Ministério da Educação
Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura
Engenharia Civil de Infraestrutura

Avaliação da Pegada de Carbono de uma edificação em Madeira Lamelada Colada Cruzada. Estudo de Caso em Módulo de sala de aula no Estado do Paraná

ANDREY FELIPE DE MATOS

Foz do Iguaçu, PR
2025

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Ministério da Educação
Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura
Engenharia Civil de Infraestrutura

Avaliação da Pegada de Carbono de uma edificação em Madeira Lamelada Colada Cruzada. Estudo de Caso em Módulo de sala de aula no Estado do Paraná

ANDREY FELIPE DE MATOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Banca Examinadora do Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura da UNILA, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Orientadora: Profª. Drª. Katia Regina Garcia Punhagui

Coorientadora: Profª. Ma. Karine Hilgenberg Martins

Foz do Iguaçu, PR
Dezembro de 2025

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

ANDREY FELIPE DE MATOS

Avaliação da Pegada de Carbono de uma edificação em Madeira Lamelada Colada Cruzada. Estudo de Caso em Módulo de sala de aula no Estado do Paraná

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Banca Examinadora do Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura da UNILA, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

BANCA EXAMINADORA

_____

Orientadora: Profª. Drª. Katia Regina Garcia Punhagui

UNILA

_____

Coorientadora: Profª. Ma. Karine Hilgenberg Martins

_____

Profº. Drº. César Winter de Mello

UNILA

_____

Profª. Drª. Juliana Bello Mussi Alencar

UNILA

Foz do Iguaçu, 2025.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Dedico este trabalho a Deus e a minha família.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ser meu guia e fiel amigo, pela sua infinita graça e misericórdia, que me guiaram e me trouxeram até aqui.

Agradeço aos meus pais, João e Belirdes, meus irmãos Allan e Lucas e minhas cunhadas, Teomara e Camila, por todo sacrifício feito, por todo o trabalho árduo para garantir o sustento de nossa família, por todas as noites em claro, pelo auxílio, cuidado, apoio e amor incondicional depositados em mim, por serem meu referencial de caráter e fé, e serem minhas fundações a partir das quais pude crescer e me desenvolver. Sem vocês eu não teria alcançado tudo que consegui, e com grande alegria dedico este trabalho a Deus e a vocês.

Ao corpo docente do curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, por todo ensinamento e conhecimento transmitidos a mim e, em especial, às minhas orientadoras, Dra. Katia Punhagui e Ma. Karine Hilgenberg, que me auxiliaram, corrigiram e me guiaram ao rumo que este trabalho tomou. Trabalhar com as senhoras foi uma oportunidade única e fenomenal.

À empresa que me forneceu as imagens e dados utilizados neste trabalho, bem como aos seus funcionários, Chirle, Kellen e Ricardo, pelo auxílio e incentivo constantes.

Aos meus amigos, Alejandra, Alexssanda, Aline, André, Andrés, Fabio, Kaue, Luciano, Márcia Medeiros, Maria, Milena Fernandes, Milena Lopes, Ornela, Paulo, Thalia, Thandara, Thiago, Valentina, Victória e Vinícius. Sem a amizade de vocês, suporte e apoio, o caminho até aqui teria sido muito mais difícil e, definitivamente, com muito menos risadas. Cada momento com vocês é uma dádiva. A Palavra de Deus nos fala que existem amigos mais chegados que irmãos e, olhando para a amizade de vocês, posso garantir que Deus me deu muitos irmãos nesta terra.

Agradeço também aos amigos e pessoas que, durante este período de graduação, se foram, seguiram outro caminho ou descansam nos braços do Pai, em especial, à minha avó Maria Otavia, à minha nona Rutides de Favero e à minha grande mestra, professora Tania Benther.

Ao olhar para todo o trajeto percorrido até aqui, reconheço que não seria possível alcançar este objetivo sem o apoio, as amizades, e os esforços constantes de cada um de vocês. Agradeço de coração a todos que contribuíram para que este sonho se concretizasse.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Regi autem saeculorum immortali, invisibili,
soli Deo honor et gloria in saecula saeculorum. Amen.

1 Tm 1:17

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

RESUMO

O setor da construção civil responde por parcela significativa das emissões globais de gases de efeito estufa, sobretudo pelo uso intensivo de concreto e aço. Como alternativa, sistemas em madeira engenheirada, como a Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), apresentam potencial para reduzir a pegada de carbono das edificações. Este trabalho avalia a pegada de carbono de um módulo unitário de sala de aula em MLCC no estado do Paraná, identifica os elementos construtivos mais contribuintes para as emissões médias totais e discute possibilidades de mitigação. Trata-se de um estudo de caso baseado no quantitativo de materiais fornecido pela empresa responsável pelo projeto. Os fatores de emissão foram obtidos no Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac) e em Declarações Ambientais de Produto internacionais, considerando o potencial de aquecimento global de origem fóssil nos módulos A1–A3 da Avaliação do Ciclo de Vida. Os dados do Sidac, originalmente em CO_2, foram convertidos para CO_{2eq} com apoio do banco Ecoinvent, e, quando necessário, as unidades funcionais foram harmonizadas, garantindo compatibilidade entre o quantitativo e as fontes de dados dos fatores de emissão. As emissões totais do módulo variaram de 10479,91 a 19396,77 $kgCO_{2eq}$, com valor médio de 14938,34 $kgCO_{2eq}$, correspondendo a um fator de emissão médio de 293,02 $kgCO_{2eq}/m^2$ para a edificação. A análise pela curva ABC mostrou que sete elementos concentram 79,06% das emissões médias, com destaque para o concreto da fundação, as telhas com núcleo de poliisocianurato e o MLCC estrutural. O concreto permanece como principal contribuinte devido ao elevado volume empregado, e maiores fatores de emissão por unidade de volume, enquanto o MLCC apresenta menores emissões associadas por unidade de volume, reforçando o seu potencial de substituir sistemas convencionais em concreto em edificações de menores emissões.

Palavras-chave: Pegada de carbono, Madeira Lamelada Colada Cruzada, Edificações escolares modulares, Declaração ambiental de produto.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

ABSTRACT

The construction sector accounts for a significant share of global greenhouse gas emissions, mainly due to the intensive use of concrete and steel. As an alternative, engineered timber systems, such as cross-laminated timber (CLT), have the potential to reduce the carbon footprint of buildings. This study assesses the carbon footprint of a single classroom module in CLT in the state of Paraná, identifies the building elements that contribute most to average total emissions, and discusses mitigation possibilities. It is a case study based on the bill of quantities provided by the company responsible for the project. Emission factors were obtained from the Construction Environmental Performance Information System (Sidac) and from international Environmental Product Declarations, considering the fossil-based global warming potential in the A1–A3 Life Cycle Assessment modules. Sidac data, originally expressed in CO_2, were converted to CO_{2eq} with support from the Ecoinvent database and, when necessary, functional units were harmonized, ensuring compatibility between the bill of quantities and the data sources of the emission factors. Total emissions for the module ranged from 10479.91 to 19396.77 $kgCO_{2eq}$, with an average value of 14938.34 $kgCO_{2eq}$, corresponding to an average emission factor of 293.02 $kgCO_{2eq}/m^2$ for the building. The ABC curve analysis showed that seven elements account for 79.06% of average emissions, with emphasis on foundation concrete, roofing panels with a polyisocyanurate core, and structural MLCC. Concrete remains the main contributor due to the high volume used and higher emission factors per volume unit, whereas MLCC shows lower associated emissions per volume unit, reinforcing its potential to replace conventional concrete systems in lower-emission buildings.

Keywords: Carbon footprint, Cross-laminated timber, Modular school buildings, Environmental Product Declaration.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

RESUMEN

El sector de la construcción representa una fracción significativa de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, sobre todo por el uso intensivo de hormigón y acero. Como alternativa, los sistemas en madera ingenierizada, como la madera laminada cruzada, muestran potencial para reducir la huella de carbono de las edificaciones. Este trabajo evalúa la huella de carbono de un módulo unitario de aula en madera laminada cruzada en el estado de Paraná, identifica los elementos constructivos que más contribuyen a las emisiones medias totales y discute posibilidades de mitigación. Se trata de un estudio de caso basado en el cómputo de materiales proporcionado por la empresa responsable del proyecto. Los factores de emisión se obtuvieron del Sistema de Información del Desempeño Ambiental de la Construcción (Sidac) y de Declaraciones Ambientales de Producto internacionales, considerando el potencial de calentamiento global de origen fósil en los módulos A1–A3 de la evaluación del ciclo de vida. Los datos del Sidac, originalmente expresados en CO_2, se convirtieron a CO_{2eq} con apoyo de la base de datos Ecoinvent y, cuando fue necesario, se armonizaron las unidades funcionales, garantizando la compatibilidad entre el cómputo de materiales y las fuentes de datos de los factores de emisión. Las emisiones totales del módulo variaron de 10479,91 a 19396,77 $kgCO_{2eq}$, con un valor medio de 14938,34 $kgCO_{2eq}$, lo que corresponde a un factor de emisión medio de 293,02 $kgCO_{2eq}/m^2$ para la edificación. El análisis mediante la curva ABC mostró que siete elementos concentran el 79,06% de las emisiones medias, destacándose el hormigón de la cimentación, las cubiertas con núcleo de poliisocianurato y la madera laminada cruzada estructural. El hormigón sigue siendo el principal contribuyente debido al elevado volumen empleado y a los mayores factores de emisión por unidad de volumen, mientras que la madera laminada cruzada presenta menores emisiones asociadas por unidad de volumen, lo que refuerza su potencial para sustituir sistemas tradicionales de hormigón en edificaciones de menores emisiones.

Palabras clave: Huella de carbono, Madera laminada cruzada, Edificios escolares modulares, Declaración ambiental de producto.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Vista esquemática da configuração em camadas do MLCC. 17
Figura 2: Montagem de estrutura em MLCC. 17
Figura 3: Salas de aula de Mata-junta. 18
Figura 4: Módulo de sala de aula geminado em MLCC. 19
Figura 5: Planta baixa do módulo padrão. 24
Figura 6: Cortes A e B do módulo padrão. 25
Figura 7: Detalhe isométrico de radier e nervura. 26
Figura 8: Estrutura das paredes. 26
Figura 9: Acabamentos internos. 27
Figura 10: Acabamentos externos. 27
Figura 11: Perspectiva de estrutura do telhado. 28
Figura 12: Corte transversal de sistema de escoamento pluvial. 28
Figura 13: Processo de colagem das lâminas de madeira. 29
Figura 14: Corte de peças automatizado. 29
Figura 15: Tratamento com produto impermeabilizante. 30
Figura 16: Barroteamento. 30
Figura 17: Instalação de conduítes e lã de pet. 31
Figura 18: Instalação de chapas de gesso e cimentícias. 31
Figura 19: Tratamento de juntas. 32
Figura 20: Carregamento dos painéis. 32
Figura 21: Cura de concretagem de radier e nervuras. 33
Figura 22: Instalação e fixação dos painéis. 33
Figura 23: Instalação de plano de laje. 34
Figura 24: Instalação de vigas trapezoidais. 34
Figura 25: Cobertura em telha com núcleo PIR. 35
Figura 26: Instalação de platibanda em painel com núcleo PIR. 35
Figura 27: Módulo com acabamentos, e esquadrias. 36
Figura 28: Curva ABC de emissões. 44
Figura 29: Emissão de CO_{2eq} x Consumo de elementos para os itens da categoria A. 46

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Porcentagem de emissão de CO_2 fóssil em relação ao CO_{2eq} fóssil. 37
Tabela 2: Quantitativo de elementos e fatores de emissão. 39
Tabela 3: Quantitativo de elementos e fatores de emissão para a categoria A. 41
Tabela 4: Emissões e contribuição percentual. 42
Tabela 5: Fatores de emissão para a edificação. 44
Tabela 6: Elementos e emissões em kg e kgCO_{2eq}. 45

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12

2. OBJETIVOS 13

2.1. OBJETIVO GERAL 13

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 13

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14

3.1. EMISSÕES ASSOCIADAS À CONSTRUÇÃO CIVIL 14

3.2. MATERIAIS DE BASE BIOLÓGICA 15

3.3. APLICAÇÕES EM ESCOLAS MODULARES NO PARANÁ 18

3.4. INDICADORES AMBIENTAIS 19

4. MÉTODO 24

4.1. PROJETO 24

4.2. IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS, LEVANTAMENTO DE FATORES DE EMISSÃO E TRATAMENTO DE DADOS 36

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 42

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 49

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 52

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

1. INTRODUÇÃO

Estima-se que o aumento da temperatura global atinja cerca de 1,5°C nos próximos 20 anos devido ao agravamento do aquecimento global, que é impulsionado pela emissão de gases de efeito estufa (ENVIRONMENT, 2021). O setor da construção civil é uma fonte significativa de emissões (HUANG et al., 2018), representando 34% das emissões globais de CO_2 (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2025), de tal forma que se tornou crucial reduzir os impactos ambientais associados a este setor (CHEN et al., 2022; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2025).

Neste contexto, a madeira é reconhecida como alternativa aos materiais de construção convencionais, como o concreto e o aço (AMIRI et al., 2020; CHEN et al., 2022, 2020; CHURKINA et al., 2020). Sistemas construtivos em madeira atuam como eficientes reservatórios de carbono permitindo que o carbono fixado pelas árvores, ao longo do seu desenvolvimento, permaneça retido nas edificações (AMIRI et al., 2020; BERGMAN et al., 2014; CHURKINA et al., 2020; YOUNIS; DODOO, 2022).

Dentre os sistemas construtivos em madeira, o sistema em Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) se destaca como uma substituição eficiente e menos emissiva quando comparado aos sistemas construtivos convencionais (CHEN et al., 2022, 2020; YOUNIS; DODOO, 2022). O MLCC consiste na utilização de painéis industrializados, fabricados a partir de camadas de tábuas de madeira dispostas em ângulos retos entre si, e unidas por adesivos estruturais sob pressão (DONG et al., 2019; KRZOSEK; KŁOSIŃSKA, 2021; YOUNIS; DODOO, 2022).

À luz dessas considerações, torna-se relevante avaliar a pegada de carbono de edificações em MLCC em aplicações práticas abrangendo os sistemas que a compõem. Portanto, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar a pegada de carbono de uma edificação em MLCC, por meio do estudo de caso de um módulo unitário de sala de aula no estado do Paraná, considerando o indicador de potencial de aquecimento global fóssil (GWP-fóssil) nos módulos A1-A3 da Avaliação do Ciclo de Vida, sem contabilizar o potencial de estoque de carbono do MLCC, e considerando os elementos construtivos que compõem os sistemas de estrutura, de piso acabado, de vedações verticais, e de cobertura, contribuindo para a discussão sobre alternativas construtivas mais sustentáveis no setor da construção civil.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a pegada de carbono de uma edificação em MLCC de um módulo unitário de sala de aula no estado do Paraná, considerando o indicador de GWP-fóssil nos módulos A1-A3 da Avaliação do Ciclo de Vida, sem considerar o potencial de estoque de carbono do MLCC.

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar a edificação em Madeira Lamelada Colada Cruzada;
- Determinar a pegada de CO_2eq da edificação;
- Analisar a influência dos elementos construtivos na pegada de carbono;
- Sugerir estratégias de mitigação da pegada de carbono.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Emissões associadas à construção civil

O setor da construção civil é uma fonte significativa de emissões de dióxido de carbono (HUANG et al., 2018), representando 34% das emissões globais de CO_2. O carbono incorporado em materiais como cimento e aço representa uma fração substancial deste total contribuindo com 18% das emissões de dióxido de carbono relacionadas à construção (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2025).

Isso ocorre, pois o principal constituinte do cimento é o clínquer, que é produzido em grandes fornos, onde ocorrem emissões diretas de CO_2 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2018). O clínquer é responsável por 65% a 85% da massa do cimento, e por 90% a 98% das emissões de gases de efeito estufa associados à sua produção. O concreto é o material mais utilizado no setor da construção, e o processamento do cimento, seu principal material aglutinante, corresponde a cerca de 7% das emissões globais de carbono (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2023).

Quando se considera o conjunto da produção de concreto, estima-se que em 2012 as emissões diretas associadas a sua fabricação representaram 8,6% de todas as emissões antropogênicas de dióxido de carbono globais (MILLER; HORVATH; MONTEIRO, 2016).

O aço é o segundo material mais abundante em construções, e as emissões incorporadas da indústria de ferro e aço representam 7,2% da emissão global de gases de efeito estufa. Na produção de aço, a maior parte das emissões é gerada durante três processos: Quando o aço é produzido a partir de matérias primas primárias, utilizando um alto forno ou forno básico de oxigênio, quando o carbono é utilizado como um agente redutor, fornecido na forma de coque derivado do carvão, liberando dióxido de carbono, e a partir do uso de energia necessária para aquecer a fusão (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2023).

Diante desse cenário, a construção civil destaca-se como um dos setores com maior potencial de mitigação das mudanças climáticas, e a redução do impacto ambiental de seus materiais e processos torna-se uma prioridade global (CHEN et al., 2020; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2025).

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

3.2. Materiais de base biológica

Entre as estratégias para mitigar as emissões da construção civil, a substituição de materiais convencionais por materiais de base biológica tem se mostrado promissora, pois possuem uma capacidade única de reduzir o carbono atmosférico (CHURKINA et al., 2020). Atualmente, a madeira é o principal biomaterial com potencial de uso em larga escala (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2023), sendo reconhecida como alternativa aos materiais de construção convencionais, como o concreto e o aço (AMIRI et al., 2020; CHEN et al., 2022, 2020; CHURKINA et al., 2020).

Durante seu crescimento, a madeira captura dióxido de carbono por meio do processo de fotossíntese, armazenando carbono biogênico em sua estrutura. Simplificadamente, cerca de 50% da massa seca da madeira corresponde a carbono, ou seja, para dois quilos de madeira, aproximadamente um quilo é carbono biogênico. Esse carbono se mantém estocado durante o tempo, a menos que seja liberado por combustão, oxidação, ou degradação biológica (VICTORERO; BUSTAMANTE, 2025).

A madeira pode ser proveniente de florestas nativas de manejo, com recuperação total ou parcial da floresta, nativa proveniente de desmatamento, e madeira plantada. A madeira nativa de manejo com recuperação total da floresta é considerada como neutra em carbono, devido ao seu manejo que envolve medidas para garantir a recuperação da biomassa florestal (BELIZARIO-SILVA et al., 2022a). A madeira plantada também é considerada neutra em carbono, pois absorve dióxido de carbono durante seu crescimento, e ao fim do seu ciclo de vida, devolve este dióxido de carbono previamente retido para a atmosfera, resultando em um balanço de carbono biogênico neutro, ou seja, sem acréscimos de emissões (GARCÍA; GONZÁLEZ BARROSO; VANDERLEY MOACYR, 2014).

Portanto, é importante que a madeira colhida seja utilizada em produtos de longo ciclo de vida, como em estruturas de edificações, assim a extração sustentável de madeira de florestas bem manejadas para uso na construção civil representa uma oportunidade real de sequestrar carbono (RAMAGE et al., 2017).

Sistemas construtivos em madeira podem atuar como estoques de carbono duradouros, especialmente quando aplicados em centros urbanos, onde há elevada demanda por infraestrutura, em especial infraestrutura imobiliária (AMIRI et al., 2020). A construção de edifícios em madeira poderia armazenar entre 0,01 e 0,68 Giga

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

toneladas de carbono por ano, a depender do cenário e da área média per capita. Essa estratégia de incorporação da madeira na construção amplia o sumidouro de carbono associado a produtos de madeira de longa duração, transferindo parte do carbono das florestas para as cidades e consolidando o ambiente urbano como um reservatório ativo de carbono (CHURKINA et al., 2020).

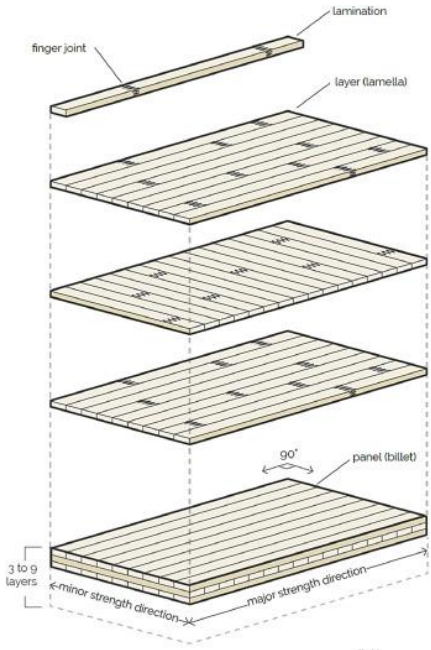
Entre os sistemas construtivos em madeira, destaca-se a Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), também conhecido como *Cross Laminated Timber* (CLT) ou Xlam. Trata-se de um sistema industrializado e pré-fabricado, ou seja, a estrutura é produzida em um ambiente industrial controlado, e posteriormente é transportada e montada no canteiro de obras reduzindo o tempo de construção, e a geração de resíduos (ESPINOZA et al., 2016; KORONAKI et al., 2021).

O MLCC foi desenvolvido na Europa em 1990, onde se tornou um material de construção amplamente usado, competindo diretamente com o aço, e o concreto armado. Sua aplicação proporciona rapidez construtiva, boa capacidade de carga e resistência ao fogo (ESPINOZA et al., 2016; KRZOSEK; KŁOSIŃSKA, 2021; YOUNIS; DODOO, 2022).

Como mostrado na Figura 01 e 02, a estrutura do MLCC é composta por camadas de madeira lamelada coladas entre si em ângulos de 90°, formando grandes e sólidos painéis que podem ser utilizados como paredes ou lajes, o que facilita a fabricação em larga escala e a construção de edifícios de múltiplos pavimentos. (ESPINOZA et al., 2016; KRZOSEK; KŁOSIŃSKA, 2021; YOUNIS; DODOO, 2022).

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Figura 1: Vista esquemática da configuração em camadas do MLCC.



Fonte: TallWood Design Institute, (2019, p. 3).

Figura 2: Montagem de estrutura em MLCC.

Fonte: Construtora A, (2025).

Quanto ao desempenho ambiental, o MLCC apresenta uma pegada de carbono menor que os sistemas convencionais, com reduções médias de 40% nas emissões de gases de efeito estufa (YOUNIS; DODOO, 2022). Edifícios em MLCC podem armazenar 1114 toneladas de CO_{2eq}, valor superior à quantidade emitida durante sua fase de produção, (780 T CO_{2eq}), evidenciando seu potencial como sumidouro de

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

carbono (CHEN et al., 2022), destacando o MLCC como uma substituição eficiente e menos emissiva quando comparado aos sistemas construtivos convencionais (CHEN et al., 2022, 2020; YOUNIS; DODOO, 2022).

3.3. Aplicações em escolas modulares no Paraná

A aplicação de sistemas construtivos em madeira engenheirada, como o MLCC, vem se expandindo, abrangendo edificações residenciais, comerciais e escolares (KORONAKI et al., 2021, 2025). Essa tendência reflete a necessidade de encontrar materiais que não apenas apresentem menores emissões em seu processo de produção, mas também atuem como sequestradores de carbono, contribuindo com a mitigação das mudanças climáticas (AMIRI et al., 2020).

No estado do Paraná, a adoção de sistemas construtivos em madeira engenheirada ganhou destaque por meio do programa de substituição das antigas salas de aula de madeira do tipo mata-junta (Figura 03).

Figura 3: Salas de aula de Mata-junta.

Fonte: NRE Cascavel, (2025)

Até o momento, 320 das 504 salas de aula identificadas no estado já foram substituídas por edificações como a mostrada na figura 04, representando um avanço significativo na modernização da infraestrutura escolar. A iniciativa é conduzida pela Secretaria de Estado da Educação (Seed-PR), por meio do Instituto Paranaense de Desenvolvimento Educacional (Fundepar), com um investimento aproximado de R$

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

103 milhões, beneficiando 11,2 mil alunos em diferentes regiões do estado (MODERNAS E SUSTENTÁVEIS, 2025).

Figura 4: Módulo de sala de aula geminado em MLCC.

Fonte: Construtora A, (2025)

3.4. Indicadores ambientais

A análise do desempenho ambiental de materiais de construção exige a definição de indicadores específicos capazes de representar quantitativamente seus impactos. Entre esses indicadores, destaca-se a pegada de carbono de um produto, que corresponde à soma das emissões e remoções de gases de efeito estufa associadas ao sistema de produção, expressa em dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}) e é obtida por meio de uma avaliação de ciclo de vida, considerando a categoria de impacto de mudança climática (NBR ISO 14067: GASES DE EFEITO ESTUFA — PEGADA DE CARBONO DE PRODUTOS — REQUISITOS E ORIENTAÇÕES SOBRE QUANTIFICAÇÃO, 2023).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) consolidou-se como uma metodologia valiosa para a avaliação de impactos ambientais na construção civil por sua abordagem abrangente e padronizada, capaz de considerar todas as etapas do ciclo de vida de um produto e fornecer uma visão holística e sistemática do seu desempenho ambiental, identificando oportunidades de melhoria (BARBHUIYA; DAS,

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

2023). Essa metodologia é normatizada pela NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura de 2025, e é definida como a compilação e a avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida, contemplando todas as etapas do ciclo de vida de um produto, desde a extração e aquisição de matérias-primas, manufatura, uso e disposição final (ABNT NBR ISO 14040: GESTÃO AMBIENTAL - AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - PRINCÍPIOS E ESTRUTURA, 2025; BARBHUIYA; DAS, 2023; KHASREEN; BANFILL; MENZIES, 2009).

A avaliação é estruturada em torno de uma unidade funcional (UF) ou unidade declarada, que define o objeto de estudo, e todas as análises subsequentes estão relativas a esta unidade. A unidade funcional estabelece a forma de quantificar as funções ou características de desempenho de um produto (ABNT NBR ISO 14040: GESTÃO AMBIENTAL - AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - PRINCÍPIOS E ESTRUTURA, 2025; BARBHUIYA; DAS, 2023). Seu principal objetivo é servir como referência para relacionar todas as entradas e saídas do sistema. Essa referência é essencial para garantir que os resultados de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) possam ser comparados adequadamente. A comparabilidade torna-se especialmente importante quando se analisam sistemas distintos, assegurando que as comparações ocorram sob as mesmas condições e critérios (ABNT NBR ISO 14040: GESTÃO AMBIENTAL - AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - PRINCÍPIOS E ESTRUTURA, 2025).

As declarações ambientais do produto, ou *Environmental Product Declaration* (EPD) são documentos padronizados que apresentam informações quantificadas e verificadas sobre os impactos ambientais de um produto ao longo de seu ciclo de vida, com base em uma ACV (NBR ISO 14025, 2015).

As EPDs apresentam e organizam os resultados da ACV em módulos representativos das fases do ciclo de vida de um produto.

- A1-A3: Produção (extração de matéria prima, transporte e fabricação);
- A4-A5: Construção (transporte ao local e instalação);
- B1-B7: Uso (uso ou aplicação, manutenção, reparo, substituição, reforma, consumo de energia e uso de água);
- C1-C4: Fim de vida (demolição, transporte, tratamento e disposição final);

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

- D: Benefícios e cargas além do sistema (Reuso, recuperação, ou potencial de reciclagem).

Os indicadores de emissões de gases de efeito estufa, (GEE ou GWP) são expressos em quilograma de dióxido de carbono equivalente por unidade funcional do produto ($kgCO_{2eq}$/UF), representam o potencial de aquecimento global e são agrupados nas seguintes categorias:

- *Global Warming Potential fossil* (GWP – fossil): Emissões de origem fóssil;
- *Global Warming Potential biogenic* (GWP – biogenic): Emissões e remoções de carbono de origem biológica;
- *Global Warming Potential luluc* (GWP – luluc): Emissões por mudança e uso da terra;
- *Global Warming Potential total*: Soma dos anteriores.

Além do GWP, as EPDs incluem outros indicadores ambientais padronizados, como acidificação, eutrofização, depleção de recursos minerais e fósseis, formação de ozônio fotoquímico, e uso de recursos hídricos e energéticos, permitindo uma avaliação abrangente dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do produto (DS EN 15804 2012+A2 2019, 2019).

O Operador de Programa é o organismo responsável por conduzir e administrar um programa de EPDs, podendo ser uma empresa ou um grupo de empresas, associação de setor industrial ou comercial, autoridades ou agências públicas, um organismo científico independente ou outra organização, cuja função é assegurar a credibilidade, transparência e consistência das EPDs publicadas.

Para isso o operador deve elaborar, manter e divulgar as instruções gerais do programa, supervisionar o cumprimento dos requisitos normativos, e garantir a comparabilidade entre EPDs, o operador também deve coordenar o processo de desenvolvimento do conjunto de regras, requisitos e diretrizes específicas para desenvolver as EPDs, selecionar verificadores independentes, publicar as EPDs aprovadas, bem como estabelecer mecanismos de controle e revisão dos documentos e procedimentos do programa. Dessa forma o operador do programa atua como elemento central na gestão de sistemas de EPDs, assegurando que os dados apresentados sejam tecnicamente válidos, verificáveis e em conformidade com as normativas vigentes (NBR ISO 14025, 2015).

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Por muito tempo as EPDs eram obtidas diretamente junto a seus operadores de programa. Contudo, com o avanço das plataformas digitais, surgiram bases de dados integradas, como a ECO Platform, que reúne e padroniza EPDs em diferentes formatos sendo o mais comum o formato PDF (STAPEL et al., 2022). A ECO Platform é uma organização guarda-chuva que agrega diversos operadores de programas, e outras partes interessadas no desenvolvimento de EPDs (MARZOCCHINI et al., 2023). Segundo dados disponibilizados pela própria plataforma (ECO EPD PROGRAMMES - ECO PLATFORM EN, [s.d.]), alguns dos operadores associados com maior número de EPDs publicadas são:

- EPD Italy: 1906 EPDs
- EPD-Global (powered by EPD-Norway): 3716 EPDs
- Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): 2565 EPDs
- PEP ecopassport: 4740 EPDs
- The International EPD System: 12749 EPDs.

A ECO Platform também conta com 148 membros, e um total de 27918 EPDs publicadas. (NEW ECO PORTAL| ECO PLATFORM, [s.d.]).

No contexto brasileiro, o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac) é uma iniciativa pública, com a participação da indústria da construção civil, sob coordenação do Ministério de Minas e Energia, cujo objetivo é ser uma ferramenta de suporte à decisão para melhorar o desempenho ambiental da cadeia de valor da construção brasileira (BELIZARIO-SILVA et al., 2022a).

O Sidac permite calcular indicadores de desempenho ambiental de produtos da construção, com base em dados primários brasileiros e em uma abordagem simplificada da Avaliação do Ciclo de Vida. A metodologia simplificada de ACV utilizada pelo Sidac diferencia-se da ACV convencional pela forma como são calculados os indicadores ambientais, pois o Sidac limita-se a consolidar os fluxos elementares para obter indicadores de inventário, já uma ACV completa aplica modelos de caracterização para estimar os potenciais de impacto ambiental. Assim, o Sidac contabiliza apenas a soma das emissões de CO_2 geradas ao longo do ciclo de vida do produto, e uma ACV convencional considera todos os gases de efeito estufa, como CO_2, CH_4 e N_2O, convertendo-os em um valor comum de impacto, o CO_{2eq}.

Portanto, em sua primeira versão o Sidac permite calcular os indicadores de demanda de energia primária em mega Joules, e emissão de CO_2 em quilograma por

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

unidade funcional do produto ($kgCO_2$/UF) dentro dos módulos A1-A3 (BELIZARIO-SILVA et al., 2022b)

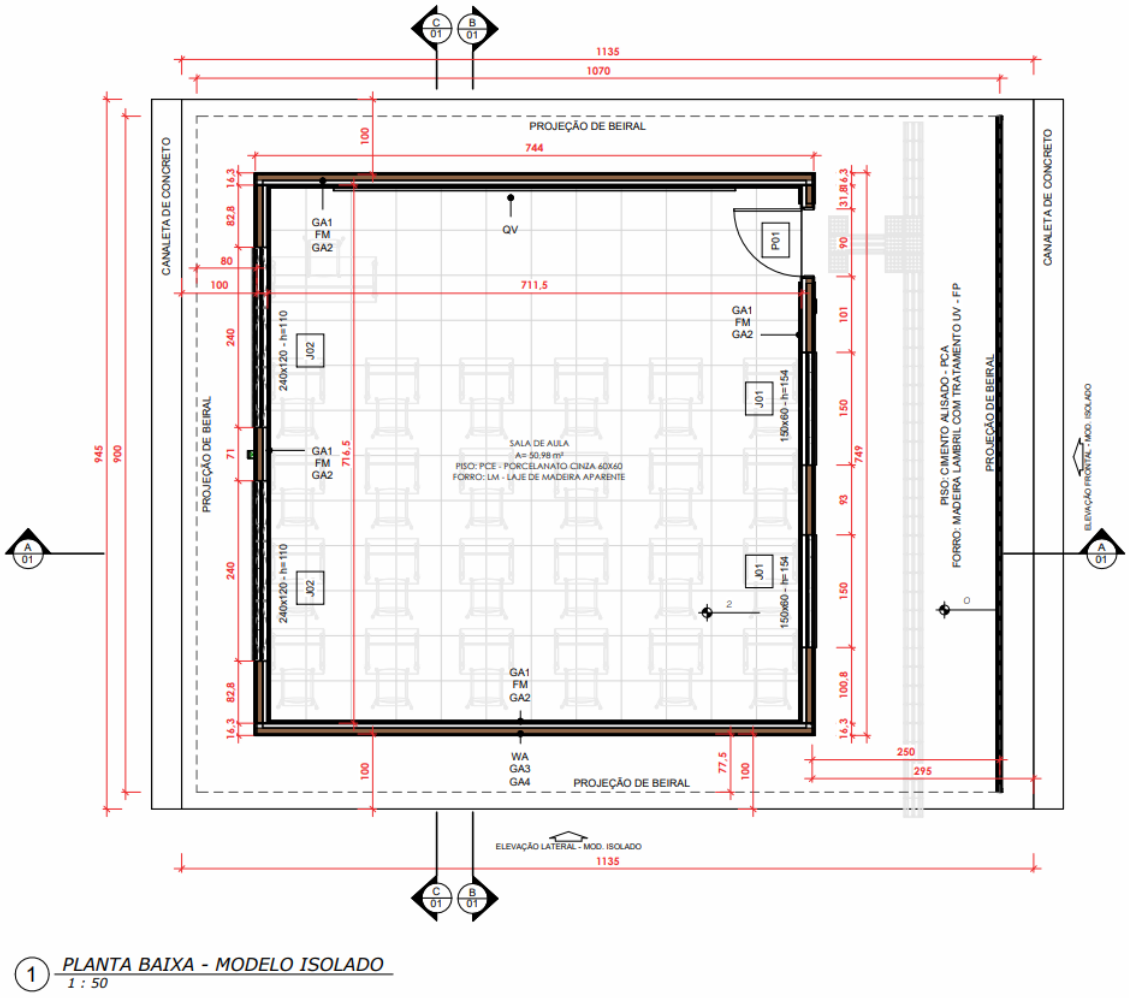
Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

4. MÉTODO

4.1. Projeto

O projeto das salas de aula se diferencia a depender da necessidade da escola onde é feita a instalação da edificação, podendo ser construídas salas de aulas em módulo único, geminado duplo, triplo e quadruplo (Figura 05 e 06).

Figura 5: Planta baixa do módulo padrão.

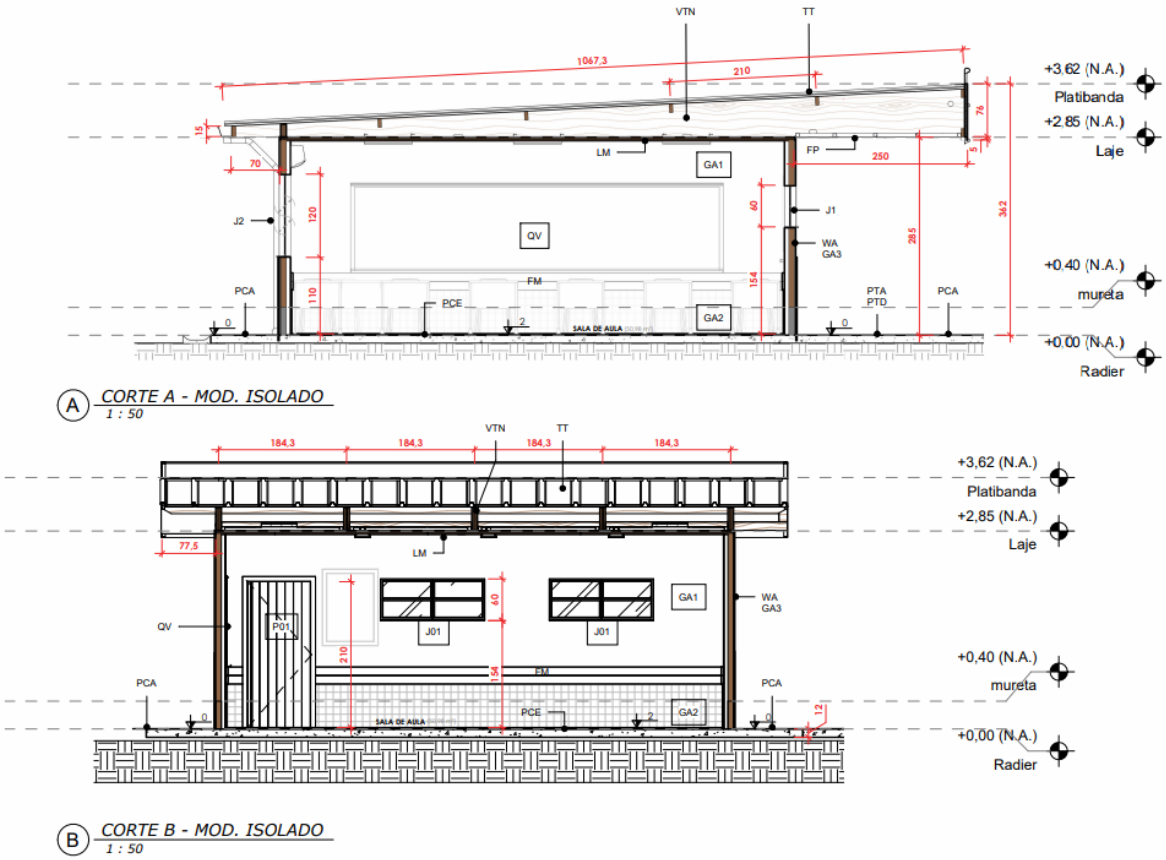


1 PLANTA BAIXA - MODELO ISOLADO
1 : 50

Fonte: Construtora A, (2025)

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Figura 6: Cortes A e B do módulo padrão.

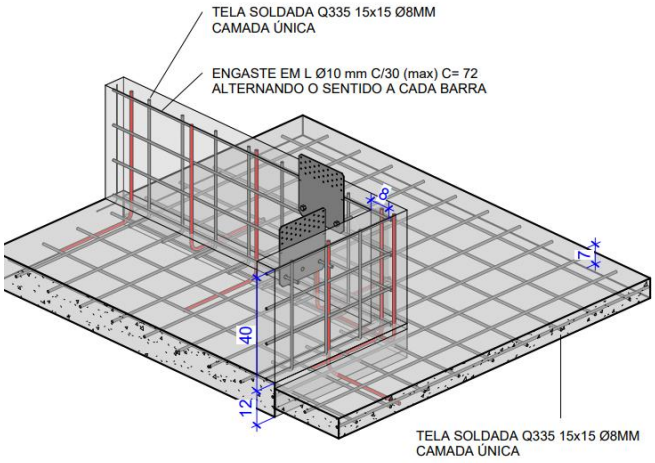


Fonte: Construtora A, (2025)

De acordo com os projetos e dados fornecidos pela Construtora A (CONSTRUTORA A, 2025) o padrão de sala de aula utilizado neste estudo, possui área construída de 50,98 m², e apoia-se sobre uma fundação do tipo radier em concreto armado com nervuras de 40 cm em todo o perímetro de paredes elevando a estrutura de madeira do piso, evitando o contato direto com a umidade, nestas nervuras são chumbadas chapas metálicas de ancoragem que conectam os painéis estruturais de madeira ao sistema de fundação (Figura 07).

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

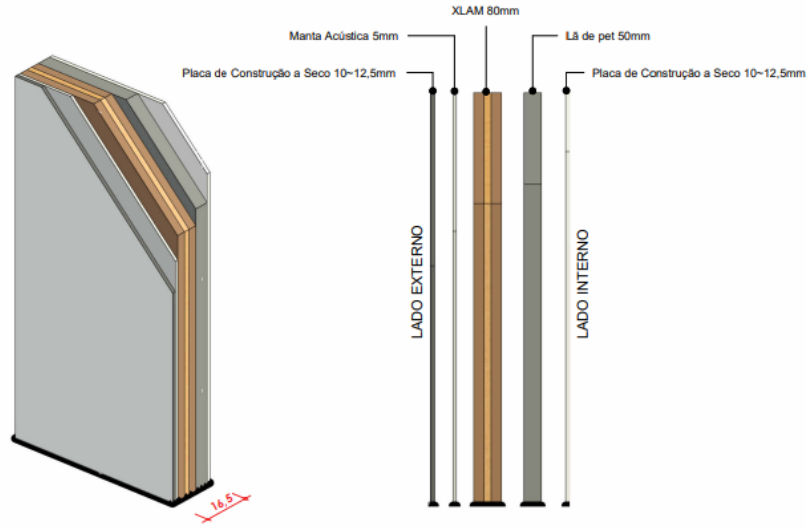
Figura 7: Detalhe isométrico de radier e nervura.



Fonte: Construtora A, (2025)

As paredes da edificação (Figura 08) contam com núcleo estrutural em MLCC com 8cm de espessura constituído por três camadas de pinus, e é revestido internamente por isolamento em lã de pet, chapa de gesso, acabamento em revestimento cerâmico, faixa de bate-cadeira e pintura (Figura 09). Externamente, o MLCC é revestido por uma manta acústica, e chapa cimentícia, e é realizado o acabamento com revestimento cerâmico e tinta (Figura 10). O piso é acabado com revestimento cerâmico, e o forro interno é constituído por laje aparente, enquanto externo é constituído por chapas de compensado.

Figura 8: Estrutura das paredes.



Fonte: Construtora A, (2025)

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Figura 9: Acabamentos internos.

Fonte: Construtora A, (2025)

Figura 10: Acabamentos externos.

Fonte: Construtora A, (2025)

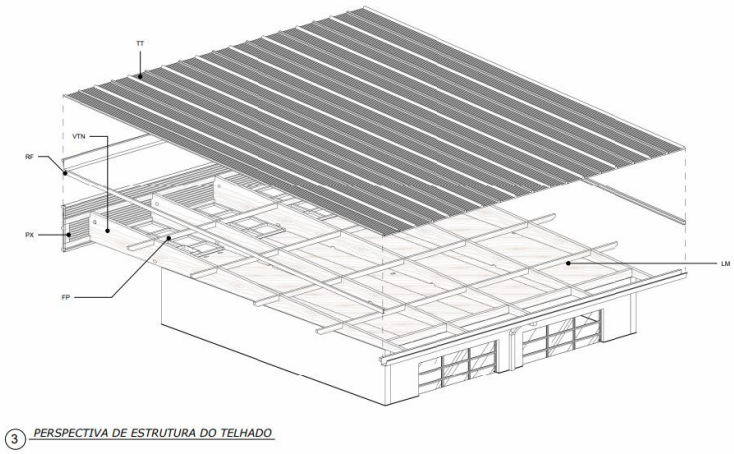
A cobertura por sua vez é composta por vigas trapezoidais e terças em MLCC[1] onde são fixadas telhas metálicas termoacústicas com núcleo em poliisocianurato (PIR) com inclinação de 5% (Figura 11). A platibanda também é executada em painel

[1] O projeto especifica utilização de vigas trapezoidais e terças em MLCC, porém na obra referente às imagens apresentadas realizaram-se aproveitamentos de materiais em MLC que existiam em estoque.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

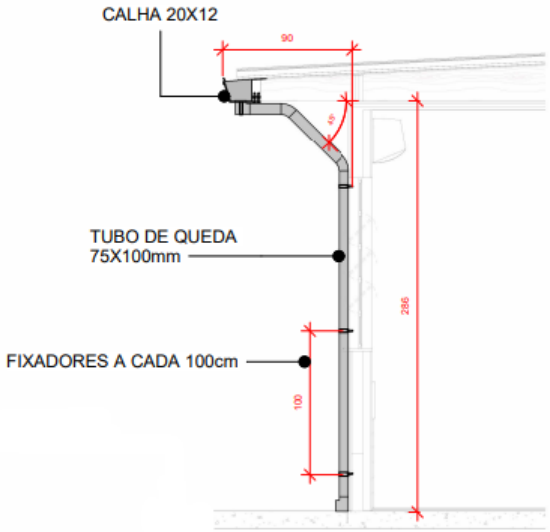
PIR, e recebe revestimento com rufos metálicos, garantindo estanqueidade. O sistema de drenagem por sua vez é formado por calhas metálicas e tubos de queda assegurando o escoamento das águas das chuvas (Figura 12).

Figura 11: Perspectiva de estrutura do telhado.



Fonte: Construtora A, (2025)

Figura 12: Corte transversal de sistema de escoamento pluvial.



Fonte: Construtora A, (2025)

O processo de execução da edificação pode ser compreendido em duas etapas principais: A produção industrial dos elementos em fábrica e a montagem no canteiro de obras. A fabricação dos módulos ocorre em ambiente controlado, com

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

mecanização e controle rigoroso. O processo dentro da fábrica inicia-se com a colagem e prensagem das lâminas de madeira, formando os painéis estruturais de MLCC (Figura 13). Em seguida, os painéis passam pelo corte automatizado em máquinas de controle numérico computadorizado (CNC), que realiza o corte das aberturas e encaixes (Figura 14).

Figura 13: Processo de colagem das lâminas de madeira.

Fonte: Construtora A, (2025)

Figura 14: Corte de peças automatizado.

Fonte: Autor, (2025)

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Após o corte, os painéis recebem tratamento impermeabilizante, aplicado por rolo, que cria uma camada protetora contra a umidade (Figura 15). Posteriormente, realiza-se o barroteamento, etapa em que são instalados os elementos de apoio e passagem dos conduítes elétricos, preparando os painéis para o recebimento do isolamento e dos fechamentos (Figura 16 e 17).

Figura 15: Tratamento com produto impermeabilizante.

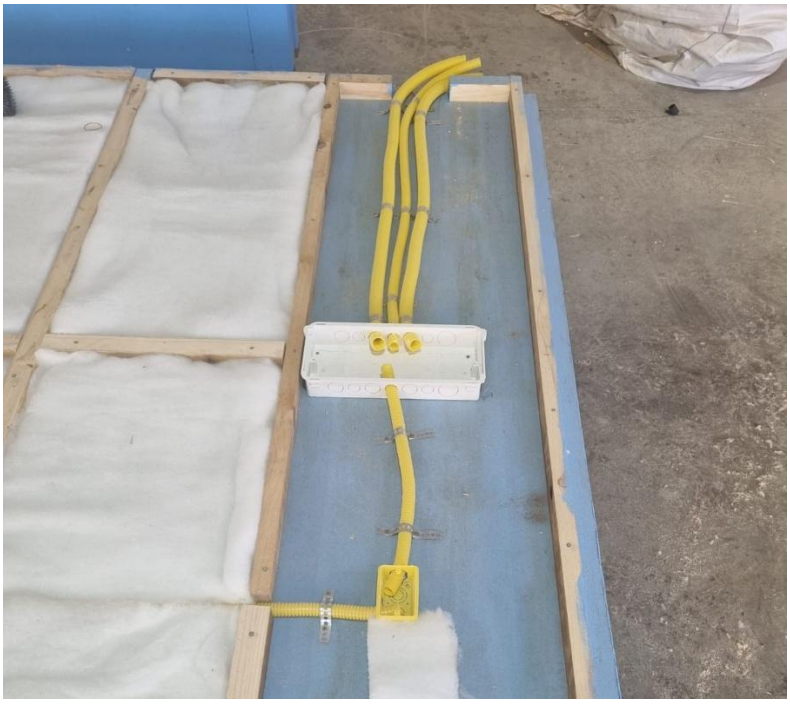
Fonte: Construtora A, (2025)

Figura 16: Barroteamento.

Fonte: Autor, (2025).

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Figura 17: Instalação de conduítes e lã de pet.



Fonte: Autor, (2025)

Na sequência, são fixadas as chapas de gesso acartonado na face interna e as mantas acústicas e placas cimentícias na face externa, realizando-se o tratamento de juntas (Figura 18 e 19). Concluído o processo, os módulos são carregados e transportados até o canteiro de obras, prontos para montagem (Figura 20).

Figura 18: Instalação de chapas de gesso e cimentícias.

Fonte: Autor, (2025)

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Figura 19: Tratamento de juntas.

Fonte: Autor, (2025)

Figura 20: Carregamento dos painéis.

Fonte: Construtora A, (2025)

Enquanto ocorre a produção industrial dos painéis, é executada simultaneamente no canteiro de obras a fundação do tipo radier e as nervuras (Figura 21). Essa etapa é realizada em paralelo para reduzir o tempo total de execução, permitindo que, ao término da fabricação dos módulos em madeira, o radier já esteja concluído e pronto para receber a montagem.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Figura 21: Cura de concretagem de radier e nervuras.

Fonte: Construtora A, (2025)

Com a chegada da estrutura em madeira no canteiro, inicia-se a fase de montagem da estrutura, os painéis previamente acabados em fabrica são içados com auxílio de um guindaste, e são posicionados sobre a superfície das nervuras do radier, então os painéis são fixos ao radier utilizando-se as chapas metálicas chumbadas ao radier, e pregadas com pregos anelados ao MLCC. A conexão entre painéis por sua vez é feita de forma sequencial, o que permite o travamento lateral utilizando-se parafusos conectores estruturais previamente prescritos pelo projeto estrutural (Figura 22).

Figura 22: Instalação e fixação dos painéis.

Fonte: Construtora A, (2025)

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Em seguida são içadas e fixadas as lajes, as vigas trapezoidais, e as terças, cujo posicionamento também é realizado com o auxílio de guindaste (Figura 23). As lajes se apoiam diretamente sobre as paredes estruturais, as vigas trapezoidais se apoiam sobre a laje, e as terças são entalhadas nas vigas trapezoidais (Figura 24), e todo este sistema é preso, utilizando-se de parafusos estruturais específicos em conjunto com cantoneiras, elementos estes também prescritos em projeto estrutural.

Figura 23: Instalação de plano de laje

Fonte: Construtora A, (2025)

Figura 24: Instalação de vigas trapezoidais.

Fonte: Construtora A, (2025)

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Com o sistema estrutural de cobertura pronto e fixado, inicia-se o procedimento de cobertura da edificação, realizando-se o lançamento das telhas, platibandas e rufos (Figura 25 e 26). Com a cobertura completa pode-se prosseguir aos acabamentos e fechamentos finais, com a instalação de esquadrias, luminárias, e demais equipamentos (Figura 27).

Figura 25: Cobertura em telha com núcleo PIR.

Fonte: Construtora A, (2025)

Figura 26: Instalação de platibanda em painel com núcleo PIR.

Fonte: Construtora A, (2025)

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Figura 27: Módulo com acabamentos, e esquadrias.

Fonte: Construtora A, (2025)

4.2. Identificação dos elementos construtivos, levantamento de fatores de emissão e tratamento de dados

Este estudo foi desenvolvido a partir da análise de um módulo unitário de sala de aula, por representar a unidade básica do tipo de edificação construída. Essa escolha permite a extrapolação dos resultados para os demais módulos geminados, simplificando o cálculo da pegada de carbono dos conjuntos edificados em MLCC. A unidade funcional definida para este estudo é o m², e o resultado total referente a pegada de carbono apresentado para o módulo de sala de aula é dado em $kgCO_{2eq}/m^2$.

Com o quantitativo fornecido pela Construtora A realizou-se a identificação dos elementos construtivos empregados nos sistemas de estrutura, piso acabado, vedações verticais e sistema de cobertura, foram excluídos os elementos pertencentes a projetos complementares, como instalações elétricas, pluviais, sistema de proteção contra descargas atmosféricas e cabeamento de rede.

Com os elementos construtivos identificados, deu-se início à busca pelos seus fatores de emissão. Essa pesquisa foi conduzida prioritariamente no Sidac, por se

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

tratar de uma base de dados nacional que consolida dados de materiais utilizados do mercado brasileiro. Para elementos que não apresentaram correspondência no Sidac, foram consultadas bases internacionais de EPDs, tais como a ECO Platform, Environdec, IBU, EPD Norway, EPD Hub e EPD Italy.

No Sidac, cada material apresenta por padrão o fator de emissão em $kgCO_2$/UF, com a indicação de valores mínimos e máximos referentes aos módulos de A1-A3. Nas EPDs, as informações são referentes a produtos específicos de fabricantes, e o fator de emissão é apresentado em toneladas ou em $kgCO_{2eq}$/UF.

Para compatibilizar essas duas fontes de dados, foi necessário transformar os valores do Sidac de $kgCO_2$ para $kgCO_{2eq}$, assegurando que os resultados se referissem ao mesmo indicador de impacto. A transformação foi realizada a partir de valores obtidos por meio do Ecoinvent 3.8, que apresenta a porcentagem de CO_2 fóssil, em relação ao CO_{2eq} fóssil para diferentes classes de materiais (Tabela 01).

Tabela 1: Porcentagem de emissão de CO_2 fóssil em relação ao CO_{2eq} fóssil.

Material	**Porcentual de CO_2 fóssil (%)**
Aço	88
Alumínio	90
Aplacados de Madeira	88
Cimento	99
Concreto	98
Isolantes Térmicos	85
Madeira Engenheirada	89
Revestimentos Cimentícios	94
Gesso	89
Telha Cerâmica	92
Tijolo Cerâmico	91
Madeira Pinus BR	92
Madeiras	89
Areia	97
Brita	84
Telha de Concreto	95
Poliméricos	82
Ligante Asfáltico	90

Fonte: Ecoinvent 3.8, (2025)

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Assim, para cada material identificado no Sidac, o valor em $kgCO_2$/UF foi dividido pelo respectivo percentual de CO_2 fóssil obtido no Ecoinvent, resultando no fator de emissão expresso em $kgCO_2eq$/UF.

Nas EPDs, os fatores de emissão já são informados diretamente em toneladas ou $kgCO_{2eq}$/UF. Entretanto, as unidades funcionais podem diferir daquelas utilizadas no quantitativo, o que exige a padronização das unidades, para garantir a compatibilidade entre os dados. Portanto, quando necessário, procedeu-se à conversão das unidades do quantitativo para aquelas utilizadas nas EPDs, ou vice-versa.

A fim de obter um intervalo representativo com mínimos e máximos de fatores de emissão, foram selecionadas múltiplas EPDs para produtos iguais ou tecnicamente similares aos levantados na etapa de quantitativo. As EPDs escolhidas foram aquelas que apresentavam a disponibilidade exclusiva do indicador de GWP-fóssil, por este apresentar o potencial de aquecimento global, indicador de maior relevância para os objetivos do estudo. Além disso, foram considerados apenas os valores correspondentes aos módulos A1-A3, essas escolhas asseguram a coerência entre as fronteiras do sistema avaliado tanto pelo Sidac como pelas EPDs, permitindo a comparação dos resultados obtidos.

Entretanto, para alguns materiais não se pode encontrar mais de uma EPD. Nestes casos não houve a formação de um intervalo de fatores de emissão mínimos e máximos, sendo adotado apenas o fator de emissão disponível, que representa o valor máximo utilizado para o determinado elemento.

Os fatores de emissão obtidos pelo Sidac e pelas EPDs foram organizados em planilhas eletrônicas, identificando seus mínimos e máximos nos casos em que essa variação estava disponível, a partir dos quais se calculou o fator de emissão médio para cada elemento, utilizando a média aritmética entre os valores extremos (Tabela 02).

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Tabela 2: Quantitativo de elementos e fatores de emissão.

Origem do Dado	Elemento	Quantidade	UF	Fator de Emissão ($kgCO_{2eq}$/UF)		
				Máximo	Mínimo	Médio
Sidac	Concreto dosado em central fck 30 MPa	11,50	m^3	346,33	232,86	289,59
EPD Internacional	Telha PIR e= 50mm	105,03	m^2	33,32	21,10	27,21
EPD Internacional	MLCC	10,28	m^3	253,00	52,60	152,80
EPD Internacional	Revestimento cerâmico	86,00	m^2	20,00	8,99	14,50
EPD Internacional	Janela Basculante	7,56	m^2	164,69	157,00	160,85
EPD Internacional	Chapa cimentícia e= 8 mm	75,00	m^2	18,20	7,97	13,09
EPD Internacional	Impermeabilizante acrílico	189,00	kg	4,00	2,43	3,22
EPD Internacional	Compensado plastificado: 220x110 cm	0,80	m^3	1220,00	240,00	730,00
EPD Nacional	Tela Nervurada Q335	710,10	kg	0,88	0,61	0,75
EPD Internacional	Espaçadores plásticos	5,50	kg	95,90	1,47	48,69
EPD Internacional	Manta de polietileno 5mm	81,20	kg	3,41	3,13	3,27
EPD Internacional	Argamassa colante	526,00	kg	0,70	0,20	0,45
EPD Internacional	Chapa de gesso e= 12,5 mm	71,00	m^2	2,74	1,83	2,29
EPD Nacional	Chapa de aço galvanizada e= 0,43 mm	31,30	kg	3,97	3,51	3,74
EPD Internacional	Basecoat	360,00	kg	0,28	0,27	0,27
EPD Internacional	Parafusos estruturais	25,33	kg	3,32	3,23	3,28
EPD Internacional	Lã de pet e= 50 mm	2,40	m^3	42,21	22,60	32,41
EPD Internacional	Massa corrida	80,00	kg	0,99	0,70	0,85
EPD Internacional	Conectores estruturais metálicos	21,20	kg	3,57	2,81	3,19
EPD Internacional	Porta de madeira	2,10	m^2	30,60	30,60	30,60
EPD Internacional	Tinta Acrílica	17,00	L	4,34	2,48	3,41
Sidac	Vergalhão de aço CA-50	59,20	kg	1,21	0,48	0,84
EPD Internacional	Tela de fibra de vidro	75,00	m^2	0,46	0,46	0,46
EPD Internacional	Selador acrílico	27,83	kg	1,21	1,21	1,21
EPD Internacional	Lona 200 micras	97,50	m^2	0,38	0,31	0,34
EPD Internacional	Rejunte	50,00	kg	0,57	0,47	0,52
EPD Internacional	Selante poliuretano	3,80	kg	7,89	4,81	6,35
Sidac	Barrotes para paredes	0,74	m^3	42,55	20,72	31,64
EPD Internacional	Cantoneira de pvc com tela	70,00	m	0,30	0,30	0,30
EPD Internacional	Parafusos 6x80	5,93	kg	3,52	3,52	3,52
EPD Internacional	Parabolt 8x60	3,60	kg	7,60	3,95	5,78
Sidac	Brita	7210,00	kg	0,01	0,00	0,00
EPD Internacional	Base Aditivada	19,00	kg	1,25	0,81	1,03
EPD Internacional	Arame recozido	5,00	kg	3,55	1,26	2,40
EPD Internacional	Kit fechadura	1,00	kg	13,00	10,90	11,95
EPD Internacional	Parafusos: 3x35 mm	3,50	kg	4,01	2,74	3,38
EPD Internacional	Parafusos: 5x50 mm	3,00	kg	3,52	3,52	3,52
EPD Internacional	Mármores e= 20 mm	1,64	m^2	7,58	4,96	6,27
EPD Internacional	Parafusos: 4,2x32 mm	2,80	kg	3,52	3,52	3,52

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

EPD Internacional	Parafusos: 5,5x110 mm	2,28	kg	5,57	2,63	4,10
EPD Internacional	Prego: 17x27	4,34	kg	3,02	0,67	1,85
EPD Internacional	Prego: 3,1x90 mm	3,25	kg	3,02	0,67	1,85
EPD Internacional	Verniz	1,60	L	5,98	0,24	3,11
Sidac	Tábuas para radier	0,15	m^3	42,55	20,72	31,64
Sidac	Bate-cadeira: 2x25 cm	0,14	m^3	42,55	20,72	31,64
EPD Internacional	Fita telada	19,00	m^2	0,21	0,21	0,21
Sidac	Barrote de reforço da mureta: 5x5 cm	0,10	m^3	42,55	20,72	31,64
EPD Internacional	Buchas plásticas	0,60	kg	5,15	4,03	4,59
EPD Internacional	Prego anelar: 4x60 mm	1,20	kg	3,35	0,67	2,01
EPD Internacional	Espuma expansiva de poliuretano	0,31	kg	7,89	4,81	6,35
Sidac	Ripas de cravação: 2,5x5,0 cm	0,06	m^3	42,55	20,72	31,64
Sidac	Barroteamento para forro: 5x5 cm	0,05	m^3	42,55	20,72	31,64
EPD Internacional	Impermeabilizante asfáltico	0,95	kg	1,60	0,95	1,27
Sidac	Gravatas: 2,5x5,0 cm	0,02	m^3	42,55	20,72	31,64
EPD Internacional	Prego sem cabeça: 18x30 mm	0,30	kg	3,02	0,67	1,85
EPD Internacional	Prego sem cabeça: 8x12 mm	0,20	kg	3,02	0,67	1,85
Sidac	Meia cana: 2x2 cm	0,01	m^3	42,55	20,72	31,64
EPD Internacional	Massa para tratamento de juntas	2,10	kg	0,17	0,12	0,14

Fonte: Autor, (2025)

Com os fatores de emissão mínimos, máximos e médios obtidos para cada elemento construtivo, procedeu-se à multiplicação desses valores pelas respectivas quantidades de elementos do projeto, resultando nas emissões mínimas, máximas e médias em $kgCO_2eq$, as quais foram somadas, apresentando a totalidade de emissões da obra. Também foi calculada a contribuição percentual individual de cada elemento em relação ao valor médio total de emissão da obra, a fim de identificar os elementos mais contribuintes para a totalidade da pegada de carbono da edificação.

Os resultados referentes aos dados médios foram representados graficamente, de modo a permitir a visualização da distribuição das emissões entre os diferentes elementos construtivos. A representação adotada foi a de um gráfico de distribuição no estilo da curva ABC onde considerou-se as emissões de cada elemento, destacando os produtos de baixa, média e alta contribuição para o total de emissões.

Para os elementos pertencentes à categoria A da curva ABC, realizou-se uma análise a fim de visualizar a relação entre massa consumida e intensidade de emissões. Inicialmente, as quantidades levantadas no quantitativo, expressas em m^2 ou m^3 foram convertidas para kg. Para isso, utilizou-se fatores de densidade, ou massa por unidade de área fornecidos pelos fabricantes, com exceção do concreto, para o

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

qual foi adotada a densidade do produto padrão disponível no Sidac. Não foram consideradas pormenorizações como os volumes de vazios presentes nos elementos, o que constitui uma simplificação da análise, que pode influenciar a estimativa de carbono associada a esses componentes.

Em seguida, os fatores de emissão originalmente dados em $kgCO_{2eq}$/UF foram convertidos para $kgCO_{2eq}$/kg. Nessa etapa, adotou-se exatamente as mesmas densidades e massas por metro quadrado utilizadas nas conversões das quantidades de elementos em m² e m³ para kg, garantindo consistência entre o quantitativo e os fatores de emissão (Tabela 03).

Tabela 3: Quantitativo de elementos e fatores de emissão para a categoria A.

Origem do Dado	Elemento	Quantidade de elementos	UF	Fator de Emissão ($kgCO_{2eq}$/UF)	
				Máximo	Mínimo
Sidac	Concreto dosado em central fck 30 MPa	27140,00	kg	0,15	0,10
EPD Internacional	Telha PIR e= 50mm	1066,05	kg	3,28	2,08
EPD Internacional	MLCC	6678,75	kg	0,39	0,08
EPD Internacional	Revestimento cerâmico	1314,596	kg	1,31	0,59
EPD Internacional	Janela Basculante	113,40	kg	10,98	10,47
EPD Internacional	Chapa cimentícia e= 8 mm	1067,71	kg	1,28	0,56
EPD Internacional	Impermeabilizante acrílico	189,00	kg	4,00	2,43

Fonte: Autor, (2025)

A partir das quantidades em kg, e dos fatores de emissão em $kgCO_{2eq}$/kg, calculou-se as faixas de emissões mínimas e máximas em $kgCO_{2eq}$ para cada elemento da categoria A. Com estes dados, elaborou-se um gráfico de correlação entre a emissão e o consumo de elementos, nesse gráfico, o eixo horizontal representa os elementos analisados, enquanto os dois eixos verticais são utilizados para representar respectivamente as emissões em $kgCO_{2eq}$ e a quantidade de elementos em kg.

Esse arranjo gráfico permite visualizar simultaneamente a contribuição de cada elemento em termos de massa consumida e de emissões associadas, facilitando a identificação de materiais críticos tanto pela quantidade demandada quanto pela intensidade de emissões.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, apresentam-se os resultados da avaliação da pegada de carbono conduzida com base no quantitativo de elementos utilizados na construção do módulo de sala de aula em MLCC, considerando exclusivamente as etapas referentes aos módulos A1-A3 da Avaliação do Ciclo de Vida.

A Tabela 04, apresenta a emissão máxima, mínima e média de cada elemento construtivo, bem como a contribuição percentual de cada um em relação a emissão média total da edificação. A partir da soma das emissões individuais obteve-se uma pegada máxima de 19396,77 $kgCO_{2eq}$, mínima de 10479,91 $kgCO_{2eq}$, e média de 14938,34 $kgCO_{2eq}$ para o módulo avaliado.

Tabela 4: Emissões e contribuição percentual.

Elemento	Quantidade	UF	Emissão ($kgCO_{2eq}$)			% Do total médio
			Máximo	Mínimo	Médio	
Concreto dosado em central fck 30 MPa	11,50	m^3	3982,76	2677,86	3330,31	22,29%
Telha PIR e= 50mm	105,03	m^2	3500,02	2216,13	2858,08	19,13%
MLCC	10,28	m^3	2599,58	540,47	1570,02	10,51%
Revestimento cerâmico	86,00	m^2	1720,00	773,14	1246,57	8,34%
Janela Basculante	7,56	m^2	1245,06	1186,92	1215,99	8,14%
Chapa cimentícia e= 8 mm	75,00	m^2	1365,00	597,75	981,38	6,57%
Impermeabilizante acrílico	189,00	kg	756,00	459,27	607,64	4,07%
Compensado plastificado: 220x110 cm	0,80	m^3	970,63	190,94	580,79	3,89%
Tela Nervurada Q335	710,10	kg	627,02	431,74	529,38	3,54%
Espaçadores plásticos	5,50	kg	527,45	8,09	267,77	1,79%
Manta de polietileno 5mm	81,20	kg	276,89	254,38	265,63	1,78%
Argamassa colante	526,00	kg	368,20	105,20	236,70	1,58%
Chapa de gesso e= 12,5 mm	71,00	m^2	194,54	129,93	162,24	1,09%
Chapa de aço galvanizada e= 0,43 mm	31,30	kg	124,26	109,86	117,06	0,78%
Basecoat	360,00	kg	99,72	96,48	98,10	0,66%
Parafusos estruturais	25,33	kg	84,10	81,82	82,96	0,56%
Lã de pet e= 50 mm	2,40	m^3	101,31	54,24	77,78	0,52%
Massa corrida	80,00	kg	79,36	55,92	67,64	0,45%
Conectores estruturais metálicos	21,20	kg	75,68	59,57	67,63	0,45%
Porta de madeira	2,10	m^2	64,26	64,26	64,26	0,43%
Tinta Acrílica	17,00	L	73,81	42,13	57,97	0,39%
Vergalhão de aço CA-50	59,20	kg	71,38	28,65	50,01	0,33%
Tela de fibra de vidro	75,00	m^2	34,50	34,50	34,50	0,23%
Selador acrílico	27,83	kg	33,67	33,67	33,67	0,23%
Lona 200 micras	97,50	m^2	36,60	30,62	33,61	0,22%

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Rejunte	50,00	kg	28,35	23,40	25,88	0,17%
Selante poliuretano	3,80	kg	29,98	18,28	24,13	0,16%
Barrotes para paredes	0,74	m^3	31,38	15,28	23,33	0,16%
Cantoneira de pvc com tela	70,00	m	21,21	21,21	21,21	0,14%
Parafusos 6x80	5,93	kg	20,87	20,87	20,87	0,14%
Parabolt 8x60	3,60	kg	27,36	14,22	20,79	0,14%
Brita	7210,00	kg	40,08	0,00	20,04	0,13%
Base Aditivada	19,00	kg	23,75	15,31	19,53	0,13%
Arame recozido	5,00	kg	17,77	6,28	12,02	0,08%
Kit fechadura	1,00	kg	13,00	10,90	11,95	0,08%
Parafusos: 3x35 mm	3,50	kg	14,04	9,59	11,81	0,08%
Parafusos: 5x50 mm	3,00	kg	10,56	10,56	10,56	0,07%
Mármores e= 20 mm	1,64	m^2	12,44	8,14	10,29	0,07%
Parafusos: 4,2x32 mm	2,80	kg	9,86	9,86	9,86	0,07%
Parafusos: 5,5x110 mm	2,28	kg	12,70	6,00	9,35	0,06%
Prego: 17x27	4,34	kg	13,12	2,93	8,02	0,05%
Prego: 3,1x90 mm	3,25	kg	9,82	2,19	6,00	0,04%
Verniz	1,60	L	9,57	0,39	4,98	0,03%
Tábuas para radier	0,15	m^3	6,38	3,11	4,75	0,03%
Bate-cadeira: 2x25 cm	0,14	m^3	5,85	2,85	4,35	0,03%
Fita telada	19,00	m^2	3,95	3,95	3,95	0,03%
Barrote de reforço da mureta: 5x5 cm	0,10	m^3	4,26	2,07	3,16	0,02%
Buchas plásticas	0,60	kg	3,09	2,42	2,76	0,02%
Prego anelar: 4x60 mm	1,20	kg	4,02	0,81	2,41	0,02%
Espuma expansiva de poliuretano	0,31	kg	2,45	1,49	1,97	0,01%
Ripas de cravação: 2,5x5,0 cm	0,06	m^3	2,55	1,24	1,90	0,01%
Barroteamento para forro: 5x5 cm	0,05	m^3	1,91	0,93	1,42	0,01%
Impermeabilizante asfáltico	0,95	kg	1,52	0,90	1,21	0,01%
Gravatas: 2,5x5,0 cm	0,02	m^3	0,85	0,41	0,63	0,00%
Prego sem cabeça: 18x30 mm	0,30	kg	0,91	0,20	0,55	0,00%
Prego sem cabeça: 8x12 mm	0,20	kg	0,60	0,13	0,37	0,00%
Meia cana: 2x2 cm	0,01	m^3	0,43	0,21	0,32	0,00%
Massa para tratamento de juntas	2,10	kg	0,35	0,24	0,30	0,00%
Total ($kgCO_{2eq}$)			***19396,77***	***10479,91***	***14938,34***	***100%***

Fonte: Autor, (2025)

Considerando a área construída de 50,98 m², essas emissões correspondem a fatores de emissão máximos, mínimos e médios de respectivamente, 380,48 $kgCO_{2eq}/m^2$, 205,57 $kgCO_{2eq}/m^2$ e 293,02 $kgCO_{2eq}/m^2$, apresentados na Tabela 05.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

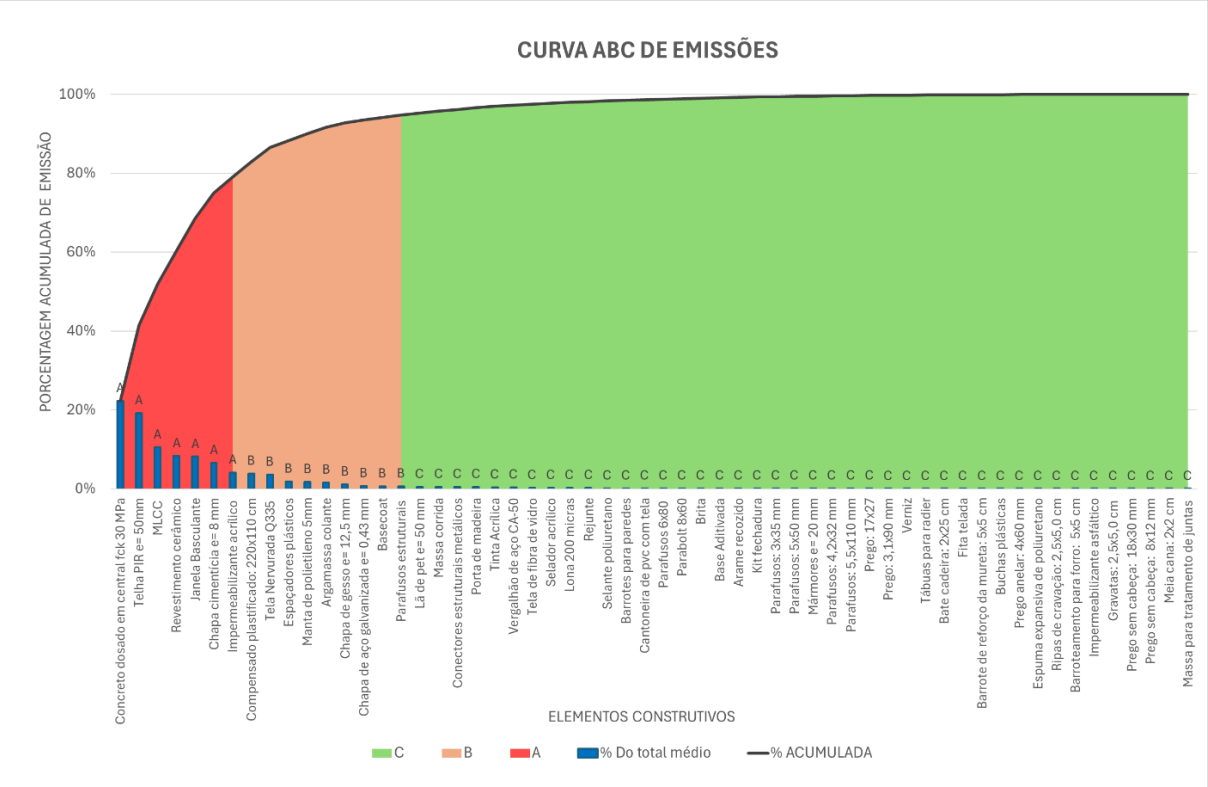
Tabela 5: Fatores de emissão para a edificação.

Edificação	Quantidade	UF	Total ($kgCO_{2eq}$/UF)		
			Máximo	Mínimo	Médio
Módulo unitário de sala de aula	50,98	m^2	380,48	205,57	293,02

Fonte: Autor, (2025)

Com base na contribuição percentual de cada elemento para emissão média total, organizou-se o conjunto de dados a fim de elaborar um gráfico no formato da curva ABC, apresentado na Figura 28, evidenciando a concentração das emissões em poucos elementos construtivos. Os pertencentes à categoria A somam 79,06% das emissões, categoria B, 15,67% e categoria C os 5,27% restantes.

Figura 28: Curva ABC de emissões.



Fonte: Autor, (2025)

A categoria A reúne os sete elementos que concentram a maior parte das emissões, sendo estes o concreto, telha PIR, MLCC, revestimento cerâmico, janela basculante, chapa cimentícia e o impermeabilizante acrílico. O concreto, é o maior

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

contribuinte individual, seguido pela telha PIR e pelo MLCC, em conjunto, os três são responsáveis por 51,94% da emissão média total.

A fim de analisar a relação entre consumo de material (kg) e emissões ($kgCO_{2eq}$) para os elementos da categoria A, foi feita a conversão das unidades funcionais originalmente adotadas para massa em kg, bem como dos fatores de emissão para $kgCO_{2eq}/kg$. Os resultados destas conversões apresentados na Tabela 06 foram utilizados para a elaboração do gráfico apresentado na Figura 29, que relaciona a faixa de emissão com a quantidade de elementos consumidos.

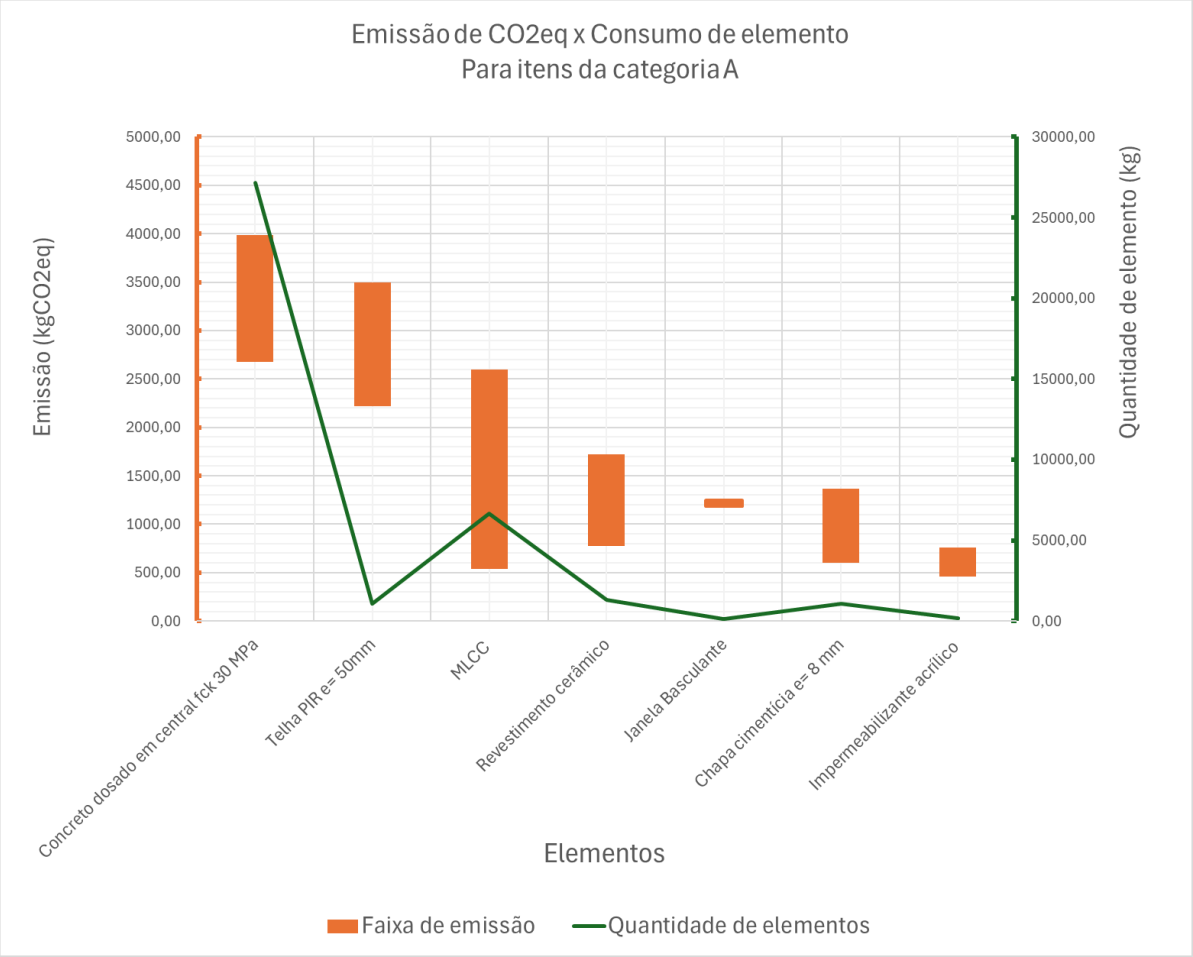
Tabela 6: Elementos e emissões em kg e $kgCO_{2eq}$.

Elemento	Quantidade de elementos	UF	Emissão ($kgCO_{2eq}$)	
			Máximo	Mínimo
Concreto dosado em central fck 30 MPa	27140,00	kg	3982,76	2677,86
Telha PIR e= 50mm	1066,05	kg	3500,02	2216,13
MLCC	6678,75	kg	2599,58	540,47
Revestimento cerâmico	1314,596	kg	1720,00	773,14
Janela Basculante	113,40	kg	1245,06	1186,92
Chapa cimentícia e= 8 mm	1067,71	kg	1365,00	597,75
Impermeabilizante acrílico	189,00	kg	756,00	459,27

Fonte: Autor, (2025)

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

Figura 29: Emissão de CO_{2eq} x Consumo de elementos para os itens da categoria A.



Fonte: Autor, (2025)

A partir da Figura 29 e da Tabela 06 pode-se observar que o concreto é o elemento que possui maior faixa de emissão dentre os pertencentes à categoria A, reflexo da elevada massa empregada na obra. Do ponto de vista da interpretação dos fatores de emissão em $kgCO_2eq/kg$, valores iguais ou superiores a 1 $kgCO_2eq/kg$ indicam que, para cada quilograma de material incorporado, é emitida uma massa de CO_2eq igual ou superior à própria massa do produto, o que evidencia uma elevada intensidade de emissões por unidade de massa.

Apesar de o concreto possuir um fator de emissão entre 0,10 e 0,15 $kgCO_{2eq}/kg$, inferiores a 1 $kgCO_{2eq}/kg$, trata-se de um material com uma densidade adotada de 2360 kg/m^3, assim o volume utilizado no radier de 11,5 m^3 resulta em uma massa de 27140 kg, amplificando suas emissões totais, e o posicionando como principal contribuinte para a pegada de carbono da edificação.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

O MLCC, por sua vez, apresenta fatores de emissão em massa na faixa de 0,08 a 0,39 $kgCO_2eq/kg$, ainda inferiores a 1 $kgCO_2eq/kg$, mas com valores que podem superar aqueles observados para o concreto (0,10 a 0,15 $kgCO_2eq/kg$). No entanto, o MLCC é significativamente menos denso do que o concreto, com densidade de 650 kg/m^3, o que implica que, para um mesmo volume de elemento estrutural, a massa de MLCC, e consequentemente, as suas emissões associadas serão menores do que as do concreto.

Além disso, quando se comparam os fatores de emissão por unidade de volume, verifica-se que o concreto apresenta valores entre 232,86 e 346,33 $kgCO_2eq/m^3$, enquanto o MLCC varia de 52,60 a 253,00 $kgCO_2eq/m^3$, reforçando a menor intensidade de emissões do sistema em madeira frente ao sistema em concreto. Essa combinação de menor densidade com os fatores de emissão apresentados explica sua contribuição relativa menor para a pegada total quando comparado ao papel dominante do concreto. Além disso, por se tratar de um produto madeireiro, o MLCC possui a característica de ser um banco de carbono durante sua vida útil, ainda que essa característica não seja contabilizada neste estudo.

É necessário ressaltar que a faixa de fatores de emissão adotada para o MLCC é proveniente de EPDs internacionais, que foram utilizadas a fim de suprir a lacuna de informações existente em função da escassez de dados relacionados a esse produto no mercado brasileiro. Tais EPDs refletem não apenas as características intrínsecas do material, mas também as particularidades dos processos produtivos considerados, que podem estar associados a matrizes elétricas mais emissivas do que a matriz brasileira, o que tende a elevar o valor do fator de emissão obtido para o MLCC.

Na análise dos demais elementos da edificação, observa-se que o revestimento cerâmico e a chapa cimentícia exibem fatores de emissão que cruzam o valor de 1 $kgCO_{2eq}/kg$. No caso do revestimento cerâmico, o fator varia de 0,59 a 1,31 $kgCO_{2eq}/kg$, e para a chapa cimentícia, de 0,56 a 1,28 $kgCO_{2eq}/kg$. Isso indica que esses materiais podem se comportar tanto como elementos de menor intensidade de emissão, ou como materiais mais emissivos.

Destaca-se também que a telha PIR, janela basculante e o impermeabilizante acrílico apresentam fatores de emissão inteiramente acima de 1 $kgCO_{2eq}/kg$. Na prática isso significa que, para esses elementos, a massa de CO_{2eq} emitida é maior do

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

que a própria massa incorporada na edificação. Esses elementos, ainda que não sejam os mais pesados em termos de consumo, apresentam-se como elementos críticos do ponto de vista de pegada de carbono, pois possuem uma participação relevante na obra e uma elevada intensidade de emissões por unidade de massa.

Embora o concreto permaneça como principal contribuinte para a pegada de carbono da edificação, seu protagonismo está diretamente ligado à elevada densidade do material e ao grande volume empregado na fundação, enquanto o MLCC, material menos denso e com fatores de emissão em $kgCO_{2eq}/m^3$ inferiores aos do concreto, cumpre sua função estrutural com menores emissões associadas. Isso reforça a vantagem ambiental da substituição da estrutura em concreto pela estrutura em MLCC, indicando que soluções que ampliem o uso de sistemas em madeira engenheirada, sempre que tecnicamente viável, tendem a reduzir a pegada de carbono do edifício quando comparadas às soluções construtivas predominantemente cimentícias.

Diante deste cenário apresentado através dos resultados pode-se pensar em algumas intervenções para mitigar as emissões, como a revisão do sistema de fundações, com a adoção de soluções que demandem menor volume de concreto para o mesmo desempenho estrutural, diminuição do uso de elementos à base de cimento e adoção de produtos formulados com cimentos de menor teor de clínquer. Entre os elementos de maior intensidade de emissões, destacam-se, ainda, as telhas com núcleo de PIR, o revestimento cerâmico, as janelas basculantes e o impermeabilizante acrílico, de modo que a substituição por sistemas de cobertura alternativos, bem como por soluções de fechamento, impermeabilização e acabamento com menor impacto ambiental, configura estratégias relevantes para a redução das emissões da edificação.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação conduzida neste trabalho permite quantificar as emissões associadas à edificação, e evidenciar como essas emissões se distribuem entre os diferentes elementos construtivos que a constituem. Para o módulo de sala de aula analisado, as emissões totais situaram-se em um intervalo de 10479,91 $kgCO_{2eq}$ e 19396,77 $kgCO_{2eq}$, com o valor médio de 14938,34 $kgCO_{2eq}$, o que corresponde a fatores de emissão na ordem de 205,57 $kgCO_{2eq}/m^2$ a 380,48 $kgCO_{2eq}/m^2$, com média de 293,02 $kgCO_{2eq}/m^2$. Esses resultados obtidos a partir da integração de dados do Sidac e de EPDs internacionais devidamente compatibilizados, fornecem uma ordem de grandeza para as emissões associadas à edificação em MLCC estudada.

A análise a partir da curva ABC mostrou que a maior parcela das emissões se concentra em um conjunto restrito de componentes, com sete itens correspondendo a 79,06% do total médio, sendo eles o concreto, telha PIR, MLCC, revestimento cerâmico, janelas basculantes, chapas cimentícias e impermeabilizante acrílico. O concreto destacou-se como maior contribuinte individual, em função da sua elevada massa empregada na fundação, ainda que apresente fatores de emissão em $kgCO_{2eq}/kg$ inferiores a 1. Já o MLCC apresentou fatores de emissão por quilograma que podem ultrapassar os do concreto, mas por apresentar uma menor densidade, resultou em emissões menores, reforçando seu potencial de redução de emissões associadas ao sistema estrutural. Entretanto, cabe destacar que a faixa de fatores de emissão considerada para o MLCC é proveniente de EPDs internacionais, o que significa que os valores apresentados refletem contextos produtivos e matrizes energéticas que podem ser mais emissivos do que a realidade brasileira, devendo essa diferença ser levada em conta na interpretação dos resultados.

Para a telha PIR, janelas basculantes e impermeabilizante acrílico, cujos fatores de emissão em massa ultrapassam o valor de 1 $kgCO_{2eq}/kg$, a massa de CO_{2eq} é maior do que a própria massa dos elementos incorporados na edificação. Ainda que estes itens não sejam os mais pesados em termos de consumo, a combinação entre presença significativa na obra e alta intensidade de emissões os coloca como elementos críticos na pegada total do módulo.

O estudo evidencia também a importância de considerar de forma conjunta o fator de emissão em $kgCO_{2eq}/kg$, a densidade, volume ou área empregados. A conversão das unidades funcionais para kg utilizando densidades e massas por metro

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

quadrado associadas aos elementos do projeto, aliada à conversão dos fatores de emissão para $kgCO_{2eq}/kg$, mostrou que a mudança de unidade não altera os totais quando se mantêm os mesmos parâmetros físicos adotados. A análise específica dos componentes da categoria A relacionando massa empregada em obra e emissões, reforçou a visão da comparação direta entre intensidade de emissões e massa consumida, permitindo identificar itens críticos, tanto pela quantidade demandada quanto pela intensidade de emissões.

Na prática, os resultados sugerem alguns encaminhamentos para a redução da pegada de carbono em projetos similares. Destaca-se a otimização das fundações, por meio da escolha de soluções que demandem menor volume de concreto para o mesmo desempenho estrutural, bem como o uso de cimentos com menor teor de clínquer, dada a influência desse sistema nas emissões totais. Ao mesmo tempo, a elevada intensidade de emissões observadas em telhas PIR, janelas basculantes, revestimento cerâmico, chapas cimentícias e impermeabilizantes indica a necessidade de avaliar soluções alternativas de cobertura, fechamento, acabamento e impermeabilização com menores fatores de emissão. A ampliação do uso de sistemas em madeira engenheirada, associada à seleção criteriosa de materiais complementares, tende a potencializar os benefícios ambientais do MLCC.

Algumas limitações observadas ao longo do estudo apontam caminhos para trabalhos futuros. A análise concentrou-se exclusivamente nas etapas A1–A3, sem incluir transporte até a obra, execução, uso, manutenção, fim de vida ou possíveis benefícios além dos limites do sistema. O carbono biogênico estocado no MLCC não foi contabilizado, o que tende a subestimar o papel desse material como reserva temporária de carbono. Além disso, parte dos fatores de emissão baseou-se em EPDs internacionais, associadas a contextos produtivos distintos da realidade brasileira, ainda que tenham sido adotados critérios de seleção e compatibilização.

Neste sentido, investigações futuras poderiam comparar explicitamente o módulo em MLCC com um cenário estrutural equivalente em concreto armado, mantendo a função e geometria semelhantes, ampliar as fronteiras do sistema para incluir etapas adicionais do ciclo de vida e desenvolver procedimentos de normalização que ajustem os fatores de emissão obtidos em EPDs às características físicas dos materiais efetivamente empregados (como densidade e massa por unidade de área), por meio de relações proporcionais, de modo a estimar fatores de emissão

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

equivalentes para elementos com características físicas distintas dentro de uma mesma classe de produto.

O estudo desenvolvido permite quantificar as emissões associadas ao módulo escolar em MLCC, identificar os elementos que mais contribuem para a pegada de carbono da edificação, e evidenciar o peso relativo dos mesmos na composição das emissões médias totais. A relação entre dados do Sidac e EPDs internacionais, a construção de faixas mínimas, máximas e médias de emissão, e a análise da curva ABC mostraram-se ferramentas eficazes para organizar e interpretar os resultados, oferecendo uma leitura consistente sobre o desempenho ambiental da edificação. Dessa forma, o trabalho contribui para o entendimento das implicações de emissões associadas à adoção do MLCC em edificações escolares modulares e fornece uma base que pode apoiar processos de projeto e especificação de materiais alinhados à redução das emissões de carbono no setor construtivo.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. 2025. Acesso em: 2 out. 2025.

AMIRI, Ali; OTTELIN, Juudit; SORVARI, Jaana; JUNNILA, Seppo. Cities as carbon sinks—classification of wooden buildings. **Environmental Research Letters**, *[S. l.]*, v. 15, n. 9, p. 094076, 2020. DOI: 10.1088/1748-9326/aba134.

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. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02326.

BELIZARIO-SILVA, Fernanda et al. **Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção – Metodologia. 1ª edição.** São Paulo: SIDAC, 2022. a. Disponível em: https://sidac.org.br/documentos/Sidac_Metodologia_v1.0.pdf. Acesso em: 5 out. 2025.

BELIZARIO-SILVA, Fernanda et al. Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: uma ferramenta para incorporar indicadores ambientais na construção civil brasileira. **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, *[S. l.]*, v. 19, p. 1–13, 2022. b. DOI: 10.46421/entac.v19i1.2034.

BERGMAN, Richard D.; PUETTMANN, Maureen; TAYLOR, Adam; SKOG, Kenneth E. The Carbon Impacts of Wood Products. *[S. l.]*, 2014. DOI: 10.13073/FPJ-D-14-00047. Disponível em: https://fpj.kglmeridian.com/view/journals/fpro/64/7-8/article-p220.xml. Acesso em: 9 set. 2025.

CHEN, Cindy X.; PIEROBON, Francesca; JONES, Susan; MAPLES, Ian; GONG, Yingchun; GANGULY, Indroneil. Comparative Life Cycle Assessment of Mass Timber and Concrete Residential Buildings: A Case Study in China. **Sustainability**, *[S. l.]*, v. 14, n. 1, p. 144, 2022. DOI: 10.3390/su14010144.

CHEN, Zhongjia; GU, Hongmei; BERGMAN, Richard D.; LIANG, Shaobo. Comparative Life-Cycle Assessment of a High-Rise Mass Timber Building with an Equivalent Reinforced Concrete Alternative Using the Athena Impact Estimator for Buildings. **Sustainability**, *[S. l.]*, v. 12, n. 11, p. 4708, 2020. DOI: 10.3390/su12114708.

CHURKINA, Galina; ORGANSCHI, Alan; REYER, Christopher P. O.; RUFF, Andrew; VINKE, Kira; LIU, Zhu; RECK, Barbara K.; GRAEDEL, T. E.; SCHELLNHUBER, Hans Joachim. Buildings as a global carbon sink. **Nature Sustainability**, *[S. l.]*, v. 3, n. 4, p. 269–276, 2020. DOI: 10.1038/s41893-019-0462-4.

CONSTRUTORA A. **PROJETO DE MÓDULOS DE SALA DE AULA ISOLADOS - FUNDEPAR**. , 2025. . Acesso em: 8 set. 2025.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

DONG, Yu; CUI, Xue; YIN, Xunzhi; CHEN, Yang; GUO, Haibo. Assessment of Energy Saving Potential by Replacing Conventional Materials by Cross Laminated Timber (CLT)—A Case Study of Office Buildings in China. **Applied Sciences**, *[S. l.]*, v. 9, n. 5, p. 858, 2019. DOI: 10.3390/app9050858.

DS EN 15804 2012+A2 2019. 2019. Disponível em: https://nmfv.dk/wp-content/uploads/2024/01/EN-15804-A2.pdf. Acesso em: 4 out. 2025.

ECO EPD Programmes - Eco Platform en. [s.d.]. Disponível em: https://www.eco-platform.org/the-eco-epd-programs.html. Acesso em: 9 out. 2025.

ENVIRONMENT, U. N. **Emissions Gap Report 2021**. 2021. Disponível em: https://www.unep.org/pt-br/resources/emissions-gap-report-2021. Acesso em: 23 maio. 2025.

ESPINOZA, O.; TRUJILLO, V. R.; MALLO, M. F. L.; BUEHLMANN, U. **Cross-laminated timber: Status and research needs in Europe: BioResources**. 2016. Disponível em: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/cross-laminated-timber-status-and-research-needs-in-europe/. Acesso em: 12 out. 2025.

GARCÍA, Katia Regina Punhagui; GONZÁLEZ BARROSO, José M.; VANDERLEY MOACYR, John. **Potencial de reducción de las emisiones de CO2 y de la energía incorporada en la construcción de viviendas en Brasil mediante el incremento del uso de la madera**. 2014. Universitat Politècnica de Catalunya, *[S. l.]*, 2014. DOI: 10.5821/dissertation-2117-95469. Disponível em: https://hdl.handle.net/2117/95469. Acesso em: 8 nov. 2025.

HUANG, Lizhen; KRIGSVOLL, Guri; JOHANSEN, Fred; LIU, Yongping; ZHANG, Xiaoling. Carbon emission of global construction sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, *[S. l.]*, v. 81, p. 1906–1916, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.001.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (ORG.). Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry. *[S. l.]*, 2018. Disponível em: https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry.

KHASREEN, Mohamad Monkiz; BANFILL, Phillip F. G.; MENZIES, Gillian F. Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review. **Sustainability**, *[S. l.]*, v. 1, n. 3, p. 674–701, 2009. DOI: 10.3390/su1030674.

KORONAKI, Antiopi et al. Designing for resilience: Modular timber schools for circular construction. **Structures**, *[S. l.]*, v. 78, p. 109041, 2025. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.109041.

KORONAKI, Antiopi; BUKAUSKAS, Aurimas; JALIA, Aftab; SHAH, Darshil U.; RAMAGE, Michael H. Prefabricated Engineered Timber Schools in the United Kingdom: Challenges and Opportunities. **Sustainability**, *[S. l.]*, v. 13, n. 22, p. 12864, 2021. DOI: 10.3390/su132212864.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

KRZOSEK, Slawomir; KŁOSIŃSKA, Teresa. CLT – material for the measure of the future. **Annals of WULS, Forestry and Wood Technology**, *[S. l.]*, v. 114, p. 76–85, 2021. DOI: 10.5604/01.3001.0015.2377.

MARZOCCHINI, Marcelo; ECHAZARRETA, Javier Martin; GULIVART, Verónica; MATHISEN, Marina Lago. Environmental Product Declarations worldwide: a case study in Argentina. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, *[S. l.]*, v. 28, n. 8, p. 955–966, 2023. DOI: 10.1007/s11367-023-02172-y.

MILLER, Sabbie A.; HORVATH, Arpad; MONTEIRO, Paulo J. M. Readily implementable techniques can cut annual CO2 emissions from the production of concrete by over 20%. **Environmental Research Letters**, *[S. l.]*, v. 11, n. 7, p. 074029, 2016. DOI: 10.1088/1748-9326/11/7/074029.

Modernas e sustentáveis: Governo já substituiu 63% das salas de aula de madeira. 2025. Disponível em: https://www.fundepar.pr.gov.br/Noticia/Modernas-e-sustentaveis-Governo-ja-substituiu-63-das-salas-de-aula-de-madeira. Acesso em: 14 out. 2025.

NBR ISO 14025: Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais de Tipo III - Princípios e procedimentos. 2015. Acesso em: 4 out. 2025.

NBR ISO 14067: Gases de efeito estufa — Pegada de carbono de produtos — Requisitos e orientações sobre quantificação. 2023. Acesso em: 4 out. 2025.

New ECO Portal| ECO Platform. , [s.d.]. Disponível em: https://eco-portal.eco-platform.org/. Acesso em: 9 out. 2025.

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. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.107.

STAPEL, Emilie Brisson; TOZAN, Buket; BIRGISDOTTIR, Harpa; SØRENSEN, C. Environmental Product Declarations – an extensive collection of availability, EN15804 revision and the ILCD+EPD format. *[S. l.]*, 2022. DOI: 10.1088/1755-1315/1078/1/012108. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/363543732_Environmental_Product_Declarations_-_an_extensive_collection_of_availability_EN15804_revision_and_the_ILCDEPD_format. Acesso em: 9 out. 2025.

TALLWOOD DESIGN INSTITUTE. **Cross-Laminated Timber Info Sheet**. [s.l.] : TallWood Design Institute, 2019. Disponível em: https://staging1.tallwoodinstitute.org/wp-content/uploads/2025/05/Cross-Laminated_Timber_Info_Sheet.pdf. Acesso em: 12 out. 2025.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, Global Alliance for Buildings and Construction. Not just another brick in the wall: The solutions exist - Scaling them will build on progress and cut emissions fast. Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025. *[S. l.]*, 2025. Disponível em: https://wedocs.unep.org/20.500.11822/47214.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, Yale Center for Ecosystems +. Architecture. Building Materials and the Climate: Constructing a New Future. *[S. l.]*, 2023. Disponível em: https://wedocs.unep.org/20.500.11822/43293.

VICTORERO, Felipe; BUSTAMANTE, Waldo. Timber Biogenic Carbon Stock in the Urban Environment: Santiago City as a Second Forest. **Sustainability**, *[S. l.]*, v. 17, n. 2, p. 529, 2025. DOI: 10.3390/su17020529.

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. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104482.

Versão Final Homologada
22/12/2025 18:30