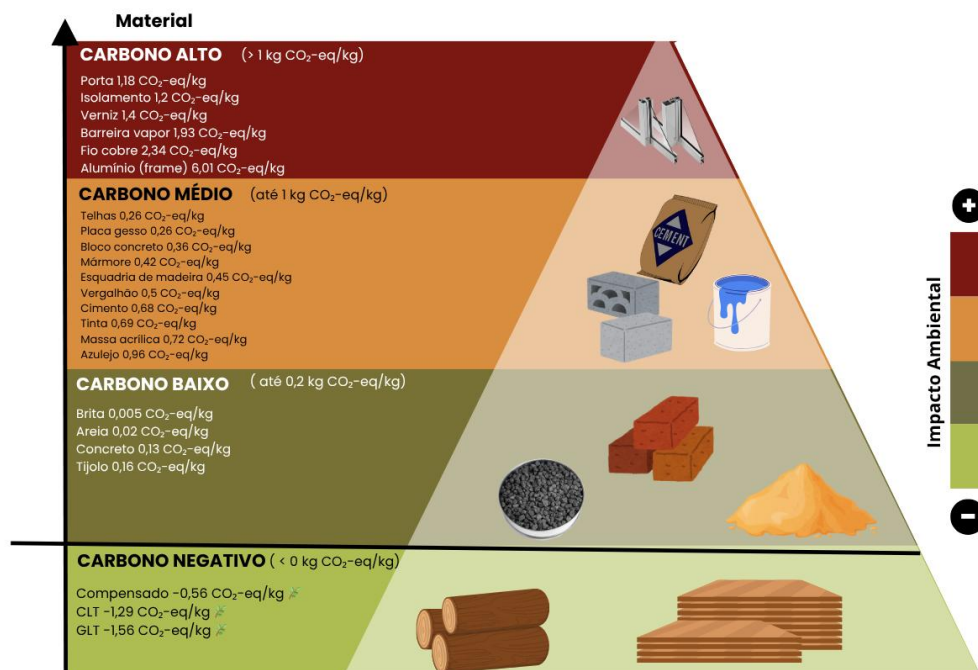
4.2 Pirâmides de Impactos Ambientais

Para a aplicação da dieta de carbono, foi estruturada uma pirâmide semelhante às pirâmides alimentares, porém representando os materiais de construção identificados, os quais foram alocados conforme suas emissões de carbono. Para isso, foi considerada a mediana de cada material, levando em conta os impactos de carbono fóssil e biogênico.

Com essa pirâmide, é possível visualizar quais materiais da construção causam maior impacto em termos de emissão de carbono, permitindo identificar aqueles que podem ser substituídos para reduzir a emissão de carbono em um edifício.

As pirâmides foram construídas com base nos estudos de Ruta et al. (2024) e adaptadas para expressar os valores por quilograma dos materiais, considerando a variação dos dados obtidos nas EPDs.

Figura 23 – Pirâmide Impacto Carbono

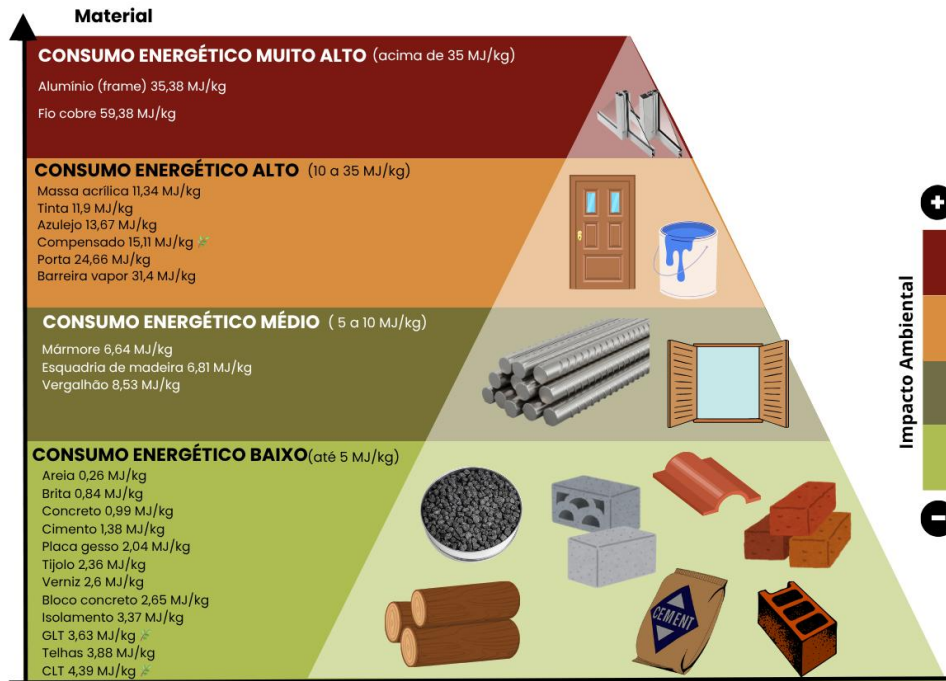


Fonte: Autora (2025)

Ao analisar a pirâmide dos impactos de carbono dos materiais, percebe-se que apenas os materiais à base de madeira apresentaram um balanço negativo. Além disso, observa-se que o material convencional com maior impacto é o cimento, e que os materiais que não serão substituídos são aqueles que aparecem no topo da pirâmide.

Além do impacto relacionado às emissões de carbono equivalente, também foram elaboradas pirâmides referentes ao consumo de água e de energia, com o objetivo de compreender a posição relativa dos materiais nesses dois tipos de impacto.

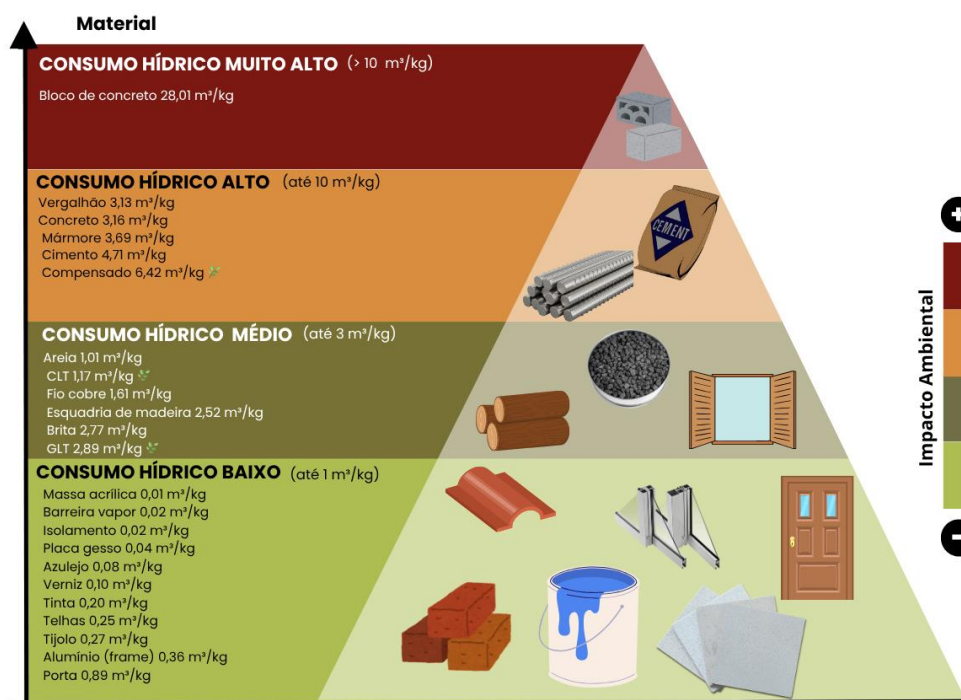
Figura 24 – Pirâmide Impacto Energia



Fonte: Autora (2025)

Quando se observa o consumo de energia, nota-se que a maior parte dos materiais convencionais, assim como os materiais à base de madeira, apresentam um consumo baixo de energia.

Figura 25 – Pirâmide Impacto Hídrico



Fonte: Autora (2025)

Por outro lado, ao analisar o consumo de água, verifica-se que os materiais à base de madeira possuem consumo médio a alto, enquanto os materiais convencionais estão distribuídos entre os quatro níveis, sendo o bloco de concreto o único material com consumo muito alto, conforme os dados avaliados.

Enxergar a especificação de materiais sob a perspectiva de dietas e cardápios, bem como por meio das pirâmides apresentadas, pode constituir uma estratégia eficaz para facilitar a difusão e a compreensão de conceitos ambientais — relacionados ao ciclo de vida dos materiais — na prática profissional de projetos de edificações.

Com o auxílio das pirâmides, é possível identificar os materiais que mais contribuem para determinado impacto ambiental e, portanto, o uso desses materiais deve ser restringido sempre que possível, considerando-se, evidentemente, aspectos fundamentais como desempenho e durabilidade.

Essas pirâmides também colaboram para a superação de um equívoco bastante comum: muitos materiais frequentemente apontados como “os grandes vilões” — como o cimento e o concreto, em termos de emissões de carbono — possuem, na realidade, um valor unitário de impacto por massa relativamente baixo quando comparado ao de outros materiais, como, por exemplo, o alumínio. A razão pela qual o cimento e o concreto permanecem em foco deve-se, sobretudo, ao seu elevado volume de consumo nos projetos.

Assim, a busca por projetos de baixo impacto ambiental deve partir sempre da premissa de que o consumo otimizado de materiais deve ser um dos principais objetivos, independentemente do tipo de material, com especial atenção àqueles posicionados no topo da pirâmide.

Por fim, cabe um cuidado especial na interpretação dessas pirâmides: embora exista essa classificação dos materiais, o real impacto de cada um só poderá ser efetivamente compreendido quando sua aplicação específica na edificação for avaliada, como será demonstrado na próxima seção.

4.3 Cenários de substituição

Vencidas as análises individuais, se faz possível realizar sobreposição dos resultados para, aplicando na totalidade da habitação, identificar qual o conjunto de substituição apresenta os melhores resultados. Sendo esses cenários de substituições hipotéticos, as substituições foram feitas considerando um projeto de engenharia real, porém as substituições foram feitas de forma hipotética, não sendo feito um projeto real da casa em madeira para o estudo.

A primeira aplicação consiste na utilização dos materiais tradicionais para construção da habitação. Neste cenário não são utilizados nenhum dos materiais substituíveis (madeiras engenheiradas), sendo aplicada construções em alvenaria tradicional para as paredes internas, externas, revestimento e piso, foi considerado o revestimento do piso em azulejo para habitação como um todo e para a parte da estrutura foi considerado a utilização de concreto e vergalhões. (Figura 26).

4.4 Análise dos cenários

Uma vez delimitados os ambientes nos quais as construções serão realizadas, e considerando os valores apresentados anteriormente, tornou-se possível a verificação gráfica de como os conjuntos de materiais se comportam a partir de cada impacto analisado.

Observa-se, ainda, que foram delimitados dois cenários para a análise do impacto fóssil associado à madeira. O primeiro consiste na consideração de que a madeira engenheirada foi descartada de forma adequada, com seu respectivo reuso ou reaproveitamento, afastando-se a hipótese da queima do material. Por outro lado, também foi considerado o impacto derivado da destinação inadequada do material após sua vida útil, resultando na devolução do carbono sequestrado ao meio ambiente.

4.4.1 Visão dos impactos na aplicação em paredes internas e externas da habitação

O uso da CLT na habitação apresenta resultados positivos no sequestro de CO₂, demonstrando um menor impacto ambiental em comparação aos materiais tradicionais, chegando a um sequestro de carbono de quase 4.000 kg CO₂-eq. Mesmo quando não se considera o carbono biogênico, a CLT apresenta um carbono equivalente 46% menor do que os materiais convencionais (Figura 28 e 29).

No entanto, sua aplicação envolve desafios significativos, como um consumo energético 93% superior ao dos materiais convencionais. Esse consumo elevado de energia ocorre principalmente na fase de produção da CLT, uma vez que as placas são prensadas (Figura 30).

Além disso, a CLT apresenta um aumento de 57% no uso de água. De acordo com as EPDs, esse consumo se dá principalmente na fase A3, que corresponde à sua etapa de fabricação (Figura 31).

Esses dados indicam que, embora a CLT tenha um impacto ambiental positivo em termos de carbono, sua adoção pode resultar em uma piora geral, considerando que outras métricas apresentam desempenho significativamente inferior em relação aos materiais tradicionais.

Figura 28 – Comparação dos impactos (Fóssil + LULUC) para parede com revestimento.

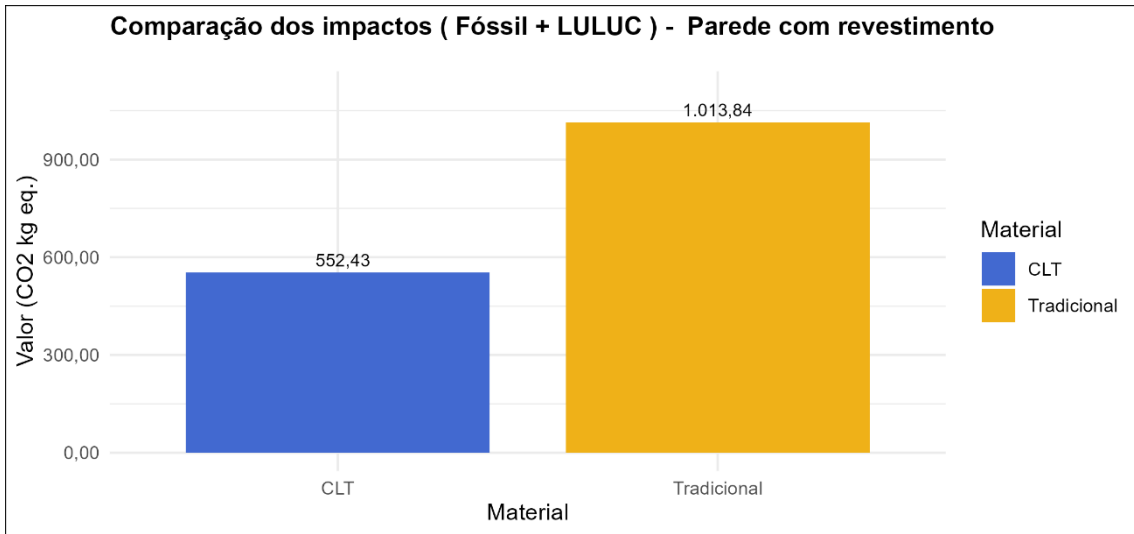


Figura 29 – Comparação dos impactos (Fóssil + Biogênico + LULUC) para parede com revestimento.

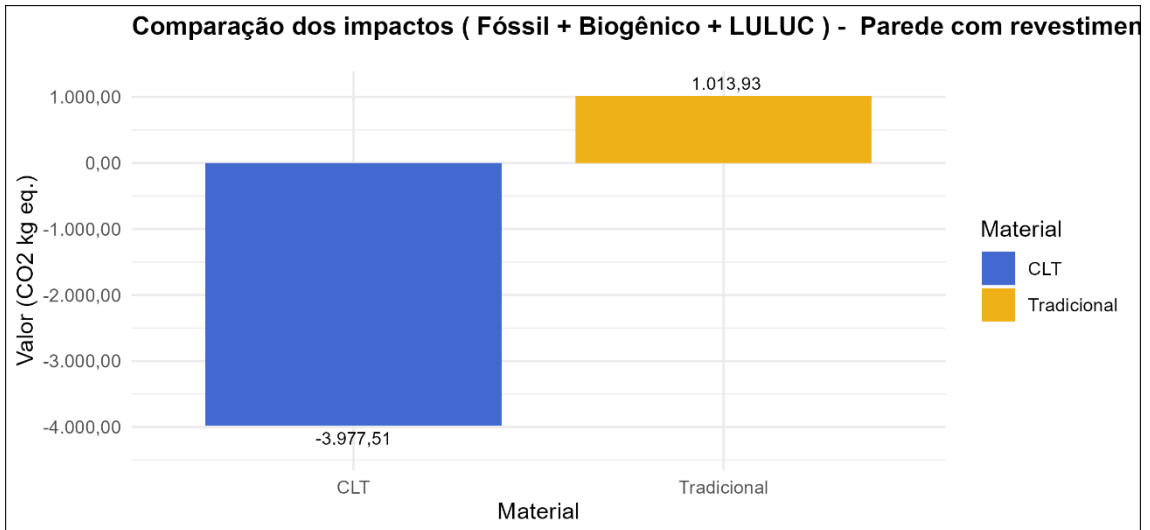


Figura 30 – Comparação dos impactos (Energia) para parede com revestimento.

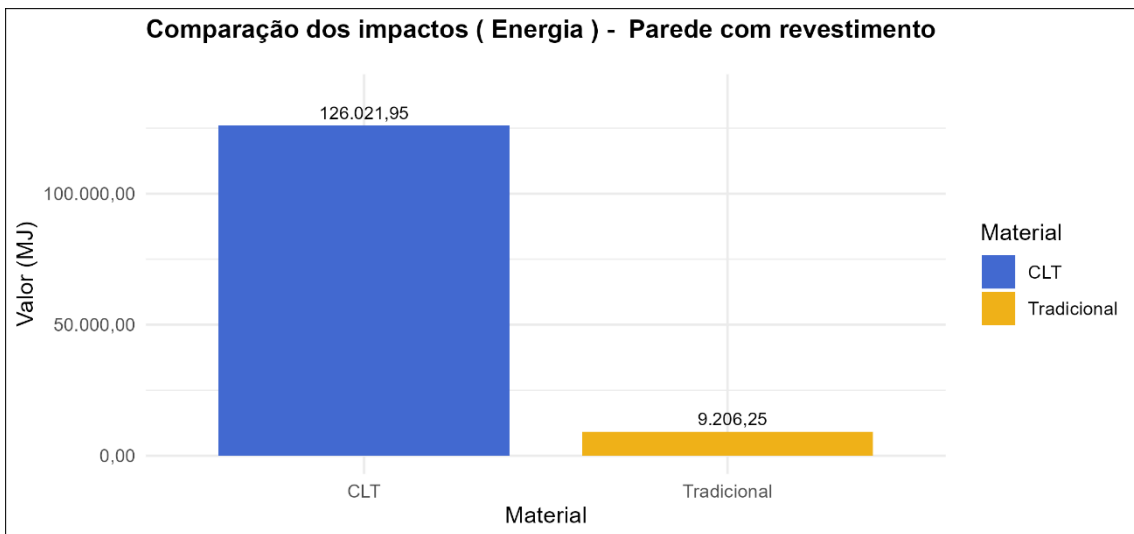
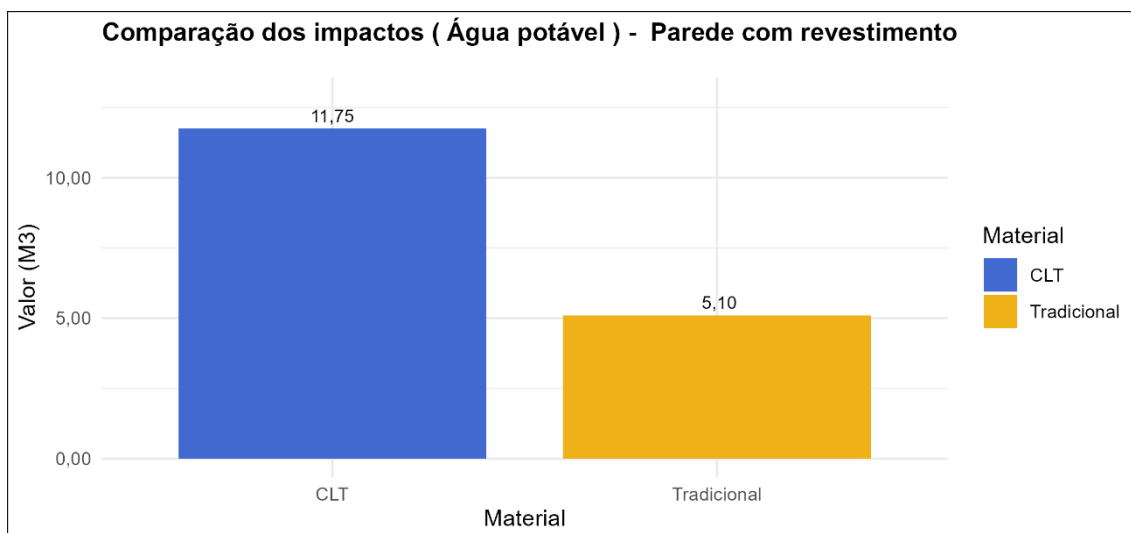


Figura 31 – Comparação dos impactos (Água potável) para parede com revestimento.



4.4.2 Visão dos impactos na aplicação no piso da habitação

O uso da CLT apresentou melhor desempenho na emissão de carbono, tanto no cenário de descarte adequado — com sequestro de CO₂ de quase 7.000 kg CO₂-eq — quanto no cenário sem considerar o carbono biogênico, apresentando uma emissão 57% menor do que os materiais convencionais. Em ambas as situações, os materiais tradicionais tiveram desempenho inferior, evidenciando um benefício ambiental relevante da CLT (Figuras 32 e 33).

Além disso, a CLT reduziu significativamente o consumo de água potável (60%), reforçando sua viabilidade sustentável. No entanto, essa vantagem está associada a um alto consumo de energia na fabricação das placas, que é 85% superior ao dos materiais convencionais (Figuras 34 e 35).

Embora os painéis de CLT apresentem benefícios consideráveis, a viabilidade de seu uso depende da origem da energia empregada na produção, uma vez que sua fabricação exige mais energia do que os materiais tradicionais. Esse é um fator determinante na decisão final, pois nenhum outro parâmetro ambiental analisado apresentou um impacto tão expressivo. Mais uma vez, ressalta-se que esse impacto está relacionado, principalmente, à etapa de fabricação da CLT.

Figura 32 – Comparação dos impactos (Fóssil + LULUC) para o piso

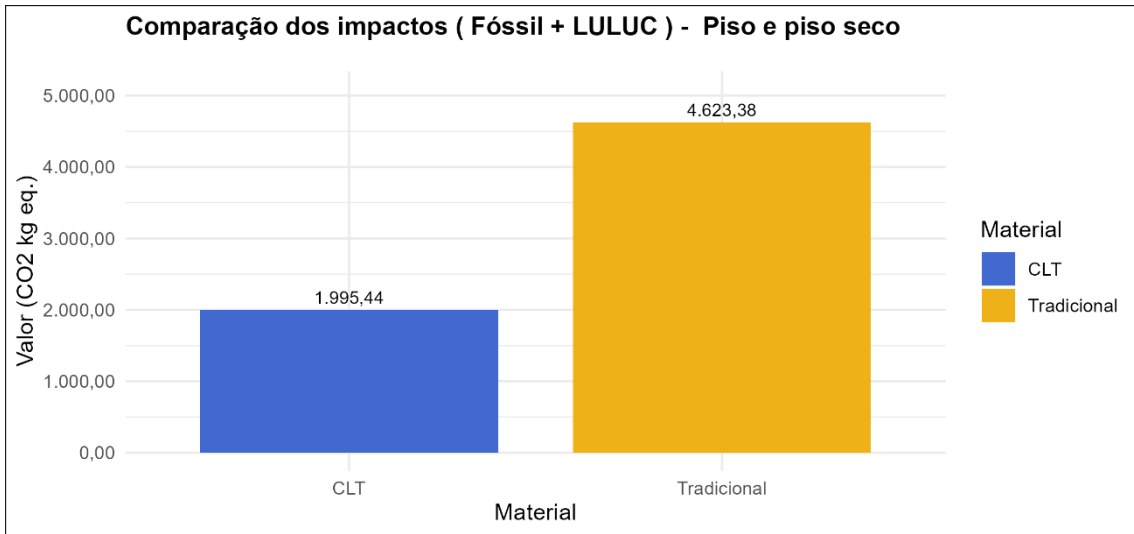


Figura 33 – Comparação dos impactos (Fóssil + Biogênico + LULUC) para o piso

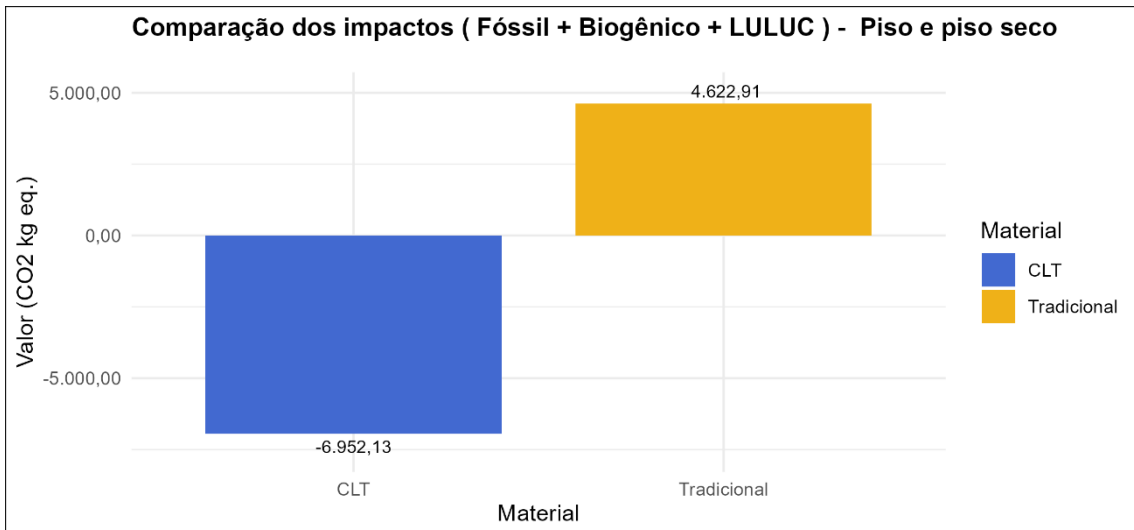


Figura 34 – Comparação dos impactos (Energia) para o piso

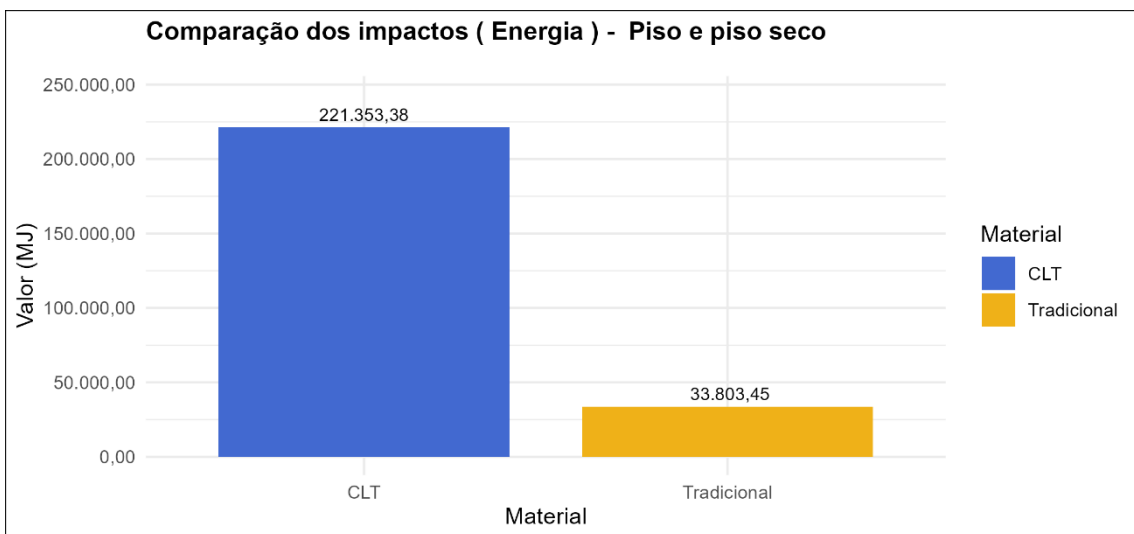
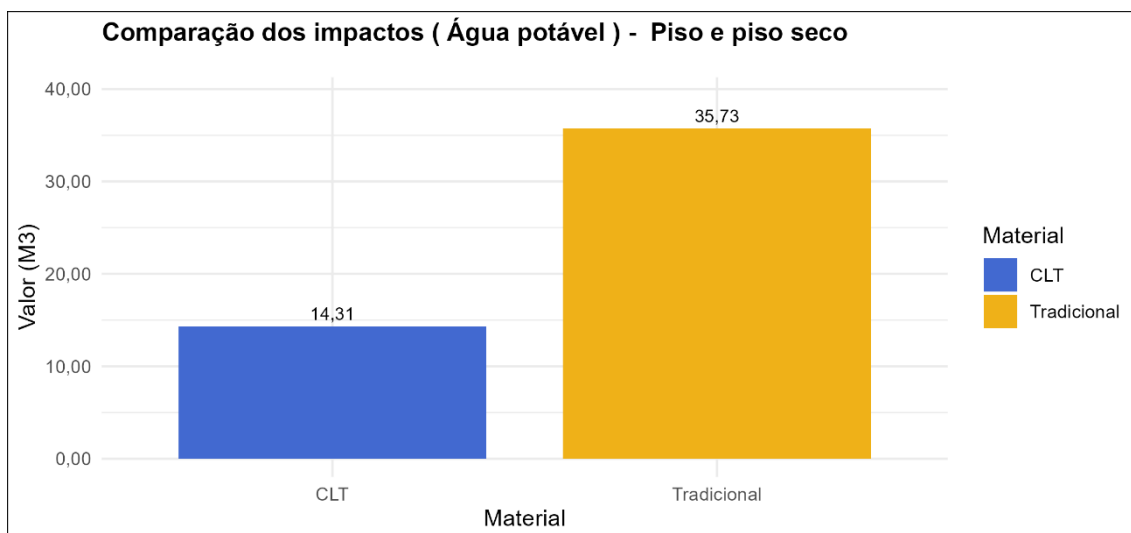


Figura 35 – Comparação dos impactos (Água potável) para o piso



4.4.3 Visão dos impactos na aplicação na estrutura da habitação

A GLT apresenta um desempenho superior no sequestro de carbono, atingindo quase 6.000 kg de carbono equivalente. No entanto, esse benefício está diretamente condicionado ao descarte correto do material. Quando o carbono biogênico não é considerado, a GLT apresenta uma emissão de carbono 80% maior em comparação aos materiais tradicionais (Figuras 36 e 37).

Além disso, a GLT possui um consumo energético significativamente elevado, sendo 97% maior do que o dos materiais convencionais. Assim como ocorre com a CLT, a fabricação da GLT demanda alto consumo de energia devido ao processo de secagem da madeira plantada em estufa e prensagem constante (Figura 38).

O consumo de água também é mais elevado, sendo 76% superior ao dos materiais convencionais, principalmente durante o processo de fabricação, tal como na produção da CLT (Figura 39).

Diante desse cenário, embora os painéis de GLT se destaquem no sequestro de carbono, sua aplicação geral pode não ser vantajosa, já que os demais indicadores ambientais apontam um desempenho substancialmente inferior em relação aos materiais convencionais utilizados na construção estrutural de habitações.

Figura 36 – Comparação dos impactos (Fóssil + LULUC) para Estrutura

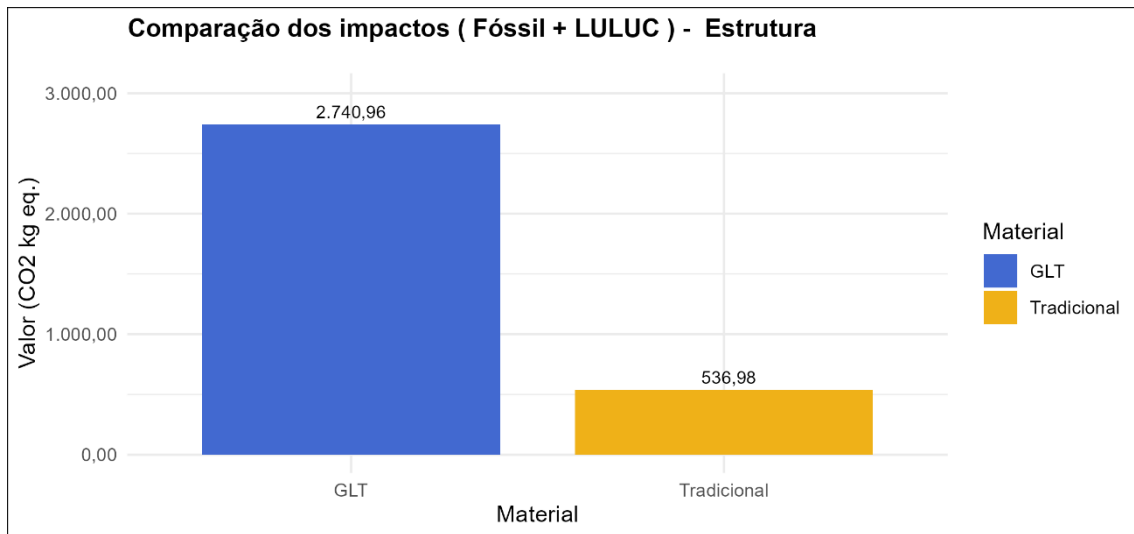


Figura 37 – Comparação dos impactos (Fóssil + Biogênico + LULUC) para Estrutura

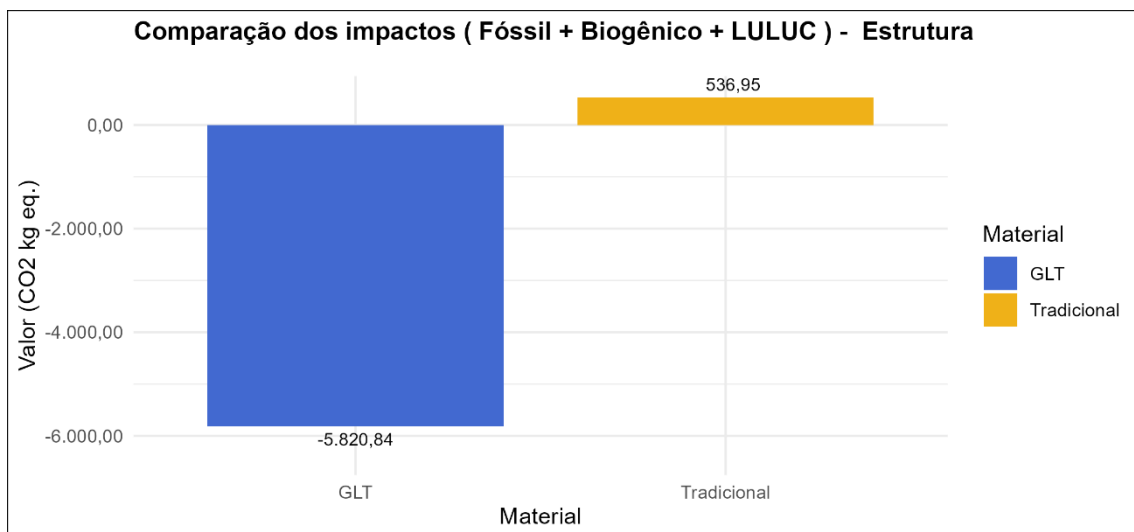


Figura 38 – Comparação dos impactos (Energia) para Estrutura

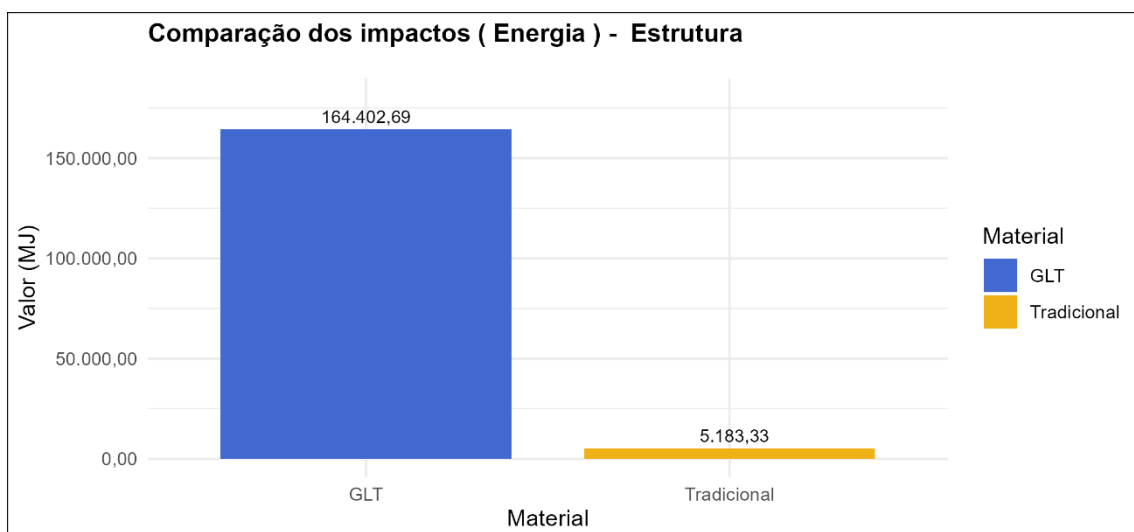
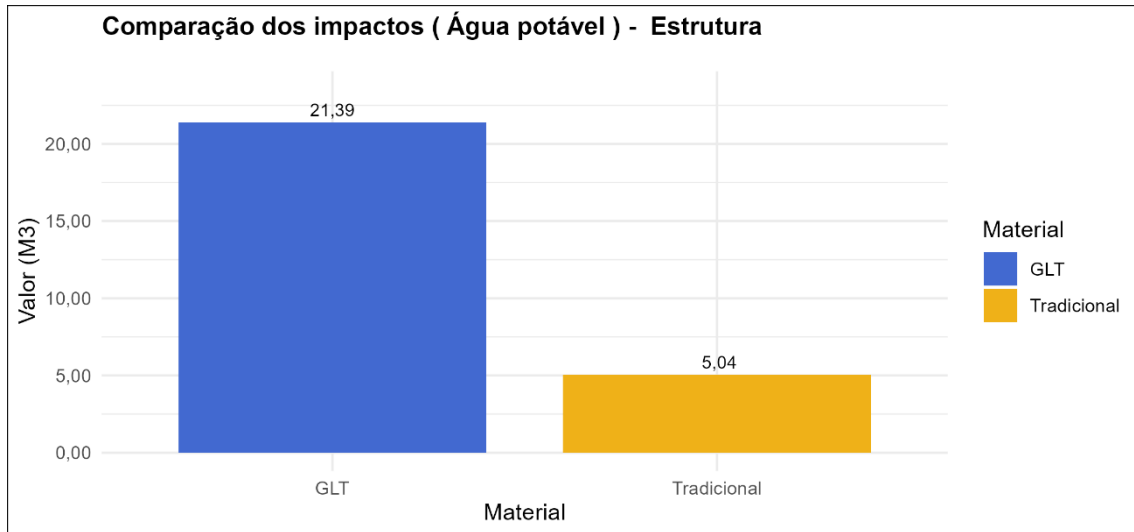


Figura 39 – Comparação dos impactos (Água potável) para Estrutura



4.4.4 Visão geral dos impactos da habitação

Para a análise da visão geral da habitação, também foram considerados outros materiais, como portas e esquadrias. Esses elementos foram incluídos para permitir uma visualização mais precisa dos impactos, possibilitando a avaliação do impacto ambiental por metro quadrado com base nos dados levantados nas EPDs.

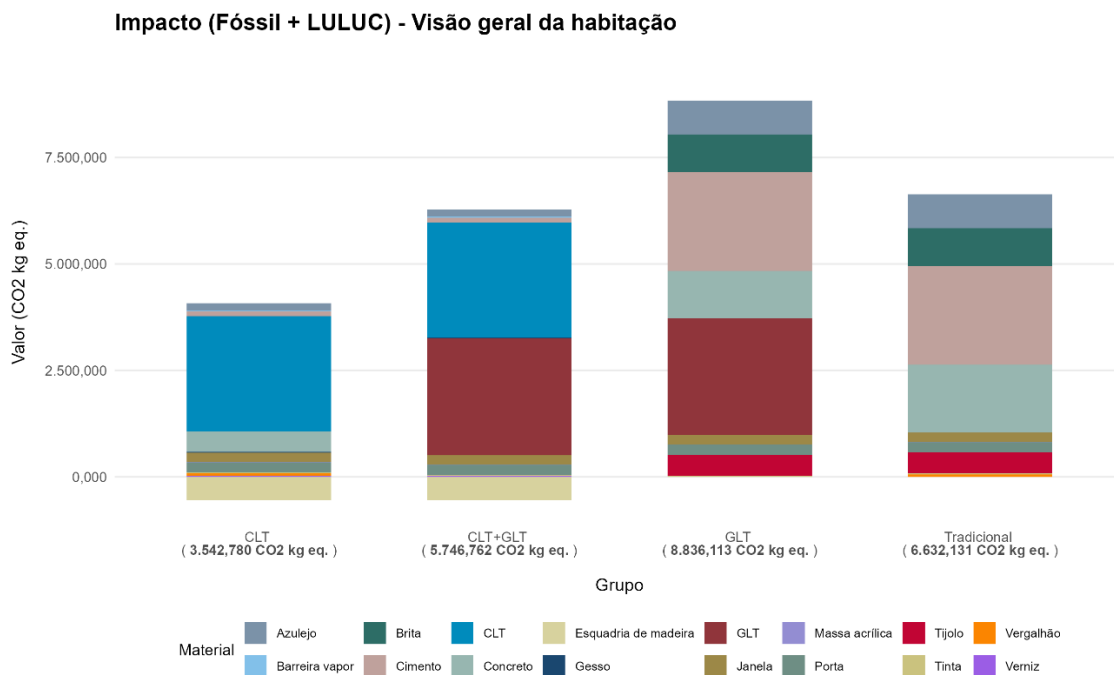
Conforme observado na tabela 21 e na figura 40 podemos notar que o cenário da CLT foi o que apresentou o melhor desempenho, apresentando uma pegada de carbono de apenas 82,31 kg CO₂-eq/m², contra 154,09 kg CO₂-eq/m² do cenário tradicional — uma redução de 47%. Já o cenário com GLT apresentou uma pegada de 205,30 kg CO₂-eq/m², ou seja, um aumento de 25% em relação aos materiais convencionais. Quando considerados CLT e GLT em conjunto, a pegada de carbono foi de 133,52 kg CO₂-eq/m², representando uma redução de apenas 13% em relação ao cenário tradicional.

Tabela 21 – Comparação cenários de substituição (Fóssil + LULUC).

Material	kg CO ₂ -eq/m ²	Porcentagem de Redução
Tradicional	154,09	-
CLT	82,31	- 47%
GLT	205,30	+ 25%
CLT + GLT	133,52	- 13%

Fonte: Autora (2025)

Figura 40 – Comparação dos impactos (Fóssil + LULUC) para Habitação separado por materiais



Fonte: Autora (2025)

Quando olhamos a tabela 22 e a figura 21 é possível notar um desempenho superior dos materiais à base de madeira em relação aos materiais tradicionais, especialmente quando se considera o sequestro de carbono. Os materiais tradicionais apresentaram uma pegada de carbono de 150,34 kg CO₂-eq/m², enquanto o cenário com substituição por biomateriais indicou um sequestro de 382,28 kg CO₂-eq/m². Ao analisarmos separadamente os cenários com CLT e GLT, a CLT demonstrou um sequestro de 234,57 kg CO₂-eq/m², e a GLT apresentou um balanço líquido de apenas 2,62 kg CO₂-eq/m².

No caso da CLT, o carbono sequestrado é superior ao carbono emitido na produção dos demais materiais. A GLT também apresentou uma baixa emissão de carbono devido ao seu elevado sequestro de carbono.

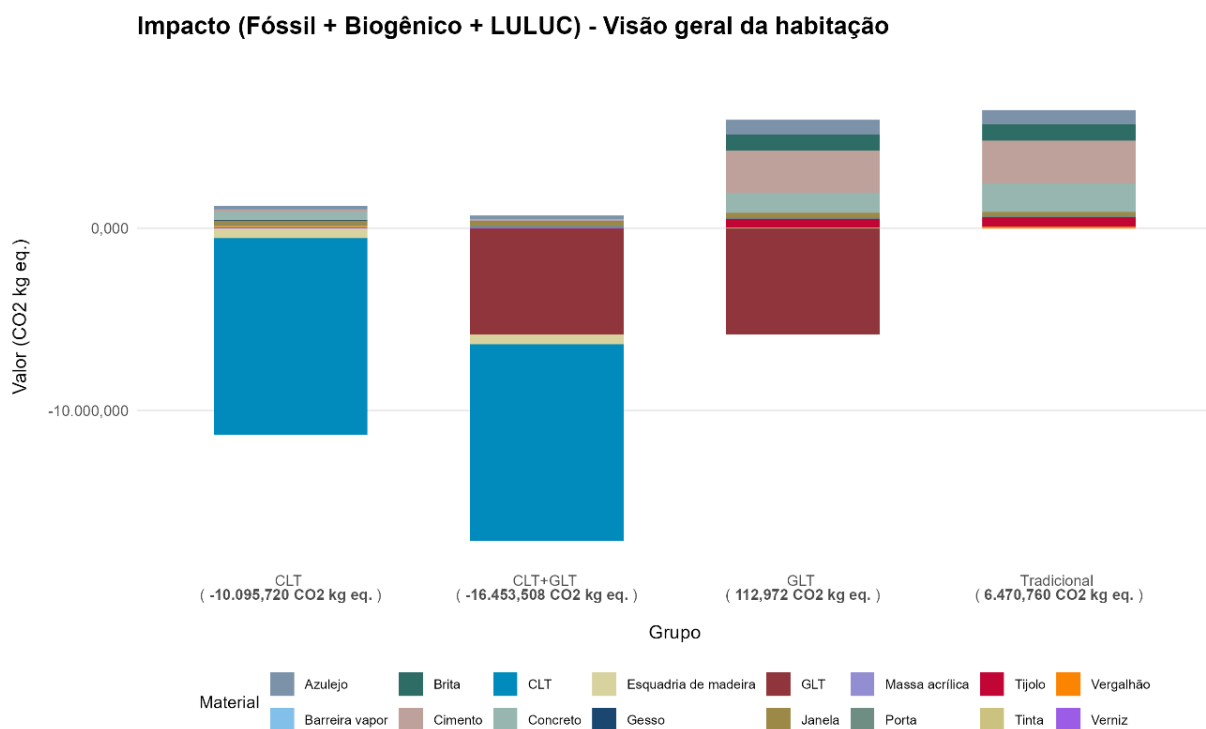
O desempenho inferior da GLT se deve, em parte, à utilização de materiais convencionais na construção das paredes e pisos, além de sua elevada emissão de carbono na fabricação, conforme já mencionado.

Tabela 22 – Comparação cenários de substituição (Fóssil + Biogênico + LULUC).

Material	kg CO ₂ -eq/m ²
Tradicional	150,34
CLT	-234,57
GLT	2,62
CLT + GLT	-382,28

Fonte: Autora (2025)

Figura 41 – Comparação dos impactos (Fóssil + Biogênico + LULUC) para Habitação separado por materiais



Fonte: Autora (2025)

No que diz respeito ao consumo energético, os cenários com biomateriais apresentaram desempenho inferior em relação aos materiais convencionais. O cenário com CLT teve um consumo de 8.493,63 MJ/m², o com GLT de 5.121,77 MJ/m², o com ambos (CLT e GLT) de 12.192,96 MJ/m², enquanto o cenário convencional apresentou um consumo de apenas 1.421,93 MJ/m². Assim, os aumentos registrados foram de 83%, 72% e 88%, respectivamente, conforme tabela 23 e figura 42.

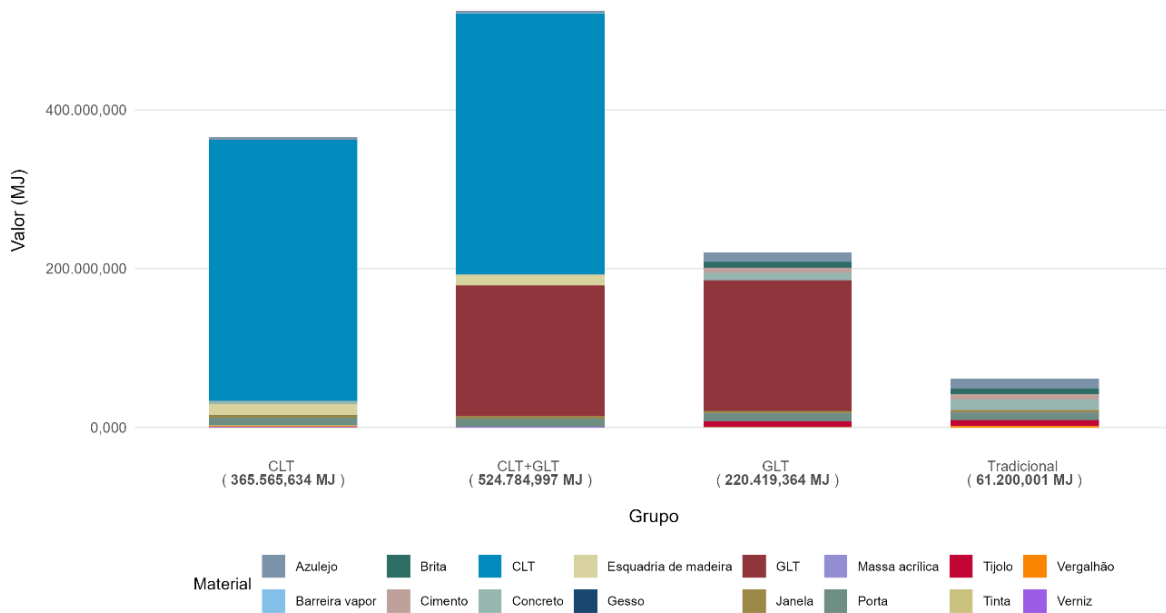
Tabela 23 – Comparação cenários de substituição (Energia).

Material	Mj/m ²	Porcentagem de Redução
Tradicional	1.421,93	-
CLT	8.493,53	+ 83%
GLT	5.121,77	+ 72%
CLT + GLT	12.192,96	+ 88%

Fonte: Autora (2025)

Figura 42 – Comparação dos impactos (Energia) para Habitação separado por materiais

Impacto (Energia) - Visão geral da habitação



Fonte: Autora (2025)

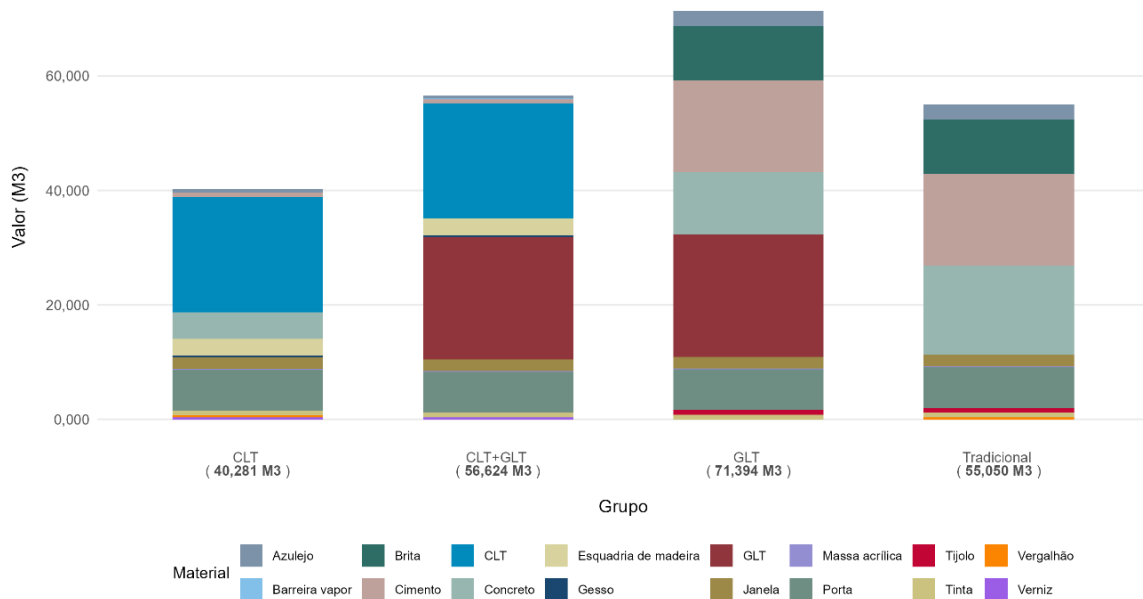
Em relação ao consumo de água, como apresentado na tabela 24 e figura 44, a variação entre os quatro cenários foi pequena. O cenário convencional teve um consumo de 1,28 m³/m², o da CLT de 0,94 m³/m², o da GLT de 1,66 m³/m² e o da combinação CLT e GLT de 1,32 m³/m². Nesse caso, a CLT apresentou um consumo 27% menor que o convencional, enquanto a GLT teve um consumo 23% maior. Quando ambos os biomateriais foram utilizados, o aumento foi de apenas 3%. Portanto, a substituição por biomateriais não causa impactos significativos no consumo de água.

Tabela 24 – Comparação cenários de substituição (Energia).

Material	m ³ /m ²	Porcentagem de Redução
Tradicional	1,28	-
CLT	0,94	- 27%
GLT	1,66	+ 23%
CLT + GLT	1,32	+ 3%

Fonte: Autora (2025)

Figura 43 – Comparação dos impactos (Água potável) para Habitação separado por materiais
Impacto (Água potável) - Visão geral da habitação



Fonte: Autora (2025)

4.4.5 Comparação com a literatura

Ao analisarmos os valores encontrados na literatura, é possível observar que alguns são próximos aos obtidos no presente estudo, enquanto outros apresentam variações mais significativas. Essa comparação, no entanto, deve ser feita com cautela, considerando as substituições realizadas em cada estudo, os materiais utilizados e se foi ou não considerado o carbono biogênico.

Nos estudos analisados, os materiais tradicionais apresentaram emissões de carbono variando entre 140 e 200 kg CO₂-eq/m², valor bastante próximo ao identificado neste estudo, que foi de 154 kg CO₂-eq/m². Quanto ao consumo de energia, houve maior variação nos artigos que abordaram esse impacto, com valores entre 1.700 e 3.000 MJ/m², sendo o valor obtido neste estudo de 1421 MJ/m², ficando um pouco abaixo quando comparado a literatura.

Em relação aos biomateriais, a variação das emissões de carbono foi de -73 a -126 kg CO₂-eq/m² quando o carbono biogênico foi considerado. Os valores encontrados variaram de -234 e -382 kg CO₂-eq/m² dependendo do material utilizado, ambos ficaram acima da variação encontrada na literatura. Já quando o carbono biogênico não foi considerado, as emissões chegaram a cerca de 300 kg CO₂-eq/m² enquanto que os valores

encontrados foram variaram de 82 a 205 kg CO₂-eq/m², ficando com valores menores que os da literatura.

Quanto ao consumo de energia, os valores variaram de 6.000 a 11.600 MJ/m² e os resultados obtidos ficaram ente 8.000 a 12000 MJ/m², ficando dentro da faixa quando comparamos com a literatura.

Segundo Karampour et al. (2020), o consumo de água em habitações construídas com CLT e GLT pode variar entre 0,93 e 3,54 m³/m², o que coloca os resultados do presente estudo, 0,94 a 1,66 m³/m², dentro dessa faixa. Para construções convencionais, o consumo hídrico varia de 1,85 a 5,05 m³/m², sendo o valor encontrado neste estudo um pouco abaixo do esperado (1,28m³/m²).

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram-se mais próximos aos do artigo de Eslami et al. (2024), tanto em relação ao impacto de carbono quanto ao de energia. Essa semelhança se deve principalmente ao fato de o estudo ter utilizado apenas CLT na substituição de paredes e pisos, além de apresentar os resultados de forma segmentada por fase da ACV. Os valores apresentados por Eslami et al. foram de 150 kg CO₂-eq/m² e 1.742 MJ/m² para os materiais convencionais, e de 83 kg CO₂-eq/m² e 6.000 MJ/m² para a CLT.

4.4.6 Considerações Gerais

Ao analisarmos a emissão de carbono, é possível considerar dois cenários: um que inclui o carbono biogênico e outro que o desconsidera. No cenário sem a consideração do carbono biogênico, a GLT apresenta uma emissão maior do que os materiais tradicionais. Por outro lado, a CLT demonstrou melhor desempenho mesmo nesse contexto. Quando o carbono biogênico é considerado, tanto a CLT quanto a GLT apresentam desempenho superior aos materiais convencionais.

Fazer a comparação separada do cenário considerando o biogênico e do cenário sem considerar se faz necessária por conta das incertezas que ainda temos a cerca do destino final dos matérias. Os biomateriais, como visto, apresentam um grande potencial para sequestrar carbono ao longo de sua vida, porém isto torna estes materiais uma bom de carbono ao fim de sua vida, já que seu descarte inadequada fará que todo esse carbono sequestrado volte para atmosfera.

Outro ponto relevante a ser considerado é a origem dos fabricantes. Como eles não pertencem ao mesmo país, as distâncias percorridas desde a extração da matéria-

prima até a fabricação dos produtos variam, o que pode impactar significativamente os resultados, dependendo do transporte envolvido.

Em relação ao consumo de energia, ambos os materiais substitutos (CLT e GLT) apresentaram valores superiores aos dos materiais tradicionais, o que se deve, principalmente, ao processo de secagem da madeira em estufa e de compressão envolvido na fabricação, que demanda alta energia. Por exemplo, na base de dados brasileira do SIDAC a madeira pinus, por exemplo, apresenta um consumo de 4853-6735 MJ/m³, sendo esse consumo apenas de secagem. Enquanto que o concreto e a argamassa apresentam um consumo de apenas 1928-3002 MJ/m³ e 1814-2401 MJ/m³ respectivamente.

Vale destacar que foi considerado o consumo total de energia. Contudo, as EPDs também distinguem entre energia renovável e não renovável, e outro fator importante é a matriz energética do país de origem dos materiais. Desta forma, um material que apresente um maior consumo energético, mas sua maior parcela venha de fontes renováveis, pode ter um desempenho ambiental superior em relação a um que tenha um valor global menor, mas com uma maior parcela de fontes fósseis.

No caso dos materiais convencionais como cimento e concreto, foram utilizadas EPDs brasileiras, cuja matriz energética é predominantemente hidrelétrica. Já as CLTs analisadas são provenientes de produtores europeus — Finlândia, Itália e Áustria — cujas principais fontes energéticas são, respectivamente, biomassa, gás natural e hidrelétrica. A GLT, por sua vez, teve como base uma EPD da Nova Zelândia, cuja matriz energética também é majoritariamente hidrelétrica.

Quanto ao consumo de água, a variação entre os quatro cenários foi pequena. No entanto, nos materiais à base de madeira, observa-se que o principal consumo ocorre durante a fase de fabricação, embora as EPDs não especifiquem em que etapas esse consumo ocorre.

É importante lembrar que o estudo feito considera apenas as fases A e C do ciclo de vida, sem levar em conta a fase de uso e manutenção da construção. Os valores obtidos podem acabar sofrendo variações se esta fase fosse considerada, já que ela também inclui a manutenção da habitação.

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do conceito de dietas de carbono revelou-se uma metodologia estratégica para orientar a escolha de materiais com base na hierarquia de suas emissões, promovendo decisões mais conscientes e alinhadas aos princípios da sustentabilidade. A dieta de carbono possibilita a reorganização da pirâmide de materiais tradicionalmente utilizada na construção civil, ampliando o espaço para soluções biológicas e de baixa emissão, ao mesmo tempo em que limita o uso de materiais intensivos em carbono apenas aos componentes para os quais não existem alternativas viáveis.

Os resultados demonstraram que a substituição parcial dos materiais convencionais pelos biomateriais analisados possibilita uma expressiva redução das emissões de CO₂ de origem fóssil, chegando a valores de até 47%, conforme o estudo de caso desenvolvido. Este achado reforça o potencial das soluções baseadas em biomateriais para contribuir significativamente com as metas globais de descarbonização da construção civil. A consideração ou não do carbono biogênico é um item crítico e merece atenção especial nesta análise.

No entanto, cabe destacar que, embora a substituição dos materiais tenha reduzido as emissões de carbono, observou-se um aumento considerável no consumo de energia associado à fabricação e ao processamento dos biomateriais (chegando a mais de 80%), evidenciando a necessidade de uma avaliação integrada de múltiplos impactos ambientais. Nesse sentido, torna-se imprescindível considerar, além da pegada de carbono, os efeitos relacionados ao consumo energético e hídrico, conforme abordado ao longo deste estudo e outros impactos ambientais (toxidade, uso da terra, etc.).

Outro aspecto relevante a ser considerado diz respeito à influência das fontes energéticas e matriz de energia elétrica sobre os resultados relacionados ao consumo de energia. Em países cuja matriz elétrica é predominantemente renovável, como o Brasil, os efeitos ambientais desse aumento podem ser mitigados; contudo, em contextos dependentes de fontes fósseis, os benefícios ambientais da substituição podem ser reduzidos ou até mesmo anulados, resultando em *trade-offs*.

Os cenários deste estudo foram construídos a partir das EPDs disponíveis, sendo que alguns dos materiais analisados não são de origem brasileira. Assim, para um cenário nacional, os resultados podem sofrer variações, considerando aspectos como a distância entre a extração da matéria-prima e a fábrica, o transporte até o canteiro de obras e a matriz elétrica utilizada na produção. Além disso, as EPDs podem apresentar certas

imprecisões, já que são elaboradas pelos próprios fabricantes e nem sempre deixam claro como os valores foram obtidos.

Dessa forma, os resultados desta pesquisa reforçam a importância de políticas públicas que incentivem o desenvolvimento e a utilização de biomateriais com menores impactos ambientais, bem como a necessidade de fortalecer cadeias produtivas locais que privilegiem fontes renováveis de energia. Além disso, destaca-se a necessidade de aperfeiçoar os EPDs, garantindo maior transparência, padronização e comparabilidade, especialmente no que diz respeito à consideração das fases completas do ciclo de vida e ao potencial de reuso e reciclagem.

Por fim, recomenda-se que futuras pesquisas ampliem a análise para outros contextos construtivos, mais impactos ambientais, etapas adicionais do ciclo de vida, bem como aprofundem o estudo sobre o desempenho dos biomateriais em relação a outros indicadores ambientais, sociais e econômicos. O desenvolvimento de metodologias mais integradas e adaptadas às especificidades regionais será fundamental para consolidar o uso de biomateriais como uma solução eficaz na descarbonização e na promoção de uma construção civil mais sustentável.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABDALLA, Jamal A. *et al.* A comprehensive review on the use of natural fibers in cement/geopolymer concrete: A step towards sustainability. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 19, p. e02244, 2023.

ADIER, Maria Fe V. *et al.* Bamboo as Sustainable Building Materials: A Systematic Review of Properties, Treatment Methods, and Standards. **Buildings**, [s. l.], v. 13, n. 10, p. 2449, 2023.

AGUIAR, Anna C. Fornero *et al.* Business, biodiversity, and innovation in Brazil. **Perspectives in Ecology and Conservation**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 6–16, 2023.

AKBARNEZHAD, Ali; XIAO, Jianzhuang. Estimation and Minimization of Embodied Carbon of Buildings: A Review. **Buildings**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 5, 2017.

ALEMU, Digafe; TAFESSE, Mesfin; MONDAL, Ajoy Kanti. Mycelium-Based Composite: The Future Sustainable Biomaterial. **International Journal of Biomaterials**, [s. l.], v. 2022, p. 1–12, 2022.

ALOISIO, Angelo *et al.* Vibration issues in timber structures: A state-of-the-art review. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 76, p. 107098, 2023.

AMEH, O. J.; SHITTU, K. A. Laminated Bamboo Board: A Sustainable Alternative to Timber Board for Building Construction. **LAUTECH Journal of Civil and Environmental Studies**, [s. l.], v. 6, n. 1, 2021. Disponível em: <https://laujoces.org/volume-6-issue-1-2021/621-2/>. Acesso em: 9 mar. 2024.

AMERICAN WOOD COUNCIL (AWC). **National Design Specification (NDS) for Wood Construction**. [S. l.]: American Wood Council, 2018.

ANDERSEN, Camilla Ernst *et al.* Evaluating the environmental performance of 45 real-life wooden buildings: A comprehensive analysis of low-impact construction practices. [s. l.], 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036013232400043>. Acesso em: 29 fev. 2024.

ANDERSEN, Camilla Ernst *et al.* Evaluating the environmental performance of 45 real-life wooden buildings: A comprehensive analysis of low-impact construction practices. [s. l.], 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036013232400043X>. Acesso em: 29 fev. 2024.

ANDERSEN, Julie Hansted; RASMUSSEN, Nana Lin; RYBERG, Morten Walbech. Comparative life cycle assessment of cross laminated timber building and concrete building with special focus on biogenic carbon. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 254, p. 111604, 2022.

ANDERSEN, Julie Hansted; RASMUSSEN, Nana Lin; RYBERG, Morten Walbech. Comparative life cycle assessment of cross laminated timber building and concrete

building with special focus on biogenic carbon. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 254, p. 111604, 2022.

ARAUJO, Victor *et al.* Is Cross-Laminated Timber (CLT) a Wood Panel, a Building, or a Construction System? A Systematic Review on Its Functions, Characteristics, Performances, and Applications. **Forests**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 264, 2023.

ARCHILA, Hector *et al.* Bamboo reinforced concrete: a critical review. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 51, n. 4, p. 102, 2018.

ASA, Pelin *et al.* Embraced Wood: Circular construction method for composite long-span beams from unprocessed reclaimed timber, fibers and clay. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 416, p. 135096, 2024.

AUWALU, Faisal Koko; PANSHAK DAKUR DICKSON. Bamboo as a Sustainable Material for Building Construction in Nigeria. **Civil and Environmental Research**, [s. l.], 2019. Disponível em: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/CER/article/view/49420>. Acesso em: 9 mar. 2024.

BARAÑANO, Leire *et al.* Towards the implementation of forest-based bioeconomy in the Basque Country. **EFB Bioeconomy Journal**, [s. l.], v. 2, p. 100040, 2022.

BARBHUIYA, Salim; BHUSAN DAS, Bibhuti; KANAVARIS, Fragkoulis. Biochar-concrete: A comprehensive review of properties, production and sustainability. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 20, p. e02859, 2024.

BARBHUIYA, Salim; DAS, Bibhuti Bhusan. Life Cycle Assessment of construction materials: Methodologies, applications and future directions for sustainable decision-making. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 19, p. e02326, 2023.

BEN-ALON, L. *et al.* Life cycle assessment (LCA) of natural vs conventional building assemblies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 144, p. 110951, 2021.

BEN-ALON, L. *et al.* Life cycle assessment (LCA) of natural vs conventional building assemblies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 144, p. 110951, 2021.

BHERWANI, Hemant *et al.* Application of circular economy framework for reducing the impacts of climate change: A case study from India on the evaluation of carbon and materials footprint nexus. **Energy Nexus**, [s. l.], v. 5, p. 100047, 2022.

BJÅNESØY, Stavroula *et al.* Carbon storage in the built environment: a review. **Environmental Research: Infrastructure and Sustainability**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 042003, 2023.

BOOTH, Andrew; SUTTON, Anthea; PAPAIOANNOU, Diana. **Systematic Approaches to a Successful Literature Review**. [S. l.]: Sage, 2016.

BOVEA, M. D.; IBÁÑEZ-FORÉS, V.; AGUSTÍ-JUAN, I. Environmental product declaration (EPD) labelling of construction and building materials. **Eco-efficient Construction and Building Materials**, p. 125–150, 2014.

BUI, Thao T.P. *et al.* Decision making in reducing carbon emissions for building refurbishment: Case studies of university buildings in New Zealand. **Building and Environment**, [s. l.], v. 242, p. 110557, 2023.

CABEZA, Luisa F. *et al.* Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 29, p. 394–416, 2014.

CABRAL, Carla Priscilla Távora *et al.* Propriedades de chapas tipo OSB, fabricadas com partículas acetiladas de madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus cloeziana* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, [s. l.], v. 30, n. 4, p. 659–667, 2006.

CADOREL, XAVIER; CRAWFORD, ROBERT. **Life cycle analysis of cross laminated timber in buildings: a review**. Austrália: [s. n.], 2018. Disponível em: <https://anzasca.net/wp-content/uploads/2019/01/13-Life-cycle-analysis-of-cross-laminated-timber-in-buildings-a-review.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2024.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Greenwashing**. MPES, 2024. Disponível em: <https://mpes.mp.br/wp-content/uploads/2024/03/GREENWASHINGV2.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2025.

KPMG. **Greenwasing é um risco: dados de qualidade são a solução**. KPMG, 2023. Disponível em: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/br/pdf/2023/12/greenwashing-risco-dados-qualidade-solucao.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2025.

CADOREL, XAVIER; CRAWFORD, ROBERT. **Life cycle analysis of cross laminated timber in buildings: a review**. Austrália: [s. n.], 2018. Disponível em: <https://anzasca.net/wp-content/uploads/2019/01/13-Life-cycle-analysis-of-cross-laminated-timber-in-buildings-a-review.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2024.

CALDAS, Lucas Rosse *et al.* How Different Tools Contribute to Climate Change Mitigation in a Circular Building Environment?—A Systematic Literature Review. **Sustainability**, [s. l.], v. 14, n. 7, p. 3759, 2022.

CANIATO, Marco *et al.* A review of the thermal and acoustic properties of materials for timber building construction. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 43, p. 103066, 2021.

CARCASSI, Olga Beatrice *et al.* Material Diets for Climate-Neutral Construction. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 56, n. 8, p. 5213–5223, 2022.

CHEN, Lin *et al.* Biomaterials technology and policies in the building sector: a review. **Environmental Chemistry Letters**, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s10311-023-01689-w>. Acesso em: 29 fev. 2024.

CHEN, Lin *et al.* Green construction for low-carbon cities: a review. **Environmental Chemistry Letters**, [s. l.], v. 21, n. 3, p. 1627–1657, 2023a.

CHEN, Lin *et al.* Green construction for low-carbon cities: a review. **Environmental Chemistry Letters**, [s. l.], v. 21, n. 3, p. 1627–1657, 2023.

CHEN, Lin *et al.* Recent developments on natural fiber concrete: A review of properties, sustainability, applications, barriers, and opportunities. **Developments in the Built Environment**, [s. l.], v. 16, p. 100255, 2023b.

CHEONG, Chi Yan *et al.* Life cycle assessment of curtain wall facades: A screening study on end-of-life scenarios. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 84, p. 108600, 2024.

CHUNG, Min-Jay; WANG, Sheng-Yang. Mechanical properties of oriented bamboo scrimber boards made of *Phyllostachys pubescens* (moso bamboo) from Taiwan and China as a function of density. **Holzforschung**, [s. l.], v. 72, n. 2, p. 151–158, 2018.

CONCEIÇÃO, Marcela Cardoso Guilles *et al.* International climate change negotiation: the role of Brazil. **Sustentabilidade em Debate**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 379–395, 2019.

CRAFFORD, Philip L.; WESSELS, C. Brand; BLUMENTRITT, Melanie. Sustainability and wood constructions: a review of green building rating systems and life-cycle assessment methods from a South African and developing world perspective. **Advances in Building Energy Research**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 67–86, 2021.

DAS, Arghya; SARKAR, Saikat. Importance of Bamboo in Building Construction. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, [s. l.], v. 5, n. 6, p. 389–392, 2018.

DAULETBEK, Assima *et al.* A Review of Basic Mechanical Behavior of Laminated Bamboo Lumber. **Journal of Renewable Materials**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 273–300, 2022.

DEL BORGHI, A. LCA and communication: Environmental Product Declaration. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 2, p. 293–295, 10 out. 2012.

DSILVA, Jacinta; ZARMUKHAMBETOVA, Saniya; LOCKE, Jasmina. Assessment of building materials in the construction sector: A case study using life cycle assessment approach to achieve the circular economy. **Heliyon**, [s. l.], v. 9, n. 10, p. e20404, 2023.

ENGBERG-PEDERSEN, Lars. **Climate change negotiations and their implications for international development cooperation**. [S. l.]: DIIS . DANISH INSTITUTE FOR INTERNATIONAL STUDIES, 2011. Disponível em: https://pure.diis.dk/ws/files/61183/RP2011_07_Climate_change_web.pdf. Acesso em: 9 fev. 2024.

ESLAMI, Hooman *et al.* Comparative life cycle assessment of light frame timber and reinforced concrete masonry structural systems for single-family houses in Luxembourg. **Heliyon**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. e26083, 2024.

ESPINOZA, Omar; BUEHLMANN, Urs. Cross-Laminated Timber in the USA: Opportunity for Hardwoods?. **Current Forestry Reports**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 1–12, 2018.

ESPINOZA, Omar; BUEHLMANN, Urs. Cross-Laminated Timber in the USA: Opportunity for Hardwoods?. **Current Forestry Reports**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 1–12, 2018.

FELICIONI, Licia *et al.* A comparative cradle-to-grave life cycle approach for addressing construction design choices: An applicative case study for a residential tower in Aalborg, Denmark. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 298, p. 113557, 2023.

FREITAS, Lucas Cantão *et al.* From waste to sustainable industry: How can agro-industrial wastes help in the development of new products?. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 169, p. 105466, 2021.

GAN, Vincent J.L.; CHENG, Jack C.P.; LO, Irene M.C. A comprehensive approach to mitigation of embodied carbon in reinforced concrete buildings. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 229, p. 582–597, 2019.

GARCÍA-PEÑALVO, Francisco José. Desarrollo de estados de la cuestión robustos: Revisiones Sistemáticas de Literatura. **Education in the Knowledge Society (EKS)**, [s. l.], v. 23, p. e28600, 2022.

GAUCH, H.L. *et al.* What really matters in multi-storey building design? A simultaneous sensitivity study of embodied carbon, construction cost, and operational energy. **Applied Energy**, [s. l.], v. 333, p. 120585, 2023.

GAUCH, H.L. *et al.* What really matters in multi-storey building design? A simultaneous sensitivity study of embodied carbon, construction cost, and operational energy. **Applied Energy**, [s. l.], v. 333, p. 120585, 2023.

GOH, Yingxin; YAP, Soon P.; TONG, Teong Y. Bamboo: The Emerging Renewable Material for Sustainable Construction. *In: ENCYCLOPEDIA OF RENEWABLE AND SUSTAINABLE MATERIALS*. [S. l.]: Elsevier, 2020. p. 365–376. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128035818107489>. Acesso em: 9 mar. 2024.

GONZÁLEZ-RETAMAL, Marcelo *et al.* From Trees to Skyscrapers: Holistic Review of the Advances and Limitations of Multi-Storey Timber Buildings. **Buildings**, [s. l.], v. 12, n. 8, p. 1263, 2022.

GÖSWEIN, Verena *et al.* Influence of material choice, renovation rate, and electricity grid to achieve a Paris Agreement-compatible building stock: A Portuguese case study. **Building and Environment**, [s. l.], v. 195, p. 107773, 2021.

GYONGYOSI, Laszlo; IMRE, Sandor. A Survey on quantum computing technology. **Computer Science Review**, [s. l.], v. 31, p. 51–71, 2019.

HANSEN, Rasmus Nøddegaard *et al.* Environmental consequences of shifting to timber construction: The case of Denmark. **Sustainable Production and Consumption**, [s. l.], v. 46, p. 54–67, 2024.

HART, Jim; POMPONI, Francesco. More Timber in Construction: Unanswered Questions and Future Challenges. **Sustainability**, [s. l.], v. 12, n. 8, p. 3473, 2020.

HASSAN, Osama A.B.; ÖBERG, Fredrik; GEZELIUS, Emil. Cross-laminated timber flooring and concrete slab flooring: A comparative study of structural design, economic and environmental consequences. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 26, p. 100881, 2019.

HONG, Sarah J.; AREHART, Jay H.; SRUBAR, Wil V. Embodied and Operational Energy Analysis of Passive House-Inspired High-Performance Residential Building Envelopes. **Journal of Architectural Engineering**, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 04020010, 2020.

HOXHA, Endrit *et al.* Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods. **Buildings and Cities**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 504–524, 2020.

HOXHA, Endrit *et al.* Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods. **Buildings and Cities**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 504–524, 2020.

HU, Yuan *et al.* Manufacturing and Characterization of Wide-Bundle Bamboo Scrimber: A Comparison with Other Engineered Bamboo Composites. **Materials**, [s. l.], v. 15, n. 21, p. 7518, 2022.

IEA. **Energy consumption in buildings by fuel in the Net Zero Scenario, 2010-2030**. [S. l.], 2023a. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/energy-consumption-in-buildings-by-fuel-in-the-net-zero-scenario-2010-2030-2>. Acesso em: 1 mar. 2024.

IEA. **Global CO2 emissions from the operation of buildings in the Net Zero Scenario, 2010-2030**. [S. l.], 2023b. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-from-the-operation-of-buildings-in-the-net-zero-scenario-2010-2030>. Acesso em: 1 mar. 2024.

JACKSON, Raquel. Recent Developments in Timber Design & Its Impact on Carbon Emissions. **Spectra Undergraduate Research Journal**, [s. l.], v. 3, n. 1, 2023. Disponível em: <https://digitalscholarship.unlv.edu/spectra/vol3/iss1/4>. Acesso em: 29 fev. 2024.

JARAMILLO, Haidee Yulady *et al.* Biomaterials in Concrete for Engineering Applications: A Bibliometric Review. **Infrastructures**, [s. l.], v. 8, n. 11, p. 161, 2023.

JESWANI, Harish Kumar; SAHARUDIN, Djasmine Mastisya; AZAPAGIC, Adisa. Environmental sustainability of negative emissions technologies: A review. **Sustainable Production and Consumption**, [s. l.], v. 33, p. 608–635, 2022.

Karampour, H., et al. (2020). Environmental impacts of cross-laminated timber (CLT): A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 133, 110236.

KARLSSON, Ida *et al.* Achieving net-zero carbon emissions in construction supply chains – A multidimensional analysis of residential building systems. **Developments in the Built Environment**, [s. l.], v. 8, p. 100059, 2021.

KARLSSON, Ida *et al.* Achieving net-zero carbon emissions in construction supply chains – A multidimensional analysis of residential building systems. **Developments in the Built Environment**, [s. l.], v. 8, p. 100059, 2021.

KAVITHA, SAJJALA. Effectiveness of bamboo fiber as an strength enhancer in concrete. **International journal of earth science and engineering**, [s. l.], v. 9, p. 192–196, 2016.

KEENA, Naomi; DUWYN, Jonathan; DYSON, Anna. **Biomaterials supporting the transition to a circular built environment in the global south**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://cdn.filepicker.io/api/file/9gIwl5XeSyi7BmJd0l4T?&fit=max>. Acesso em: 13 mar. 2024.

KHAJOU EI-NEZHAD, Mohammad *et al.* Advances in engineered bamboo processing: Material conversion and structure. **Advances in Bamboo Science**, [s. l.], v. 5, p. 100045, 2023.

LI, Zheng *et al.* Modern timber construction technology and engineering applications in China. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering**, [s. l.], v. 172, n. 5, p. 17–27, 2019.

LIANG, Yumin *et al.* Decarbonization potentials of the embodied energy use and operational process in buildings: A review from the life-cycle perspective. **Heliyon**, [s. l.], v. 9, n. 10, p. e20190, 2023.

LIANG, Yumin *et al.* Decarbonization potentials of the embodied energy use and operational process in buildings: A review from the life-cycle perspective. **Heliyon**, [s. l.], v. 9, n. 10, p. e20190, 2023.

LIU, Tianqi *et al.* Sustainability Considerations of Green Buildings: A Detailed Overview on Current Advancements and Future Considerations. **Sustainability**, [s. l.], v. 14, n. 21, p. 14393, 2022.

LOPES JUNIOR, Wanley Eduardo. **Estudo da durabilidade de painéis OSB de madeira Balsa residual com revestimento químico e natural**. 2020. Dissertação - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

MADHUSHAN, Sumeera *et al.* Uses of Bamboo for Sustainable Construction—A Structural and Durability Perspective—A Review. **Sustainability**, [s. l.], v. 15, n. 14, p. 11137, 2023.

MAGWOOD, Chris; TROTTIER, Mélanie. **Material Emissions Benchmark Report for Part 9 Homes in Vancouver**. Vancouver (Canadá): Builders for Climate Action, 2022.

MARTINEZ-GIL, Jorge; CHAVES-GONZALEZ, Jose Manuel. Semantic similarity controllers: On the trade-off between accuracy and interpretability. **Knowledge-Based Systems**, [s. l.], v. 234, p. 107609, 2021.

MATRICARDI, Eraldo Aparecido Trondoli *et al.* Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon. **Science**, [s. l.], v. 369, n. 6509, p. 1378–1382, 2020.

MAXIMO, Yasmin Imparato *et al.* Forest Bioeconomy in Brazil: Potential Innovative Products from the Forest Sector. **Land**, [s. l.], v. 11, n. 8, p. 1297, 2022.

MCLAUGHLIN, Hope *et al.* Carbon capture utilization and storage in review: Sociotechnical implications for a carbon reliant world. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 177, p. 113215, 2023.

MELO, Pedro Correa de; CALDAS, Lucas Rosse; MASERA, Gabriele; PITTAU, Francesco. *The potential of carbon storage in bio-based solutions to mitigate the climate impact of social housing development in Brazil*. **Journal of Cleaner Production**, v. 433, 139862, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139862>.

MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT; MANATŪ MŌ TE TĀIAO. **Towards a productive, sustainable and inclusive economy**. Nova Zelândia: Ministry for the Environment, 2022. Disponível em: <https://environment.govt.nz/assets/publications/Aotearoa-New-Zealands-first-emissions-reduction-plan.pdf>. Acesso em: 9 fev. 2024.

MUKKAVAARA, Jani *et al.* Sustainability evaluation of timber dwellings in the north of Sweden based on environmental impact and optimization of energy and cost. **Procedia Manufacturing**, [s. l.], v. 44, p. 76–83, 2020.

MUKKAVAARA, Jani *et al.* Sustainability evaluation of timber dwellings in the north of Sweden based on environmental impact and optimization of energy and cost. **Procedia Manufacturing**, [s. l.], v. 44, p. 76–83, 2020.

NAWAB, Mian Syed *et al.* A study on improving the performance of cement-based mortar with silica fume, metakaolin, and coconut fibers. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 19, p. e02480, 2023.

NEW BUILDING INSTITUTITE. **Embodied Carbon**. [s. l.], 2022. Disponível em: https://newbuildings.org/code_policy/embodied-carbon/. Acesso em: 1 mar. 2024.

NEWBERRY, Pablo; HARPER, Paul; NORMAN, James. Carbon assessment of building shell options for eco self-build community housing through the integration of building energy modelling and life cycle analysis tools. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 70, p. 106356, 2023.

NOGUEIRA, Davi. A versatilidade da madeira laminada colada. **Construindo**, [s. l.], v. 9, n. 1, 2017. Disponível em: <http://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/5462>. Acesso em: 1 abr. 2024.

OBRECHT, Tajda Potrč *et al.* An LCA methodology for assessing the environmental impacts of building components before and after refurbishment. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 327, p. 129527, 2021.

ODEY, Golden *et al.* Status of Environmental Life Cycle Assessment (LCA): A Case Study of South Korea. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 11, p. 6234, 2021.

OLIVEIRA, Stefânia Lima de. **Interação Da Espécie De Madeira E Do Tipo De Adesivo Na Qualidade Da Madeira Laminada Colada**. 2016. Tese - Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2016. Disponível em: [http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/10981/2/TESE_Intera%C3%A7%C3%A3o%20da%20esp%C3%A9cie%20de%20madeira%20e%20do%20tipo%20de%20adesivo%](http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/10981/2/TESE_Intera%C3%A7%C3%A3o%20da%20esp%C3%A9cie%20de%20madeira%20e%20do%20tipo%20de%20adesivo%20)

20na%20qualidade%20da%20madeira%20laminada%20colada.pdf. Acesso em: 1 abr. 2024.

PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J.A. Biotechnologies and bioinspired materials for the construction industry: an overview. **International Journal of Sustainable Engineering**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 235–244, 2014.

PAGE, Matthew J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **Systematic Reviews**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 89, 2021.

PAGE, Matthew J.; MOHER, David; MCKENZIE, Joanne E. Introduction to PRISMA 2020 and implications for research synthesis methodologists. **Research Synthesis Methods**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 156–163, 2022.

PATIL, Shweta; MUTKEKAR, Shruti. Bamboo as a Cost Effective Building Material for Rural Construction. **Journal of Civil Engineering and Environmental Technology**, [s. l.], v. 1, n. 6, p. 35–40, 2014.

PIRES, Rui Pedro Oliveira. **Análise de diferentes sistemas de cofragem para realização de edifícios com estrutura parede**. 2015. 90 f. Dissertação - Universidade do Porto, Portugal, 2015. Disponível em: https://sigarra.up.pt/fcnaup/pt/pub_geral.pub_view?pi_pub_base_id=36244. Acesso em: 1 abr. 2024.

POWER, Jason R. Enhancing engineering education through the integration of Open Science principles: A strategic approach to systematic reviews. **Journal of Engineering Education**, [s. l.], v. 110, n. 3, p. 509–514, 2021.

QUINTANA-GALLARDO, Alberto *et al.* Comparing the environmental impacts of wooden buildings in Spain, Slovenia, and Germany. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 329, p. 129587, 2021.

QUINTANA-GALLARDO, Alberto *et al.* Comparing the environmental impacts of wooden buildings in Spain, Slovenia, and Germany. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 329, p. 129587, 2021.

RAHLA, Kamel Mohamed; MATEUS, Ricardo; BRAGANÇA, Luís. Selection Criteria for Building Materials and Components in Line with the Circular Economy Principles in the Built Environment—A Review of Current Trends. **Infrastructures**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 49, 2021.

RAHMAN, Nabihah *et al.* Enhanced bamboo composite with protective coating for structural concrete application. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 143, p. 167–172, 2017.

RAMAGE, Michael H. *et al.* The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 68, p. 333–359, 2017.

RIPPLE, William J *et al.* World Scientists' Warning of a Climate Emergency. **BioScience**, [s. l.], p. biz088, 2019.

RUTA, Matteo Francesco; PITTAU, Francesco; MASERA, Gabriele. Towards Zero-Carbon Buildings: Challenges and Opportunities from Reversing the Material Pyramid. *Sustainability*, [s. l.], v. 16, n. 11, p. 4454, 2024.

SANDAK, Anna *et al.* Biomaterials for Building Skins. In: SANDAK, Anna *et al.* **Bio-based Building Skin**. Singapore: Springer Singapore, 2019. (Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes). p. 27–64. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-981-13-3747-5_2. Acesso em: 18 mar. 2024.

SANTOS, Paulo *et al.* Circular Material Usage Strategies and Principles in Buildings: A Review. *Buildings*, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 281, 2024.

SAYED, Usama *et al.* A Review on the Mechanical Behaviour of Bamboo Reinforced Concrete Beams. *Journal of Renewable Materials*, [s. l.], v. 10, n. 12, p. 3629–3657, 2022.

SERRANO, Teddy; KAMPMANN, Thomas; RYBERG, Morten W. Comparative Life-Cycle Assessment of restoration and renovation of a traditional Danish farmer house. *Building and Environment*, [s. l.], v. 219, p. 109174, 2022.

SERRANO, Teddy; KAMPMANN, Thomas; RYBERG, Morten W. Comparative Life-Cycle Assessment of restoration and renovation of a traditional Danish farmer house. *Building and Environment*, [s. l.], v. 219, p. 109174, 2022.

SETSUO, Iwakiri *et al.* Utilização da madeira de eucalipto na produção de chapas de partículas orientadas OSB. *CERNE*, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 46–52, 2004.

SHEN, Liyin *et al.* The Benefits and Barriers for Promoting Bamboo as a Green Building Material in China—An Integrative Analysis. *Sustainability*, [s. l.], v. 11, n. 9, p. 2493, 2019.

SIENNA, Healy *et al.* **International Climate Negotiations**. [S. l.]: European Parliament, 2023. Disponível em: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2023/754191/IPOL_STU\(2023\)754191_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2023/754191/IPOL_STU(2023)754191_EN.pdf). Acesso em: 18 fev. 2024.

SOUAID, Cynthia *et al.* Downsizing and the use of timber as embodied carbon reduction strategies for new-build housing: A partial life cycle assessment. *Building and Environment*, [s. l.], v. 253, p. 111285, 2024.

SOUZA, Clara Gaspar Fossi de. **Avaliação física e mecânica da madeira lamelada colada (MLC) de eucalipto utilizando adesivo poliuretano submetida ao intemperismo acelerado e aos organismos xilófagos**. 2021. Monografia - Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2021. Disponível em: https://florestaemadeira.ufes.br/sites/florestaemadeira.ufes.br/files/field/anexo/tcc_clara_gaspar_f_souza.pdf. Acesso em: 1 abr. 2024.

STIRLING, Rod *et al.* Field Performance of Glued Laminated Timber (Glulam) Manufactured from Thin Treated Lamina. *Forest Products Journal*, [s. l.], v. 72, n. 1, p. 29–36, 2022.

STRAZZA, C. et al. Using environmental product declaration as source of data for life cycle assessment: a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 333–342, jan. 2016.

SZALAY, Zsuzsa *et al.* Development of a life cycle net zero carbon compact house concept. **Energy Reports**, [s. l.], v. 8, p. 12987–13013, 2022.

TESFAMARIAM, S. Performance-Based Design of Tall Timber Buildings Under Earthquake and Wind Multi-Hazard Loads: Past, Present, and Future. **Frontiers in Built Environment**, [s. l.], v. 8, p. 848698, 2022.

TIZA, Toryila Michael *et al.* Assessing the potentials of Bamboo and sheep wool fiber as sustainable construction materials: A review. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 47, p. 4484–4489, 2021.

TRIFU, Alina *et al.* Applying the PRISMA method for obtaining systematic reviews of occupational safety issues in literature search. **MATEC Web of Conferences**, [s. l.], v. 354, p. 00052, 2022.

TUPENAITE, Laura *et al.* Timber Construction as a Solution to Climate Change: A Systematic Literature Review. **Buildings**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 976, 2023.

UNCE. **Circularity concepts in wood construction**. [S. l.]: Committee on Forests and the Forest Industry, 2022. Disponível em: https://unece.org/sites/default/files/2022-10/ECE_TIM_2022_Inf.3_2.pdf. Acesso em: 11 mar. 2024.

VAGTHOLM, Rune *et al.* Evolution and Current State of Building Materials, Construction Methods, and Building Regulations in the U.K.: Implications for Sustainable Building Practices. **Buildings**, [s. l.], v. 13, n. 6, p. 1480, 2023.

WOODARD, A.C.; MILNER, H.R. Sustainability of timber and wood in construction. *In*: SUSTAINABILITY OF CONSTRUCTION MATERIALS. [S. l.]: Elsevier, 2016. p. 129–157. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978008100370100007X>. Acesso em: 3 abr. 2024.

XUE, Xin *et al.* Design and construction of “Bamboo Cubic” facade with laminated bamboo lumber. **Sustainable Structures**, [s. l.], v. 3, n. 2, 2023. Disponível em: <http://www.sustain-dpl.com/UploadFile/article/202306041117297190.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2024.

YANG, Mingyu *et al.* Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues. **Environmental Chemistry Letters**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 55–80, 2023.

YOUNIS, Adel; DODOO, Ambrose. Cross-laminated timber for building construction: A life-cycle-assessment overview. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 52, p. 104482, 2022.

APÊNDICE A - EPDS SELECIONADAS NAS BASES INTERNACIONAIS

EPD (referência)	Material	Categoria	Região de uso
EPD-IES-0008942:003 (S-P-08942)	Tijolo	Material substituível	Global
EPD-IES-0000750:002 (S-P-00750)	Tijolo	Material substituível	Global
EPD-IES-0007558:002 (S-P-07558)	Tijolo	Material substituível	Global
EPD-IES-0008948:002 (S-P-08948)	Telhas	Material substituível	Global
EPD-IES-0007781:001 (S-P-07781)	Concreto	Material substituível	Brasil
EPD-IES-0006335:001 (S-P-06335)	Concreto	Material substituível	Brasil
EPD-IES-0006334:001 (S-P-06334)	Concreto	Material substituível	Brasil
EPD-IES-0000895:001 (S-P-00895)	Cimento	Material substituível	Brasil
EPD-IES-0006332:001 (S-P-06332)	Cimento	Material substituível	Brasil
EPD-IES-0001123:001 (S-P-01123)	Cimento	Material substituível	Brasil
EPD-IES-0015527:001	Brita	Material substituível	Grécia
EPD-IES-0015529:001	Brita	Material substituível	Grécia
EPD-IES-0013340:002 (S-P-13340)	Bloco concreto	Material substituível	Global
MD 23058 EN (EN15804+A2)	Bloco concreto	Material substituível	Dinamarca
EPD-IES-0012715:002 (S-P-12715)	Areia	Material substituível	Brasil
EPD-IES-0012714:002 (S-P-12714)	Areia	Material substituível	Brasil
EPD-IES-0001314:002 (S-P-01314)	CLT	Material substituto	Global
EPD-IES-0009949:003 (S-P-09949)	CLT	Material substituto	Europa
EPD-IES-0014254:001	CLT	Material substituto	Europa
EPD-IES-0004195:003 (S-P-04195)	CLT	Material substituto	Europa
EPD-IES-0015902:001	GLT	Material substituto	Nova Zelândia
EPD-IES-0015672:001	Compensado	Material não substituível	Indonésia
EPD-IES-0013559:001 (S-P-13559)	Compensado	Material não substituível	Brasil
EPD-IES-0016066:001	Compensado	Material não substituível	Global

EPD (referência)	Material	Categoria	Região de uso
EPD-IES-0006919:001 (S-P-06919)	Compensado	Material não substituível	Brasil
EPD-IES-0002388:002 (S-P-02388)	Vergalhão	Material não substituível	Reino Unido
EPD-IES-0015618:001	Vergalhão	Material não substituível	Global
EPD-IES-0015614:001	Vergalhão	Material não substituível	Global
EPD-IES-0016101:001	Porta	Material não substituível	Europa
EPD-IES-0011104:002 (S-P-11104)	Porta	Material não substituível	Reino Unido
EPD-IES-0012250:001 (S-P-12250)	Porta	Material não substituível	Europa
EPD-IES-0009012:001 (S-P-09012)	Janela	Material não substituível	Global
EPD-IES-0007481:008 (S-P-07481)	Alumínio (frame)	Material não substituível	Europa
EPD-IES-0013158:001 (S-P-13158)	Alumínio (frame)	Material não substituível	Europa
EPD-IES-0013157:001 (S-P-13157)	Alumínio (frame)	Material não substituível	Europa
EPD-IES-0007031:002 (S-P-07031)	Fio cobre	Material não substituível	Europa
EPD-IES-0002032:004 (S-P-02032)	Fio cobre	Material não substituível	Global
EPD-IES-0012417:001 (S-P-12417)	Mármore	Material não substituível	Global
EPD-IES-0004699:003 (S-P-04699)	Mármore	Material não substituível	Global
EPD-IES-0008006:001 (S-P-08006)	Azulejo	Material não substituível	Global
EPD-IES-0004774:001	Placa gesso	Material não substituível	Global
EPD-IES-0016039:002	Esquadria de madeira	Material não substituível	Reino Unido
EPD-IES-0005067:002 (S-P-05067)	Tinta	Material não substituível	Global
EPD-IES-0009869:002 (S-P-09869)	Massa acrílica	Material não substituível	Omã
EPD-IES-0011021:003 (S-P-11021)	Verniz	Material não substituível	Europa

APÊNDICE B - VALORES DE IMPACTO POR QUILOGRAMA (KG) DE MATERIAL PRODUZIDO CONSIDERANDO AS FASES A (A1-A3) E C (C1-C4) (PRODUÇÃO, DESCARTE E REUSO) DISPONÍVEL NA BASE INTERNACIONAL

Material	Fóssil (kg CO2 eq.) A1-A3	Fóssil (kg CO2 eq.) C1-C4	Fóssil (kg CO2 eq.) A-C
Tijolo	0,15	0,01	0,16
Telhas	0,25	0,01	0,26
Concreto	0,13	0,00	0,13
Cimento	0,68	0,00	0,68
Brita	0,004	0,001	0,005
Bloco concreto	0,32	0,04	0,36
Areia	0,02	0,00	0,02
CLT	0,31	0,02	0,33
GLT	0,45	0,06	0,51
Compensado	0,93	0,15	1,08
Vergalhão	0,49	0,01	0,50
Porta	1,90	0,19	2,09
Janela	2,41	0,02	2,43
Alumínio (frame)	5,96	0,02	5,98
Fio cobre	2,31	0,02	2,33
Mármore	0,41	0,01	0,42
Azulejo	0,93	0,03	0,96
Placa gesso	0,23	0,03	0,26
Barreira de vapor	0,74	1,19	1,93
Esquadria de madeira	0,42	0,03	0,45
Isolamento Térmico e acústico	1,20	0,00	1,20
Tinta	0,69	0,00	0,69
Massa acrílica	0,71	0,00	0,71
Verniz	1,40	0,00	1,40
Material	Biogênico (kg CO2 eq.) A1-A3	Biogênico (kg CO2 eq.) C1-C4	Biogênico (kg CO2 eq.) A-C
Tijolo	0,00	0,00	0,00
Telhas	0,00	0,00	0,00

Concreto	0,00	0,00	0,00
Cimento	0,00	0,00	0,00
Brita	0,00	0,00	0,00
Bloco concreto	0,00	0,00	0,00
Areia	-1,62	0,00	0,00
CLT	-1,92	0,00	-1,62
GLT	-1,55	-0,15	-2,07
Compensado	0,00	-0,09	-1,64
Vergalhão	-0,91	0,00	0,00
Porta	0,01	-0,04	-0,95
Janela	0,02	-0,01	0,00
Alumínio (frame)	0,01	-0,02	0,00
Fio cobre	0,01	-0,01	0,00
Mármore	0,01	-0,01	0,00
Azulejo	0,00	-0,01	0,00
Placa gesso	0,00	0,00	0,00
Barreira de Vapor	-1,37	0,00	0,00
Esquadria de madeira	-0,01	1,37	0,00
Isolamento térmico e acústico	0,00	0,00	0,00
Tinta	0,00	0,12	0,00
Massa acrílica	0,00	0,00	0,00
Verniz	0,00	0,00	0,00
Material	LULUC (kg CO2 eq.) A1-A3	LULUC (kg CO2 eq.) C1-C4	LULUC (kg CO2 eq.) A-C
Tijolo	0,00	0,00	0,00
Telhas	0,00	0,00	0,00
Concreto	0,00	0,00	0,00
Cimento	0,00	0,00	0,00
Brita	0,00	0,00	0,00
Bloco concreto	0,00	0,00	0,00
Areia	0,00	0,00	0,00
CLT	0,00	0,00	0,00
GLT	0,00	0,00	0,00
Compensado	0,00	0,00	0,00
Vergalhão	0,00	0,00	0,00
Porta	0,04	0,00	0,04
Janela	0,00	0,00	0,00
Alumínio (frame)	0,03	0,00	0,03
Fio cobre	0,01	0,00	0,01
Mármore	0,00	0,00	0,00
Azulejo	0,00	0,00	0,00
Placa gesso	0,00	0,00	0,00
Barreira vapor	0,00	0,00	0,00
Esquadria de mateira	0,00	0,00	0,00

Isolamento térmico e acústico	0,00	0,00	0,00
Tinta	0,00	0,00	0,00
Massa acrílica	0,01	0,00	0,01
Verniz	0,00	0,00	0,00
Material	Energia (MJ) A1-A3	Energia (MJ) C1-C4	Energia (MJ) A-C
Tijolo	2,20	0,16	2,36
Telhas	3,72	0,16	3,88
Concreto	0,72	0,27	0,99
Cimento	1,38	0,00	1,38
Brita	0,63	0,21	0,84
Bloco concreto	2,39	0,26	2,65
Areia	0,26	0,00	0,26
CLT	4,27	0,12	4,39
GLT	3,18	0,45	3,63
Compensado	13,99	1,12	15,11
Vergalhão	8,39	0,14	8,53
Porta	26,00	-1,34	24,66
Janela	31,49	0,30	31,79
Alumínio (frame)	35,01	0,37	35,38
Fio cobre	56,50	2,88	59,38
Mármore	6,01	0,63	6,64
Azulejo	13,31	0,36	13,67
Placa gesso	0,00	2,04	2,04
Barreira de vapor	30,17	1,23	31,40
Esquadria de madeira	7,20	-0,39	6,81
Isolamento térmico e acústico	3,35	0,02	3,37
Tinta	11,90	0,00	11,90
Massa acrílica	11,34	0,00	11,34
Verniz	2,60	0,00	2,60
Material	Água Potável (M3) A1-A3	Água Potável (M3) C1-C4	Água Potável (M3) A-C
Tijolo	0,27	0,00	0,27
Telhas	0,25	0,00	0,25
Concreto	2,71	0,45	3,16
Cimento	4,71	0,00	4,71
Brita	2,48	0,29	2,77
Bloco concreto	27,98	0,03	28,01
Areia	1,01	0,00	1,01
CLT	1,13	0,04	1,17
GLT	2,70	0,19	2,89
Compensado	6,09	0,33	6,42
Vergalhão	3,13	0,00	3,13
Porta	0,69	0,20	0,89

Janela	0,75	0,01	0,76
Alumínio (frame)	0,36	0,00	0,36
Fio cobre	1,61	0,00	1,61
Mármore	3,69	0,00	3,69
Azulejo	0,08	0,00	0,08
Placa gesso	0,04	0,00	0,04
Barreira de vapor	0,02	0,00	0,02
Esquadria de madeira	2,29	0,23	2,52
Isolamento térmico e acústico	0,02	0,00	0,02
Tinta	0,20	0,00	0,20
Massa acrílica	0,01	0,00	0,01
Verniz	0,10	0,00	0,10