

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

Talita Dias Vieira

**Madeira Engenheirada como Alternativa ao Concreto
em Habitações Sociais no Brasil: Perspectivas da Análise
de Energia do Ciclo de Vida**

Belo Horizonte

2025

Talita Dias Vieira

**Madeira Engenheirada como Alternativa ao Concreto em Habitações
Sociais no Brasil: Perspectivas da Análise de Energia do Ciclo de Vida**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Estevam Barbosa de Las Casas

Coorientador: Maria Teresa Paulino Aguilár

Belo Horizonte

2025

V658m

Vieira, Talita Dias.

Madeira engenheirada como alternativa ao concreto em habitações sociais no Brasil [recurso eletrônico] : perspectivas da análise de energia do ciclo de vida / Estevam Barbosa de Las Casas. - 2025.

1 recurso online (75 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Estevam Barbosa de Las Casas.

Coorientadora: Maria Teresa Paulino Aguilár.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Eficiência energética - Teses. 3. Concreto armado - Teses. 4. Sustentabilidade - Teses. I. Las Casas, Estevam Barbosa de. II. Aguilár, Maria Teresa Paulino III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ESTRUTURAS

ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS Nº: 418 DA ALUNA TALITA DIAS VIEIRA.

Às **15:00** horas do dia **15** do mês de **dezembro** de **2025**, reuniu-se em ambiente virtual, na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, a Comissão Examinadora indicada pelo Colegiado do Programa em **26 de novembro de 2025**, para julgar a defesa da Dissertação de Mestrado intitulada "**Madeira Engenheirada como Alternativa ao Concreto em Habitações Sociais no Brasil: Perspectivas da Análise de Energia do Ciclo de Vida**", cuja aprovação é um dos requisitos para a obtenção do Grau de MESTRE EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS na área de ESTRUTURAS.

Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, **Prof. Dr. Estevam Barbosa de Las Casas**, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares passou a palavra à candidata para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa da candidata. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença da candidata e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Foram atribuídas as seguintes indicações:

- (X) Aprovada
() Reprovada

Prof. Dr. Estevam Barbosa de Las Casas - DEES - UFMG (Orientador)

Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilar - DEMC - UFMG (Coorientadora)

Profa. Dra. Andréa Franco Pereira - UFMG

Prof. Dr. Paulo Henrique Ribeiro Borges - CEFET

A aprovação da aluna na Defesa de Dissertação de Mestrado não significa que a mesma tenha cumprido todos os requisitos necessários para obtenção do DIPLOMA de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Para ciência da aluna:

1. Atesto que as alterações solicitadas pela Comissão Examinadora serão cumpridas no prazo de ATÉ 60 dias corridos.
2. Atesto estar ciente que a versão corrigida da Tese/dissertação deverá ser entregue ao Repositório Institucional da UFMG, conforme orientações disponíveis em: <https://repositorio.ufmg.br/custom/instructions.jsp>

Ciente:

Talita Dias Vieira

Belo Horizonte, 15 de dezembro de 2025.

Este documento não terá validade sem a assinatura do Coordenador do Programa de Pós-Graduação.

Após a Homologação da Defesa pelo Colegiado do Programa, este documento será assinado pela Coordenação e disponibilizado à aluna.



Documento assinado eletronicamente por **Maria Teresa Paulino Aguilár, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 15/12/2025, às 17:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andrea Franco Pereira, Professora do Magistério Superior**, em 16/12/2025, às 11:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Talita Dias Vieira, Usuária Externa**, em 16/12/2025, às 17:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Henrique Ribeiro Borges, Usuário Externo**, em 17/12/2025, às 11:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Estevam Barbosa de Las Casas, Professor do Magistério Superior**, em 17/12/2025, às 13:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro Lopes da Silva, Coordenador(a)**, em 11/02/2026, às 08:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4790991** e o código CRC **110A1104**.

RESUMO

As diferenças no consumo energético ao longo do ciclo de vida de estruturas em madeira laminada colada (MLC) e em concreto armado moldado in loco foram avaliadas a partir da Análise de Energia do Ciclo de Vida (AECV), com foco nos módulos A (produção, transporte e construção) e C (fim de vida). A modelagem foi realizada no software OpenLCA, utilizando a base de dados LCA Commons e como metodologia de análise a Demanda Cumulativa de Energia. Os resultados indicaram que a MLC concentra seu maior impacto na etapa A3 (produção industrial), principalmente devido à colagem e prensagem, alcançando valores próximos de 1600 MJ. Já o concreto apresentou maior demanda energética nas etapas de transporte (A4–A5) e descarte (C), superando 1300 MJ e 1000 MJ, respectivamente, com consumo total acima de 3600 MJ. A MLC, em contraste, apresentou consumo total da ordem de 2800 MJ, com aproximadamente 37,6% associado ao transporte, enquanto no concreto esse valor chegou a 50%. Apesar da maior energia incorporada no processo industrial da madeira engenheirada, sua menor massa e cadeia logística mais simples resultaram em desempenho global mais eficiente. O estudo sugere que a MLC representa uma alternativa promissora para edificações de interesse social de baixo impacto energético no Brasil, desde que apoiada por cadeias produtivas locais, normatização adequada e políticas públicas de incentivo.

Palavras-chave: Eficiência Energética; Avaliação do Ciclo de Vida; Madeira Engenheirada; Concreto Armado; Madeira Laminada Colada; Habitação Social; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The differences in life cycle energy consumption of glued laminated timber (GLT) and cast-in-place reinforced concrete structures were assessed through a Life Cycle Energy Assessment (LCEA), focusing on modules A (production, transport, and construction) and C (end-of-life). Modeling was carried out in OpenLCA software using the LCA Commons database and Cumulative Energy Demand (CED) methodology. Results indicated that GLT concentrates its highest impact in stage A3 (industrial production), mainly due to bonding and pressing, reaching values close to 1600 MJ. Concrete, in contrast, showed greater energy demand in transport (A4–A5) and end-of-life (C) stages, exceeding 1300 MJ and 1000 MJ, respectively, with a total consumption above 3600 MJ. GLT presented a lower total consumption of around 2800 MJ, with approximately 37.6% associated with transport, while concrete this value reached 50%. Despite higher embodied energy in the industrial process of engineered wood, its lower mass and more streamlined logistics chain resulted in more efficient overall performance. The study highlights that GLT represents a promising alternative for low-energy social housing in Brazil, provided that local production chains, appropriate standards, and supportive public policies are in place.

Key words: *Energy Efficiency; Life cycle assessment; Engineering Wood; Concrete; Glued Laminated Timber; Social Housing; Sustainability.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Estrutura do processo de avaliação do ciclo de vida	20
Figura 2 — Etapas do ciclo de vida de uma edificação	21
Figura 3 — Exemplo de um sistema de dados do LCA Commons	29
Figura 4 — Planta baixa da UH, padrão MG-91-I-2-45 da COHAB Minas	37
Figura 5 — Modelo BIM da UH, padrão MG-91-I-2-45 da COHAB Minas	38
Figura 6 — Fronteira do sistema: MLC x Concreto armado	39
Figura 7 — Fases do ciclo de vida de uma edificação de Chau et al., 2015	40
Figura 8 — Fluxograma do ciclo de vida da estrutura em MLC	41
Figura 9 — Fluxograma do ciclo de vida da estrutura em concreto armado	43
Figura 10 — Consumo energético por etapa para estrutura em MLC	50
Figura 11 — Consumo energético por etapa para estrutura em concreto armado	52
Figura 12 — Comparativo de consumo energético por atividade	53
Figura 13 — Comparativo de consumo energético por etapa	54
Figura A1 — Fluxos do ciclo de vida da madeira laminada colada (MLC)	65
Figura A2 — Fluxos do ciclo de vida do concreto armado	66
Figura A3 — Processos do ciclo de vida da madeira laminada colada (MLC)	67
Figura A4 — Processos do ciclo de vida do concreto armado	67
Figura A5 — Model graph do sistema em madeira laminada colada (MLC)	69
Figura A6 — Model graph do sistema em concreto armado	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Estudos internacionais correlatos em AECV	25
Tabela 2 — Estudos nacionais correlatos em AECV	26
Tabela 3 — Matriz de pedigree para avaliação da qualidade de dados	31
Tabela 4 — Fases do ciclo de vida e impactos associados	36
Tabela 5 — Características e composição para concreto armado	44
Tabela 6 — Fluxos do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do sistema construtivo em Concreto Armado e suas correspondências em repositórios de ACV	44
Tabela 7 — Fluxos do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do sistema construtivo em Madeira Laminada Colada (MLC) e suas correspondências em repositórios de ACV	45
Tabela 8 — Estimativa de Consumo Energético do Transporte de Materiais e Resíduos para Laminada Colada	47
Tabela 9 — Estimativa de Consumo Energético do Transporte de Materiais e Resíduos para Concreto Armado	47

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Energia;
E_e	Energia Incorporada;
H_j	Entropia de um Elemento;
H_j	Entropia de um Produto;
M_p	Massa de um Produto;
$H_{máx}$	Entropia Máxima de um Elemento.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AECV	Avaliação de Energia do Ciclo de Vida
AICV	Análise de Inventário do Ciclo de Vida
AIMCV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Materiais e Testagem)
BIM	<i>Building Information Modeling</i> (Modelagem da Informação da Construção)
CA	Concreto Armado
CED	<i>Cumulative Energy Demand</i> (Demanda Energética Cumulativa)
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i> (Madeira Laminada Colada Cruzada)
COHAB-MG	Companhia de Habitação do Estado de Minas Gerais
CP-III	Cimento Portland de Alto-forno
DH	Déficit Habitacional
DOE	<i>Department of Energy</i> (Departamento de Energia)
DOT	<i>Department of Transportation</i> (Departamento de Transportes)
EE	<i>Embodied Energy</i> (Energia Incorporada)

EN	Eurocode
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> (Agência de Proteção Ambiental)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAR	Fundo de Arrendamento Residencial
FJP	Fundação João Pinheiro
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLT	<i>Glued Laminated Timber</i> (Madeira Laminada Colada)
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Internacional de Mudanças Climáticas)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i> (Análise do Ciclo de Vida)
LCEA	<i>Life Cycle Energy Assessment</i> (Análise de Energia do Ciclo de Vida)
MLC	Madeira Laminada Colada
MLCC	Madeira Laminada Colada Cruzada
MUF	Melamina-Ureia-Formaldeído
NBR	Norma Brasileira
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i> (Instituto Nacional de Tecnologia e Estandartização)
ONU	Organização das Nações Unidas
PRF	Resina Fenol-Resorcinol-Formaldeído
RPIR	<i>Relative Product-Inherent Recyclability</i> (Reciclabilidade Intrínseca Relativa do Produto)
UH	Unidade Habitacional
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i> (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Considerações Iniciais	15
1.2 Justificativa.....	17
1.3 Objetivos.....	17
1.3.1 Objetivo Geral	17
1.3.2 Objetivos Específicos	18
2 REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1 Normatizações e a Análise de Ciclo de Vida	19
2.2 ACV Simplificada	19
2.3 Estudos Correlatos.....	22
2.4 Ferramentas de Modelagem	26
2.5 Base de Dados	27
2.5.1 A abordagem do LCA Commons e o desenvolvimento de dados	28
2.6 Demanda Cumulativa de Energia.....	30
2.7 Limitações do Estudo	30
2.7.1 Avaliação da Qualidade dos Dados e a Matriz de Pedigree	30
2.8 Sistemas Construtivos	33
2.8.1 Madeira Laminada Colada (MLC).....	33
2.8.2 Concreto Armado.....	35
3 METODOLOGIA	35
3.1 ACV Simplificada.....	35
3.2 Objeto de Estudo.....	36
3.3 Unidade Funcional.....	38
3.4 Modelagem do Sistema.....	39

3.5 Energia de Transporte	46
3.6 Compilação de Dados	48
4 RESULTADOS	49
4.1 Apresentação de Resultados e Análise de Dados	49
5 CONCLUSÕES	56
5.1 Sobre o Trabalho Realizado.....	56
5.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros	58
6 REFERÊNCIAS	60
ANEXOS	65

1 INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

A construção civil é reconhecida como um dos setores de maior impacto ambiental no mundo. Considerando o ciclo de vida completo, abrangendo extração de matérias-primas, produção de materiais, transporte, construção, uso, manutenção e descarte, edificações podem representar até 34% do consumo global de energia (ONU, 2024). Essa magnitude coloca o tema em voga nas discussões sobre sustentabilidade, sobretudo em um cenário em que o aumento populacional e a urbanização intensificam a demanda por novas habitações. Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, esse desafio assume proporções ainda maiores, dada a necessidade de conciliar a ampliação da oferta habitacional a custos acessíveis com as novas demandas geradas pelas mudanças climáticas (Ministério do Meio Ambiente, 2023).

O contexto habitacional brasileiro evidencia um déficit estimado em 6,2 milhões de moradias (Fundação João Pinheiro, 2024). Programas governamentais como o Minha Casa, Minha Vida têm buscado reduzir essa lacuna, fomentando a produção de habitações economicamente viáveis. Entretanto, apesar da obrigatoriedade de o programa seguir a norma de desempenho NBR 15.575, estudos mostram que a qualidade das edificações produzidas frequentemente é limitada em termos de conforto térmico e eficiência energética, o que perpetua altos custos de operação e coloca a sustentabilidade a longo prazo em cheque (Triana et al., 2023; Bodach et al., 2020).

Outro aspecto importante é a estreita relação entre economia de energia e descarbonização do setor elétrico. De fato, a eficiência energética é vista pela Agência Internacional de Energia (IEA) como o “primeiro combustível”, ou seja, a fonte de energia mais barata e imediata para a transição a uma economia de baixo carbono (Masili, 2023). No Brasil essa premissa ganha relevância especial: embora quase 90% da eletricidade gerada no país em 2024 tenha origem em fontes renováveis, prolongados períodos de seca, agravados pela mudança climática, têm obrigado o acionamento de usinas termelétricas movidas a combustíveis fósseis para complementar a oferta energética (Ministério de Minas e Energia, 2025; Pereira et. al,

2021). O uso destas aumenta significativamente as emissões de CO₂, contrariando os esforços de descarbonização. Portanto, reduzir a demanda energética das edificações é fundamental para aliviar a pressão sobre o sistema elétrico em cenários críticos, contribuindo diretamente para o cumprimento das metas nacionais de redução de emissões de gases do efeito estufa e para a descarbonização da matriz energética do país.

O concreto armado, que é um dos sistemas construtivos mais amplamente utilizados no país, apresenta alto consumo energético associado, principalmente nas etapas de produção do cimento e transporte de insumos (Kimura et al., 2024). Além disso, seu peso elevado implica maior demanda de energia tanto em logística quanto em processos de demolição e descarte. Pesquisas brasileiras apontam que a energia incorporada em sistemas de concreto pode representar até 30% do consumo energético total da edificação (Paulsen et al., 2013). Com isso, o concreto, embora consolidado, apresenta fragilidades quando analisado sob a ótica do ciclo de vida energético.

Em contraste, a madeira engenheirada tem emergido como alternativa sustentável no Brasil, em especial no produto que possui uma cadeia de produção nacional, que é o caso da madeira laminada colada (MLC). Estudos de análise de ciclo de vida indicam que sistemas em madeira podem demandar menor energia incorporada ao longo de sua produção quando comparados a alternativas convencionais, como o concreto armado. Trabalhos internacionais como os de Sartori e Hestnes (2006), Stephan et al. (2013) e Thormark (2021) evidenciam que a utilização de madeira em edificações está associada a menores impactos energéticos iniciais, sobretudo nas fases de extração e processamento de materiais. No contexto brasileiro, pesquisas como as de Paulsen et al. (2013) e De Lara e Penteadó (2024) reforçam que a escolha de materiais com menor energia incorporada, como a MLC, pode reduzir significativamente os impactos das etapas iniciais do ciclo de vida, que chegam a representar mais de 30% do consumo energético total em habitações sociais.

1.2. Justificativa

A escolha de um sistema construtivo para a produção de habitações em larga escala é determinante não apenas para os impactos ambientais imediatos, mas também para o desempenho energético ao longo dos anos. A escassez de estudos nacionais que comparam sistemas construtivos tradicionais e alternativos sob a ótica energética compromete a formulação de diretrizes normativas e de políticas públicas adequadas ao contexto brasileiro, especialmente no que se refere à aplicação em habitação social (Paulsen et al., 2013; Bodach & Hamhaber, 2010). Essa lacuna dificulta tanto a consolidação de metodologias adaptadas às condições locais quanto a difusão de alternativas construtivas de menor impacto energético.

Nesse cenário, a madeira laminada colada surge como um material promissor no contexto brasileiro, capaz de reduzir impactos ao longo do ciclo de vida devido à sua menor densidade, cadeia produtiva mais enxuta e possibilidade de reutilização (Knop, 2023; Fonseca, 2022). Entretanto, a falta de normatização específica, de infraestrutura produtiva consolidada e de estudos aplicados em escala real limita sua adoção em larga escala. Assim, torna-se essencial investigar como o desempenho energético da madeira laminada colada se comporta em relação ao concreto armado, predominante no Brasil, a fim de fornecer subsídios técnicos e científicos para futuras decisões de projeto, políticas públicas e estratégias de sustentabilidade na construção civil (de Lara & Penteado, 2024; Kumar, 2024).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos Gerais

O objetivo geral da pesquisa é comparar a energia ao longo do ciclo de vida do concreto armado moldado *in loco* e da madeira laminada colada (MLC), a fim de identificar qual sistema construtivo apresenta maior eficiência energética e menor impacto ambiental. Considerou-se no estudo uma habitação popular construída em Belo Horizonte.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar o objeto de estudo e a unidade funcional, definindo a unidade habitacional social representativa e estabelecendo a equivalência funcional entre os sistemas em concreto armado e madeira laminada colada;
- Modelar os sistemas construtivos, estruturando os fluxos de materiais, processos e resultados associados às fases de produção, construção e fim de vida, com base em normas internacionais e bases de dados reconhecidas;
- Quantificar e comparar o consumo energético dos dois sistemas construtivos, identificando diferenças de desempenho e pontos críticos ao longo do ciclo de vida;
- Discutir as implicações dos resultados para a sustentabilidade e a eficiência energética, considerando a relevância do tema no contexto da construção habitacional brasileira.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Normatizações e a Análise de Ciclo de Vida

O conceito de estudos do ciclo de vida foi desenvolvido principalmente nas décadas de 1970 e 1980, com foco na quantificação de energia, materiais usados e resíduos gerados ao longo do ciclo de vida. A Organização Internacional para Padronização (ISO) adotou nos anos 1990 normas de gestão ambiental, com a série ISO 14040. A partir dela, foram criados sistemas de análise para fins específicos. (Sharma, 2011) Um desses sistemas é a Análise de Energia do Ciclo de Vida, uma abordagem usada para avaliar a quantidade total de energia consumida ao longo de todo o ciclo de vida. No contexto de edificações, a AECV mede a energia incorporada, que é referente a fase de produção dos materiais primas e construção do objeto de estudo, a energia operacional ao longo de um determinado ciclo de vida e a energia gasta para a manutenção, até o descarte ou reciclagem no final da vida útil. A AECV é especialmente relevante no setor da construção, onde a energia incorporada nos materiais e a energia operacional (usada para aquecimento, ventilação, iluminação etc.) têm impactos significativos. Ao integrar essa análise com outras avaliações ambientais, como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a AECV serve como ferramenta para o desenvolvimento de edifícios mais eficientes e sustentáveis.

2.2. ACV Simplificada

As normatizações internacionais para o ACV são abordadas na ISO 14040, que define a estrutura geral para a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), estabelecendo as quatro fases principais: definição de objetivo e escopo, análise de inventário do ciclo de vida (AICV), avaliação de impacto do ciclo de vida (AIMCV) e interpretação. Já a ISO 14044 complementa a ISO 14040, fornecendo requisitos detalhados e diretrizes específicas para a execução de cada uma dessas fases, descrevendo como realizar cada etapa, quais métodos utilizar e como interpretar os resultados obtidos, garantindo a

consistência e qualidade do processo de ACV. A Figura 1 demonstra a estrutura da avaliação do ciclo de vida.



Figura 1: Estrutura do Processo de Avaliação do Ciclo de Vida (NBR 14044, 2022).

No Brasil, a ABNT NBR ISO 14044:2022 é a versão nacional da norma ISO 14044, assim como a ABNT NBR ISO 14040:2022 é equivalente à ISO 14044. No entanto, não há uma normatização específica, tanto nas normas ISO quanto na NBR, para a Análise de Energia do Ciclo de Vida (AECV) ou Life Cycle Energy Assessment (LCEA). A realização de AECV/LCEA é baseada em diretrizes e abordagens propostas por diversos estudos na literatura científica.

Uma ACV pode possuir tipos diferentes de escopo de trabalho como por exemplo produtos, serviços ou outros tipos de objetivos. Uma análise completa de ACV para uma edificação usualmente inclui os itens apresentados na Figura 2.

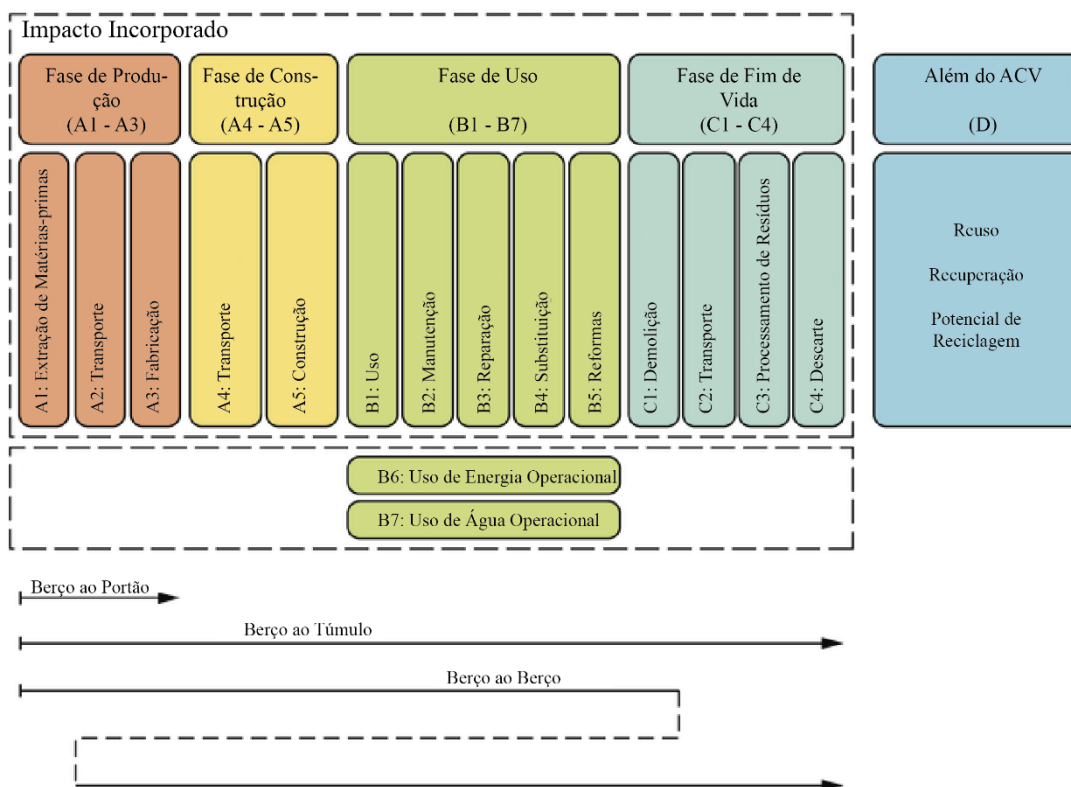


Figura 2: Etapas do ciclo de vida de uma edificação. (Apellániz, 2024).

A Avaliação de Energia do Ciclo de Vida (AECV) é uma metodologia utilizada para avaliar o consumo total de energia de um produto ou serviço ao longo de todo o seu ciclo de vida. O ciclo de vida de um produto ou material pode ser dividido em várias etapas, cada uma delas representando diferentes fases de sua existência, desde a extração de matérias-primas até a sua disposição final (Sharma, 2011). Trata-se de uma versão simplificada da Análise de Ciclo de Vida (ACV), que se concentra exclusivamente no consumo de energia em cada etapa do ciclo de vida de um produto ou construção. Enquanto o ACV tradicional avalia diversos impactos ambientais, como emissões de carbono, uso de água e poluição do ar, o AECV foca em calcular a energia necessária para a extração, manufatura, transporte, construção, manutenção e descarte dos materiais. A análise com o enfoque apenas na eficiência energética é uma simplificação que permite uma análise mais direta do impacto energético, e foi adotada neste trabalho em virtude da inviabilidade prática de realizar uma ACV completa com os dados atualmente disponíveis no contexto brasileiro.

2.3. Estudos Correlatos

A produção de edificações de baixo custo no Brasil enfrenta um problema sistêmico relacionado à qualidade construtiva, sobretudo no que se refere ao desempenho térmico e energético. A Portaria 660, que adota a norma de desempenho NBR 15575 para habitação social no âmbito do programa Minha Casa Minha Vida, representa um avanço regulatório. Entretanto, estudos apontam que, mesmo com essa normatização, o conforto dos usuários ainda não está garantido (Triana et al., 2023). Em regiões de clima quente, como João Pessoa, Paraíba, mais de 78,8% dos dias do ano apresentam desconforto térmico, impactando diretamente a saúde e o bem-estar dos moradores (Bodach et al., 2020; Flamant et al., 2022). Esse baixo desempenho conduz ao uso frequente de climatização artificial, ampliando o consumo de energia elétrica em um contexto em que 26,4% da energia consumida no Brasil provém do setor residencial.

A literatura internacional sobre Avaliação do Ciclo de Vida Energética (LCEA) demonstra que a fase de uso (fase B) é, em geral, a mais representativa no consumo energético das edificações. Ramesh (2010) destaca que até 80% do consumo total de energia pode ocorrer durante a operação, o que evidencia a importância do desempenho térmico dos materiais e soluções construtivas. Esse padrão é observado em países desenvolvidos, especialmente de clima frio, onde o aquecimento representa a principal demanda. Trabalhos como os de Sartori e Hestnes (2006) na Noruega, Thormark (2021) na Suécia e Stephan et al. (2013) na Austrália reforçam que a maior parcela de energia está vinculada ao uso, relegando a extração, produção e construção (fase A) a um papel secundário. Kumar (2024), em estudo realizado no Nepal, reforça essa tendência, embora ressalte a importância de analisar cada contexto climático e social de forma particular.

Por outro lado, os estudos brasileiros apontam uma dinâmica distinta. Paulsen et al. (2013) identificaram que a energia incorporada (EE) pode representar até 30% do consumo total ao longo do ciclo de vida das habitações do Minha Casa, Minha Vida — uma proporção mais elevada do que a média de 11% a 26% observada nos estudos internacionais. Além disso, aproximadamente 60% da energia incorporada concentra-se nos sistemas de fechamento (paredes). Esses resultados indicam que, no Brasil, as fases de extração e produção (fase A) possuem peso relativamente maior, o que

também foi confirmado por De Lara e Penteado (2024), que observaram que essas etapas concentram cerca de 90% dos impactos ambientais em diferentes cenários de construção.

Estudos complementares reforçam esse panorama. Bodach e Hamhaber (2010) destacam que a manutenção e substituição de materiais ao longo do ciclo de vida contribuem de forma expressiva para o aumento da energia incorporada, indicando que a durabilidade e a qualidade inicial dos sistemas construtivos são fatores decisivos para a eficiência energética global. Além disso, Thormark (2021) evidencia que o potencial de reciclagem pode representar até 35–40% da energia incorporada, sugerindo que estratégias de reuso e reaproveitamento têm papel importante para a redução do consumo total.

No campo da fase de uso (Fase B), a literatura internacional apresenta resultados variados quando comparados diferentes sistemas construtivos. Em climas frios ou temperados, a madeira laminada colada (MLC) ou CLT (cross laminated timber) tende a apresentar melhor desempenho energético. Setters et al. (2019) mostraram reduções de até 18% nos custos anuais de energia e 20% na demanda de pico em residências nos EUA quando comparadas a sistemas convencionais leves. Jensen et al. (2020) também relataram economias de 20–37% em aquecimento e resfriamento em edifícios de CLT em comparação ao concreto. Esses ganhos são atribuídos à baixa condutividade térmica e à maior estanqueidade da madeira.

Por outro lado, em climas tropicais, o concreto armado pode oferecer vantagens relacionadas à sua elevada inércia térmica. O DOE (2022) demonstrou que edifícios em concreto consomem 2–7% menos energia de climatização em comparação a construções em CLT em regiões de clima quente, enquanto Dong et al. (2019) observaram aumento da demanda de resfriamento em edifícios de madeira nas regiões mais quentes da China. Resultados adversos foram observados em simulações brasileiras: Maildel et al. (2020) verificaram que edifícios em MLC em Curitiba apresentaram consumo energético 6% menor do que equivalentes em concreto, enquanto Knop et al. (2023) confirmaram melhor desempenho da madeira em zonas bioclimáticas frias (ZB1 e ZB4) e apenas desempenho mínimo em zonas quentes (ZB7 e ZB8). Kohl et al. (2023), em contrapartida, identificaram que paredes de concreto

armado demandaram 191 horas anuais a menos de aquecimento do que paredes de alvenaria convencional, destacando os efeitos positivos da inércia térmica do concreto.

Ainda dentro da Fase B, estudos sobre manutenção (B2), reparo (B3) e substituição (B4) demonstram que esses módulos podem representar grande parcela do consumo acumulado. Karimpour (2014) estimou que a manutenção de uma casa de 72 m² em GLT corresponde a 12.000 MJ em 25 anos (6,66 MJ/m² ano). Já Bertoli et al. (2024) demonstraram que substituições (B4) podem representar mais de 75% do Cumulative Energy Demand (CED) total de um edifício em GLT ao longo de 50 anos, evidenciando o impacto significativo dessa subfase.

Na etapa D (além do ciclo de vida), surgem discussões sobre reciclabilidade e reuso. Um dos principais indicadores aplicados é o Relative Product-Inherent Recyclability (RPIR), que mede o potencial de desmontagem e reaproveitamento de materiais (Roithner et al., 2021). Aplicado à construção, esse índice revela que estruturas em GLT podem alcançar até 96% de reciclabilidade quando projetadas com conexões mecânicas em vez de adesivos (Roithner et al., 2022). Esse desempenho supera o do concreto, que atinge cerca de 88% mesmo sob desmontagem total. Entretanto, desafios técnicos permanecem: o uso de adesivos e selantes compromete a separação dos materiais, além de introduzir riscos ambientais e sanitários (Ranttila, 2024).

Soluções recentes têm buscado superar essas barreiras. Joung (2024), por exemplo, desenvolveu uma viga híbrida GLT-aço desmontável, unida por parafusos autoatarraxantes, que demonstrou elevado desempenho estrutural e total reaproveitamento dos componentes após desmontagem. Ainda assim, questões normativas e regulatórias permanecem, sobretudo quanto à certificação de produtos reaproveitados, como observado na Finlândia (Ranttila, 2024). Além disso, problemas de contaminação química em GLTs antigos — tratados com substâncias como creosoto ou CCA — reforçam a necessidade de auditorias específicas antes do reuso.

No contexto brasileiro, esses estudos apontam lacunas relevantes: (i) ausência de dados sistematizados sobre energia incorporada em edificações de habitação social, (ii) incerteza quanto ao desempenho comparativo de concreto e madeira laminada em diferentes zonas bioclimáticas e (iii) inexistência de parâmetros normativos claros para o reuso e reciclagem de componentes estruturais. Portanto, a análise comparativa

proposta neste trabalho busca contribuir para preencher essas lacunas, avaliando o ciclo de vida energético de sistemas construtivos aplicáveis à habitação social no Brasil e oferecendo subsídios técnicos para políticas públicas e inovações na construção civil.

Apontados os estudos, a Tabela 1 a seguir aponta os principais aspectos de cada um dos estudos correlatos analisados no contexto internacional, enquanto a Tabela 2 estabelece a mesma relação entre trabalhos no contexto brasileiro.

Tabela 1 – Estudos Internacionais Correlatos em AECV

Autor	Ano	País	Vida Útil (anos)	Fases ACV	Limites do Sistema
Sartori & Hestnes (2006)	Noruega	Edificação Mista	80	A, B	Fase de uso concentra maior parcela do consumo energético.
Ramesh et al. (2011)	Índia	Residência unifamiliar	75	B	Fase operacional representa até 80% do consumo energético total.
Stephan et al. (2013)	Austrália	Residências Unifamiliares e multifamiliares	100	A, B	Uso predominante da energia; fases iniciais menos representativas.
Karimpour (2014)	Austrália	Residenciais Unifamiliares GLT	25	B2	Energia de manutenção \approx 12.000 MJ (6,66 MJ/m ² .ano).
Setters et al. (2019)	EUA	Residenciais Unifamiliares	-	B	MLC reduziu até 18% custos anuais de energia e 20% da demanda de pico.
Dong et al. (2019)	China	Residenciais Unifamiliares	-	B	CLT eficiente em regiões frias; aumenta demanda de refrigeração em climas quentes.
Jensen et al. (2020)	EUA	Edificação Mista	-	B	CLT demandou 20–37% menos energia para aquecimento e resfriamento que concreto.
Thormark (2021)	Suécia	Residência Multifamiliar	50	B, C, D	Potencial de reciclagem representa 35–40% da energia incorporada.
Roithner et al. (2021; 2022)	Áustria	Estruturas GLT	-	D	RPIR até 96% em GLT com conexões mecânicas, contra 88% em concreto.
Song et al. (2022)	China	Edificação Mista	-	A, B	CLT reduz cargas de aquecimento em regiões frias; aumenta demanda de resfriamento em verões quentes.
Kumar (2024)	Nepal	Residencial unifamiliar	50	A, B	Fase de uso predomina; necessidade de análise regional.
Bertoli et al. (2024)	Itália	Edificação em GLT	50	B4	Substituições responderam por >75% do CED total.
Ranttila (2024)	Finlândia	Estruturas GLT e MLC	-	D	Barreiras normativas e riscos de contaminação química limitam reuso.
Joung (2024)	Coreia do Sul	Estrutura GLT-aço	-	D	Solução desmontável sem adesivos, elevada reciclabilidade e resistência residual.

Tabela 2 – Estudos Nacionais Correlatos em AECV

Autor / Ano	Local	Tipologia	Vida Útil (anos)	Fases ACV	Resultados principais
Paulsen et al. (2013)	Brasil	Habitação Social (MCMV)	-	A	Energia incorporada (EE) = 30% do total, acima da média internacional; 60% da EE nas paredes.
Bodach & Hamhaber (2010)	Brasil	Residência Unifamiliar	-	A, B	Manutenção e substituição elevam significativamente a EE no ciclo de vida.
Bodach et al. (2020)	João Pessoa (PB)	Habitação Social (MCMV)	-	B	78,8% dos dias do ano com desconforto térmico; alto uso de climatização.
Flamant et al. (2022)	Brasil	Habitação Social (MCMV)	-	B	Baixa eficiência térmica e acústica em habitação social.
De Lara & Penteado (2024)	Brasil	Residência Unifamiliar	50	A, B	Etapas de extração e produção concentram 90% dos impactos ambientais.
Maildel et al. (2020)	Curitiba (PR)	Residência Unifamiliar	-	B	Consumo anual ~6% menor em MLC comparado a blocos cerâmicos/concreto.
Knop et al. (2023)	Curitiba (PR); Brasília (DF); Recife (PE); Teresina (PI).	Residência Unifamiliar	-	B	CLT eficiente em regiões frias (ZB1, ZB4), desempenho apenas mínimo em zonas quentes (ZB7, ZB8).
Kohl et al. (2023)	Rio Grande do Sul	Residência Multifamiliar	-	B	Concreto armado demandou 191 h/ano a menos de aquecimento que alvenaria tradicional.
Triana et al. (2023)	Brasil	Habitação Social (MCMV)	-	B	NBR 15575 ainda não garante conforto; baixa eficiência energética em projetos padronizados.

2.4. Ferramentas de Modelagem

Na literatura sobre Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), diversas ferramentas de modelagem computacional têm sido desenvolvidas para apoiar a quantificação dos impactos ambientais, sociais e econômicos de produtos, processos e sistemas ao longo de seu ciclo de vida. Entre os softwares mais utilizados globalmente destacam-se SimaPro, GaBi, openLCA, Umberto e Athena, cada um com características, vantagens e limitações específicas que influenciam sua escolha conforme o contexto da análise. SimaPro é amplamente reconhecido como uma das ferramentas LCA líderes de mercado, oferecendo robustez metodológica, extensa compatibilidade com bases de dados (por exemplo, Ecoinvent) e múltiplos métodos de

avaliação, sendo muito utilizado em pesquisas acadêmicas, consultorias e indústrias que demandam análises detalhadas e de alto rigor técnico. GaBi, por sua vez, é uma plataforma comercial com forte aplicação industrial, ampla cobertura de dados e suporte a declarações ambientais de produto (EPDs), embora seu custo e complexidade possam ser barreiras para alguns usuários. openLCA representa uma alternativa gratuita e de código aberto, bastante flexível em termos de compatibilidade com diversas bases de dados internacionais e adequada para instituições acadêmicas ou projetos com restrições orçamentárias, ainda que possa exigir maior familiaridade técnica por parte do usuário. Ferramentas como Umberto e Athena têm aplicações específicas – o primeiro com detalhamento de fluxos energéticos e visualizações com redes tipo Petri, e o segundo com integração direta a plataformas BIM para facilitar ACV de edifícios e elementos da construção civil. Além dessas ferramentas de software, a disponibilidade e escolha de bases de dados de inventário de ciclo de vida (LCI), como Ecoinvent, GaBi DB, PEF e bases setoriais regionais (por exemplo, bases específicas para produtos de construção), influenciam diretamente a qualidade, representatividade e comparabilidade dos resultados de ACV.

O OpenLCA é uma plataforma gratuita para análise do ciclo de vida desenvolvida pela empresa alemã GreenDelta, desde 2006. Ele permite a construção de modelos computacionais para quantificar impactos ambientais, sociais e econômicos com base em inventários de ciclo de vida e métodos de avaliação de impacto, em compatibilidade com as Normas ISO. (Ciroth, 2006). O software se trata de uma plataforma gratuita, acessível e utilizada por diversos pesquisadores ao redor do mundo. Ela também conta com uma flexibilidade metodológica para analisar tipos diversos de produtos, serviços, edificações e outros. Além disso, por se tratar de um software de código aberto, permite personalização e apresenta transparência nos cálculos, além da compatibilidade com diversas bases de dados internacionais como ecoinvent, Agribalyse, USLCI, entre outras.

2.5. Base de Dados

A LCA Commons é uma base de dados mantida pelo governo norte americano. A iniciativa visa a padronização, coordenação e disseminação pública de dados de ACV. Tal base é mantida por diversas agências federais norte-americanas, entre elas o Departamento de Agricultura (USDA), o Departamento de Energia (DOE), a Agência de Proteção Ambiental

(EPA), o Departamento de Transportes (DOT) e o Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST), que trabalham em conjunto para a criação, verificação e disponibilização dos dados. A criação do LCA Commons e consequentemente a formalização da parceria entre as agências se deu por meio de um Memorando de Entendimento (ou S3 Action Memo, na sigla em inglês), que estabelece diretrizes para a governança, manutenção e aprimoramento da plataforma, que segue em constante desenvolvimento. (UNITED STATES. Department of Energy, 2024)

2.5.1. A abordagem do LCA Commons e o desenvolvimento de dados

Segundo Kahn, 2022, compatibilizar modelos criados por diferentes pessoas e instituições, com diferentes objetivos, em uma única base de dados consistente é um desafio antigo para obter bases de dados em ACV. O principal desafio envolve garantir dois aspectos:

1. Que os modelos distribuídos sejam compatíveis para uso conjunto.
2. Que o sistema de informação consiga reconhecer e resolver as conexões entre eles.

Tal compatibilidade ocorre quando há a coordenação entre os órgãos envolvidos já na definição de objetivo e escopo do LCA, antes da coleta e modelagem de dados. Já o sistema de informação precisa que todos adotem tecnologias e padrões consistentes entre si. Para garantir isso os desenvolvedores e pesquisadores usam objetos de referência que são padronizados para diversos softwares, como unidades, fluxos e localização geográfica, todos identificados por UUIDs (Identificadores Universais Únicos).

O diagrama de um sistema de geração, transmissão e distribuição de energia apresentado na Figura 3 é um exemplo de como o LCA Commons gerencia os dados. As caixas azuis indicam processos ou subsistemas internos, como as diversas formas de geração (eólica, solar, gás natural, hidrelétrica, carvão e nuclear), além da transmissão e distribuição. As caixas laranjas representam processos ou subsistemas externos que fornecem insumos essenciais, como energia, transporte, combustível e infraestrutura. As setas azuis indicam os fluxos de materiais, energia ou serviços entre os processos. Por fim, as caixas verdes mostram os destinatários finais do sistema: outras autoridades conectadas e os consumidores.

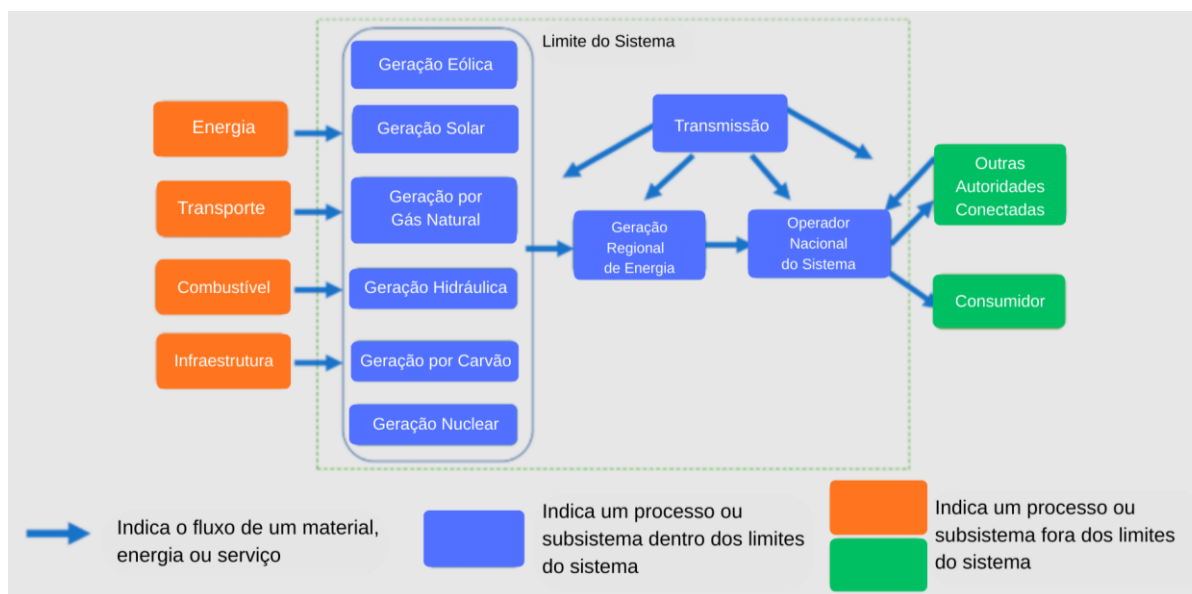


Figura 3: Exemplo de um Sistema de Dados do LCA Commons (Kahn, 2022).

Como não há uma autoridade central que mantenha um banco de dados federal unificado, cada organização é responsável por manter seus próprios modelos. O LCA Commons disponibiliza os dados em repositórios separados que se referenciam entre si por meio de fluxos comuns, mas não formam um produto LCA único e consolidado, ou seja, apesar da coordenação existente, isso não garante que os dados publicados pelo LCA Commons estejam totalmente prontos para uso. O usuário final precisa construir seu próprio sistema LCA, revisar a documentação e verificar se os modelos são adequados ao seu propósito e a metodologia a ser seguida.

O conceito de Product System, ou seja, o sistema de produto, ajuda a ilustrar isso: consiste em um conjunto de processos ou subsistemas interligados por trocas de materiais, energia ou serviços. Cada processo representa uma atividade econômica ou produtiva. Esses sistemas geralmente são modelados como uma árvore, onde cada um dos nós são processos e seus galhos representam as trocas (fluxos) de materiais ou energia, por exemplo: "Eletricidade AC 120V" ou "Papel reciclado".

Na prática, as partes do sistema costumam ser desenvolvida por especialistas diferentes. Assim, para conectar esses componentes, é fundamental que as qualidades dos fluxos entre os modelos sejam consistentes. O LCA Commons conecta esses processos através de Flows, ou em português, objetos de fluxo. Programas de modelagem de sistemas, como por exemplo o openLCA, que é o software utilizado nessa pesquisa, fazem essas conexões automaticamente, se os fluxos forem especificados corretamente.

Após a estruturação do sistema em blocos de produtos, que, por sua vez, são formados por fluxos específicos dentro de cada um desses blocos, a base de dados pode ser utilizada de maneira dinâmica, em metodologias diversas abrangendo as mais variadas cadeias produtivas.

2.6. Demanda Cumulativa de Energia

Demanda Cumulativa de Energia ou Cumulative Energy Demand (CED), ou Demanda Energética Cumulativa, é uma metodologia amplamente utilizado na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para quantificar o total de energia necessária ao longo de todas as etapas do ciclo de vida de um produto, processo ou sistema. Esse conceito inclui não apenas a energia diretamente consumida durante o uso, mas também a energia incorporada aos materiais e processos desde a extração de recursos naturais até a disposição final dos resíduos. O CED é expresso em unidades de energia, normalmente megajoules (MJ), por unidade funcional do sistema analisado, podendo ser desagregado segundo diferentes vetores energéticos, como energia fóssil, nuclear e renovável.

Segundo Frischknecht et al. (2015), o CED representa uma das métricas mais importantes na análise ambiental de produtos, especialmente em setores onde o consumo de energia é determinante para a magnitude dos impactos ambientais. Ele fornece uma visão quantitativa do montante de energia requerida, permitindo comparações diretas entre alternativas tecnológicas ou de materiais.

Um dos principais usos do CED é identificar pontos críticos de consumo energético nos sistemas produtivos, possibilitando a proposição de estratégias para a redução do consumo de energia e, conseqüentemente, das emissões associadas de gases de efeito estufa (GEE). Embora o CED não forneça diretamente uma avaliação dos impactos ambientais, ele é frequentemente usado como um indicador simplificado de eficiência energética e de sustentabilidade.

2.7. Limitações do Estudo

2.7.1 Avaliação da Qualidade dos Dados e a Matriz de Pedigree

A matriz de pedigree é uma ferramenta qualitativa para avaliar a qualidade das fontes de dados em inventários de ciclo de vida (LCI). Essa metodologia é empregada na obtenção do grau de incerteza em bases de dados diversas, como é o caso do LCA Commons.

A metodologia, criada e descrita por Weidema e Wesnæs (1996), classifica a qualidade dos dados com base em critérios. Em vez de apenas atribuir um valor numérico de incerteza a cada fluxo (por exemplo, emissão ou consumo de recurso), a matriz de pedigree atribui a cada fluxo cinco indicadores de qualidade, cada um com pontuações de 1 (melhor) a 5 (pior), que são:

- **Confiabilidade (Reliability):** avalia se os dados são verificados por medições, se vêm de estimativas qualificadas ou de dados não verificados.
- **Completeness (Completeness):** considera se os dados cobrem todas as fontes relevantes para o mercado, ou apenas alguns sites ou períodos limitados.
- **Correlação temporal (Temporal correlation):** indica a proximidade temporal entre o ano de referência do estudo e o ano em que os dados foram coletados ou estimados.
- **Correlação geográfica (Geographical correlation):** avalia se os dados se referem exatamente à região do estudo, a uma área similar ou a áreas muito diferentes.
- **Correlação tecnológica (Technological correlation):** mede se os dados se originam de processos com tecnologia idêntica à do estudo ou se vêm de processos relacionados, mas com tecnologia diferente.

A Tabela 3 apresenta a relação entre cada um dos indicadores e exemplos de padrões de dados correspondentes a cada pontuação.

Tabela 3 - Matriz de Pedigree para Avaliação da Qualidade de Dados. Weidema (2014), adaptado.

Indicador/ Pontuação	1	2	3	4	5 (padrão)
Confiabilidade	Dados verificados com base em medições	Dados verificados parcialmente baseados em suposições ou dados não verificados baseados em medições	Dados não verificados parcialmente baseados em suposições	Estimativa qualificada (ex.: por especialista da indústria)	Estimativa não qualificada
Completeness	Dados representativos de uma amostra suficiente de locais, por um período adequado para compensar flutuações normais	Dados representativos de menos locais, mas por períodos adequados	Dados representativos de um número adequado de locais, mas por períodos mais curtos	Dados representativos de menos locais e períodos mais curtos ou dados incompletos de um número adequado de locais e períodos	Representatividade e desconhecida ou dados incompletos de menos locais e/ou de períodos mais curtos
Correlação temporal	Menos de 3 anos de diferença em relação ao ano do estudo	Menos de 6 anos de diferença	Menos de 10 anos de diferença	Menos de 15 anos de diferença	Idade dos dados desconhecida ou mais de 15 anos de diferença

Correlação geográfica	Dados da área estudada	Dados médios de uma área maior que inclui a área estudada	Dados da área com condições de produção semelhantes	Dados da área com condições de produção ligeiramente semelhantes	Dados de área desconhecida ou área com condições de produção muito diferentes
Correlação tecnológica adicional	Dados de empresas, processos e materiais estudados	Dados de processos e materiais estudados, mas de empresas diferentes	Dados de processos e materiais estudados, mas de tecnologia diferente	Dados de processos ou materiais relacionados, mas com a mesma tecnologia	Dados de processos ou materiais relacionados, mas com tecnologia diferente

A avaliação dos dados provenientes do LCA Commons indica um nível de confiabilidade alto, evidenciado pelo fato de a maioria das matrizes de dados apresentar notas variando entre 1 e 2 na matriz de pedigree. No que se refere à completude, os valores situam-se predominantemente entre 1 e 3. A correlação temporal apresenta limitações, uma vez que os dados disponíveis abrangem o período de 2011 a 2022, representando um intervalo entre 3 e 14 anos em relação ao ano de referência da modelagem, 2025. Essa defasagem temporal pode introduzir distorções nos resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), especialmente em setores cuja matriz energética, processos produtivos e padrões tecnológicos tenham sofrido modificações significativas ao longo do período.

A correlação tecnológica demonstra resultados satisfatórios, visto que os processos descritos nos conjuntos de dados analisados apresentam similaridade com aqueles empregados pelas indústrias avaliadas no contexto nacional. De forma análoga, a categoria de transporte apresenta equivalência metodológica, podendo ser parametrizada conforme os métodos e práticas adotados no país.

A principal limitação identificada na matriz de pedigree refere-se à correlação geográfica, pois parte significativa dos dados utilizados tem origem em matrizes globais, norte-americanas ou latino-americanas, não refletindo plenamente a realidade brasileira. Essa discrepância geográfica, aliada à defasagem temporal, pode aumentar o grau de incerteza dos resultados, comprometendo a precisão na representação de impactos ambientais em contextos locais. Entretanto, uma análise qualitativa permite constatar que, apesar dessas limitações, as demais variáveis demonstram alinhamento com as condições tecnológicas e operacionais do contexto nacional, possibilitando uma aproximação representativa da realidade brasileira. Ainda assim, recomenda-se cautela na interpretação dos resultados e, sempre que possível, a substituição por inventários primários ou regionais atualizados, de modo a reduzir as incertezas associadas à modelagem.

2.8. Sistemas Construtivos

2.8.1 Madeira Laminada Colada (MLC)

A madeira laminada colada, conhecido no Brasil como madeira laminada colada (MLC) e no exterior como Glulam ou Glued Laminated Timber (GLT), é sistema construtivo onde seu principal material é composto por lâminas de madeira que são unidas com adesivos estruturais, geralmente com as fibras alinhadas no mesmo sentido. Esse processo confere à MLC alta resistência mecânica, estabilidade dimensional e versatilidade arquitetônica. O material atualmente pode ser utilizado em aplicações diversas, inclusive para vencer grandes vãos ou mesmo criar elementos retos ou curvilíneos. Hoje o MLC é visto como uma alternativa eficiente e sustentável em diversas aplicações estruturais.

Segundo Knop (2023) no Brasil, o uso do MLC ainda está em fase de crescimento, impulsionado pelo crescente interesse em soluções construtivas mais sustentáveis e modulares. A madeira tem ganhado destaque nas discussões sobre construção ecológica. No entanto, o uso do material ainda enfrenta desafios em âmbito nacional, podemos citar como exemplos a falta de mão de obra especializada entre profissionais da construção civil, a necessidade de que as normas específicas sejam mais difundidas e uma cadeia produtiva que ainda está em desenvolvimento.

A norma NBR 7190, que trata do projeto de estruturas de madeira, fornece uma base técnica, mas ainda há necessidade de avanços normativos específicos para madeira engenheirada como o GLT. Paralelamente, iniciativas acadêmicas e institucionais têm promovido o uso desse material.

No Brasil, não existe uma norma específica voltada para selantes e impermeabilizantes para madeiras com função estrutural. Nos Estados Unidos, eles são pautados pela ASTM D2559 2018 - Standard Specification for Adhesives for Bonded Structural Wood Products, que define as especificações para adesivos usados em produtos de madeira laminada estrutural destinados a condições de exposição externa. Essa norma assegura que os adesivos, incluindo a PRF, sejam apropriados a resistência contra intempéries. A resina fenol-resorcinol-formaldeído (PRF) é amplamente utilizada na produção de madeira laminada colada (GLT) devido à sua alta resistência mecânica e durabilidade, especialmente em ambientes externos. Sua

resina é conhecida por sua capacidade de cura a temperaturas ambiente, o que a torna ideal para processos industriais sem necessidade de aquecimento adicional. Na produção de madeira laminada colada (MLC) ou GLT, a proteção contra a umidade — ou seja, a impermeabilização — é essencial para garantir durabilidade e desempenho estrutural ao longo do tempo, especialmente quando a aplicação ocorre em ambientes externos ou sujeitos a variações climáticas. Embora a resina MUF (melamina-ureia-formaldeído) empregada na colagem das lamelas ofereça certa resistência à umidade, ela não constitui, por si só, um sistema completo de proteção contra a ação da água. Para assegurar a integridade dos elementos estruturais, a estratégia mais comumente adotada é a aplicação de acabamentos superficiais, como selantes e revestimentos protetores.

Os fixadores em sistemas construtivos em MLC são itens importantes para definir a estabilidade global da estrutura. Dentre os elementos mais utilizados para tal, destacam-se os parafusos auto-atarraxantes, que se sobressaem por sua alta resistência ao cisalhamento e à tração, além da facilidade de aplicação mesmo em ângulos variados, muitas vezes sem necessidade de perfuração. De acordo com Fonseca (2022), esses fixadores são amplamente utilizados em obras de madeira engenheirada.

Além dos conectores previstos pela NBR 7190 como parafusos, conectores metálicos, chapas perfuradas e cantoneiras, também são utilizados tirantes e peças customizadas, que são largamente utilizados na montagem de elementos em MLC, especialmente em estruturas de maior porte. Esses componentes têm a função de transmitir com eficiência os esforços de momento fletor, cisalhamento e tração entre os elementos estruturais, permitindo também manutenções e ajustes durante a execução da obra.

Embora os pregos sejam menos utilizados em MLC, ainda possuem papel relevante em outras tipologias de madeira engenheirada, como no sistema de madeira laminada pregada (MLP), onde as lamelas são unidas por pregos em vez de adesivos. Segundo informações da Rewood (2023), uma empresa brasileira especializada em madeira engenheirada, essa tecnologia nacional está em desenvolvimento para aplicação em painéis estruturais, apresentando vantagens como simplicidade produtiva e viabilidade em soluções modulares e de menor escala. Esse sistema também se

mostra relevante quando consideramos que a cola representa um dos maiores desafios no reaproveitamento de peças de madeira engenheirada.

2.8.2 Concreto Armado

O concreto armado combina a resistência à compressão do concreto com a resistência à tração do aço, formando um compósito estrutural altamente eficiente. Para este trabalho foi considerado o Cimento CP-III, também conhecido como Cimento Portland de Alto-forno, devido à sua ampla utilização dentro do território mineiro. Até meados de 2018 o material era normatizado pela ABNT NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno, porém passou por uma atualização a fim de se alinhar com padrões internacionais, unindo assim todas as categorias de cimento Portland em uma única norma - ABNT NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos.

A Companhia Siderurgica Nacional define que o CP-III possui em sua composição de 35% a 70% de escória de alto-forno. Apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, além de baixo calor de hidratação, assim como alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, além de ser resistente a sulfatos. É menos poroso e mais durável (CSN, 2024). O material se alinha com os objetivos de sustentabilidade analisados no trabalho, devido ao fato do CP III (alto-forno) e a substituição parcial do clínquer por escória reduz a emissão de CO₂ em sua produção, além de outras características maior durabilidade em ambientes agressivos.

3 METODOLOGIA

3.1. ACV Simplificada

Não há uma regra definida para a análise de energia de ciclo de vida, ela se consolida como uma ACV simplificada baseada nas normatizações internacionais e em metodologias usualmente aplicadas dentro da comunidade científica

A metodologia simplificada de ACV prevista por Chau, et al. (2015) não considera a energia de transporte dentro da análise. Entretanto, diversos autores (Kumar, 2024; Song, 2022; Stephan et al. 2013) consideram tal item, devido ao impacto gerado dentro do escopo da análise de energia do ciclo de vida. A metodologia

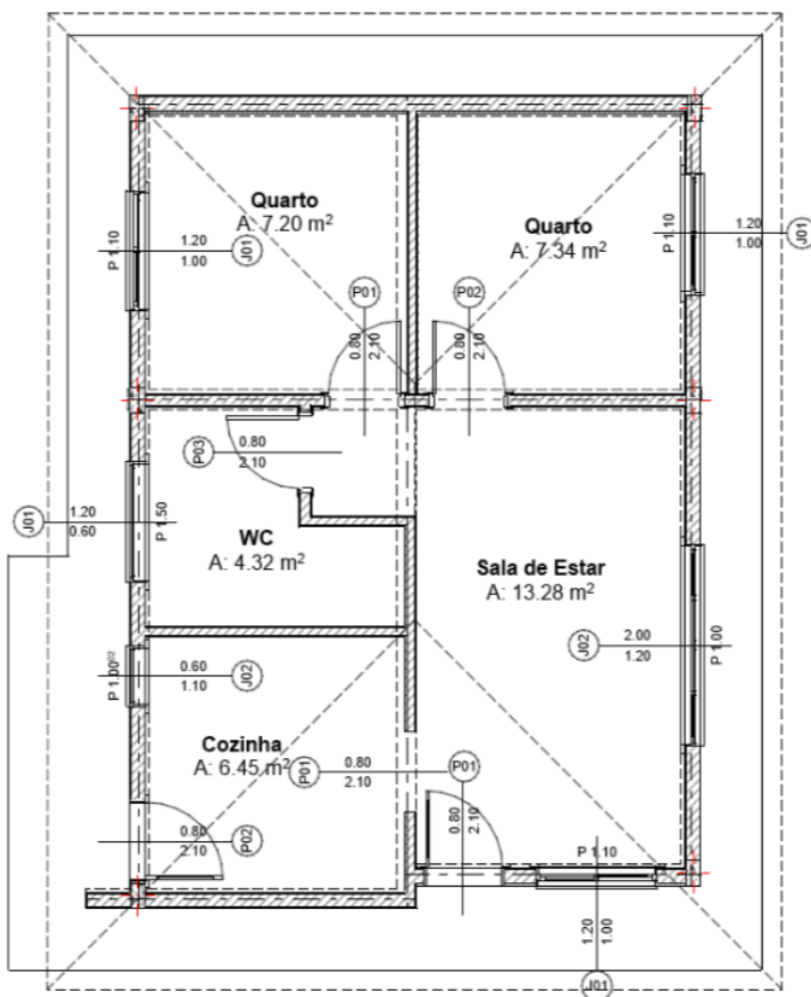


Figura 4: Planta baixa da UH, Padrão MG-91-I-2-45 (COHAB Minas, 2024).

A partir deste modelo padrão, foi produzido o mesmo projeto arquitetônico, variando o sistema construtivo. O primeiro é um edifício projetado com vigas e pilares de concreto armado (UH1 – CA). O segundo, executado com estrutura, fechamento e telhado em madeira laminada colada (UH2 – MLC). As estruturas foram projetadas de acordo com o pré-dimensionamento fornecido nas normas ABNT NBR 6118 (UH1 – CA/BCA) e ABNT NBR 7190 (UH2 – MLC), e as quantidades de cada um dos materiais foram calculadas utilizando o ArchiCAD, uma plataforma de Modelagem da Informação da Construção (BIM). O modelo da edificação final está representado na Figura 5.

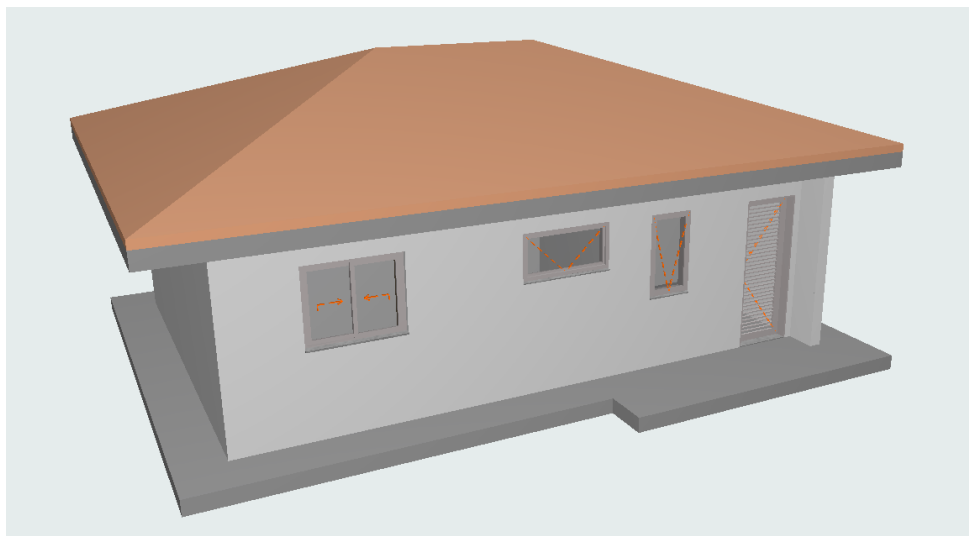


Figura 5: Modelo BIM da UH, Padrão MG-91-I-2-45 da COHAB Minas (autora).

Portanto, serão considerados 2 sistemas construtivos principais:

- Na UH1, a estrutura é feita em concreto armado moldado in loco
- A UH2, a estrutura é de madeira laminada colada.

3.3. Unidade Funcional

Na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a unidade funcional representa o referencial quantitativo a partir do qual todos os fluxos de entrada e saída são relacionados. Trata-se de um parâmetro essencial para garantir a comparabilidade entre diferentes sistemas, já que possibilita a equivalência funcional entre as alternativas analisadas (Caldas et al., 2017). A correta definição da unidade funcional é, portanto, determinante para a validade e a interpretação dos resultados de um estudo de ACV.

Com base nessa diretriz metodológica, a presente pesquisa adotou como unidade funcional uma estrutura padrão de edificação com função estrutural equivalente, modelada em duas versões: uma utilizando concreto armado convencional e outra com madeira engenheirada do tipo laminada colada (glulam). Ambas as estruturas foram dimensionadas para desempenhar a mesma função de suporte e estabilidade em uma edificação de uso residencial, garantindo, assim, equivalência funcional entre os sistemas comparados.

3.4. Modelagem do Sistema

Tentando obter o melhor resultado possível dentro dos recursos gratuitos disponíveis para pesquisadores, a base de dados selecionada para a modelagem dentro do OpenLCA foi a disponibilizada pelo LCA Commons, que é uma iniciativa interinstitucional governamental dos Estados Unidos. Foram realizadas pesquisas detalhadas sobre os fluxos de produção, construção, manutenção, fim de ciclo de vida e potencial de reciclagem dos sistemas estudados.

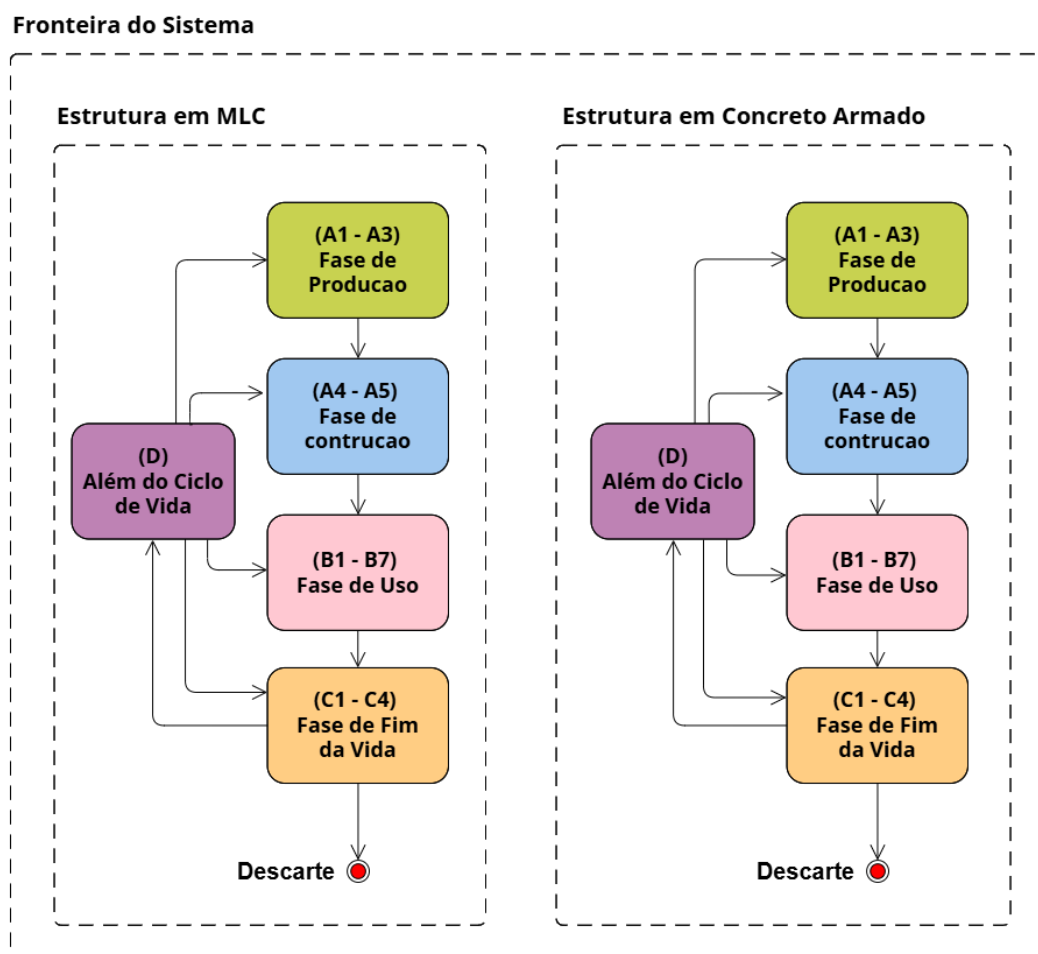


Figura 6: Fronteiras do Sistema (autora).

Ainda tomando partido de recursos gratuitos, o primeiro passo para a modelagem do sistema foi a elaboração de um esboço dos fluxos utilizando a ferramenta Visual Paradigm. Destrinchando os blocos apresentados em categorias, conforme a EN 15804+A2 2019 que delimita as etapas para um ACV na construção civil e levando em consideração os itens da metodologia de Chau et al., 2015, obtemos o fluxograma inicial descrito na Figura 7:

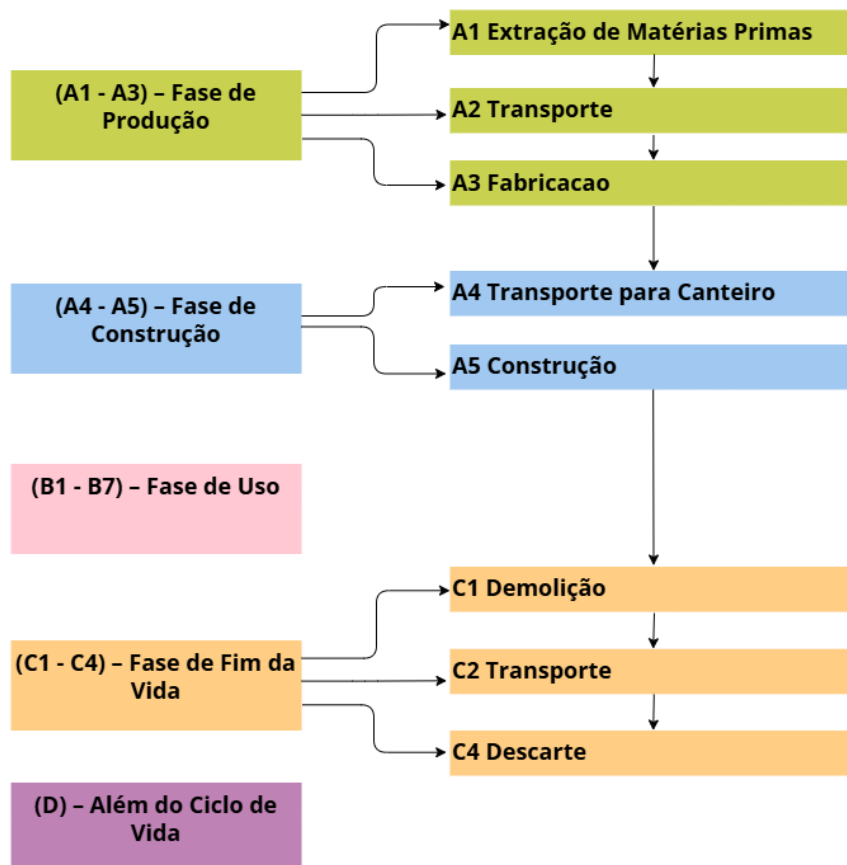


Figura 7: Fases do Ciclo de Vida de uma Edificação segundo a EN 15804 e Chau et al., 2015, adaptado (autora).

As imagens a seguir apresentada o mapeamento dos processos e das fases do ciclo de vida de dois sistemas construtivos: a Madeira Laminada Colada ou MLC (figura 8) e o Concreto Armado moldado in loco (figura 9). A delimitação da fronteira do sistema nos permite visualizar que ambas são organizadas segundo as mesmas fases do ciclo de vida: Produção, Construção e Fim de Vida, possibilitando uma metodologia de análise padronizada e equipada, apesar de se tratar de sistemas construtivos distintos. Essa representação evidencia que, embora os materiais e processos específicos sejam distintos, as etapas que compõem o ciclo de vida são equivalentes, o que permite a comparação de seus impactos ambientais.

MLC

Shigue, Kazuo, 2018 Calil, 2023

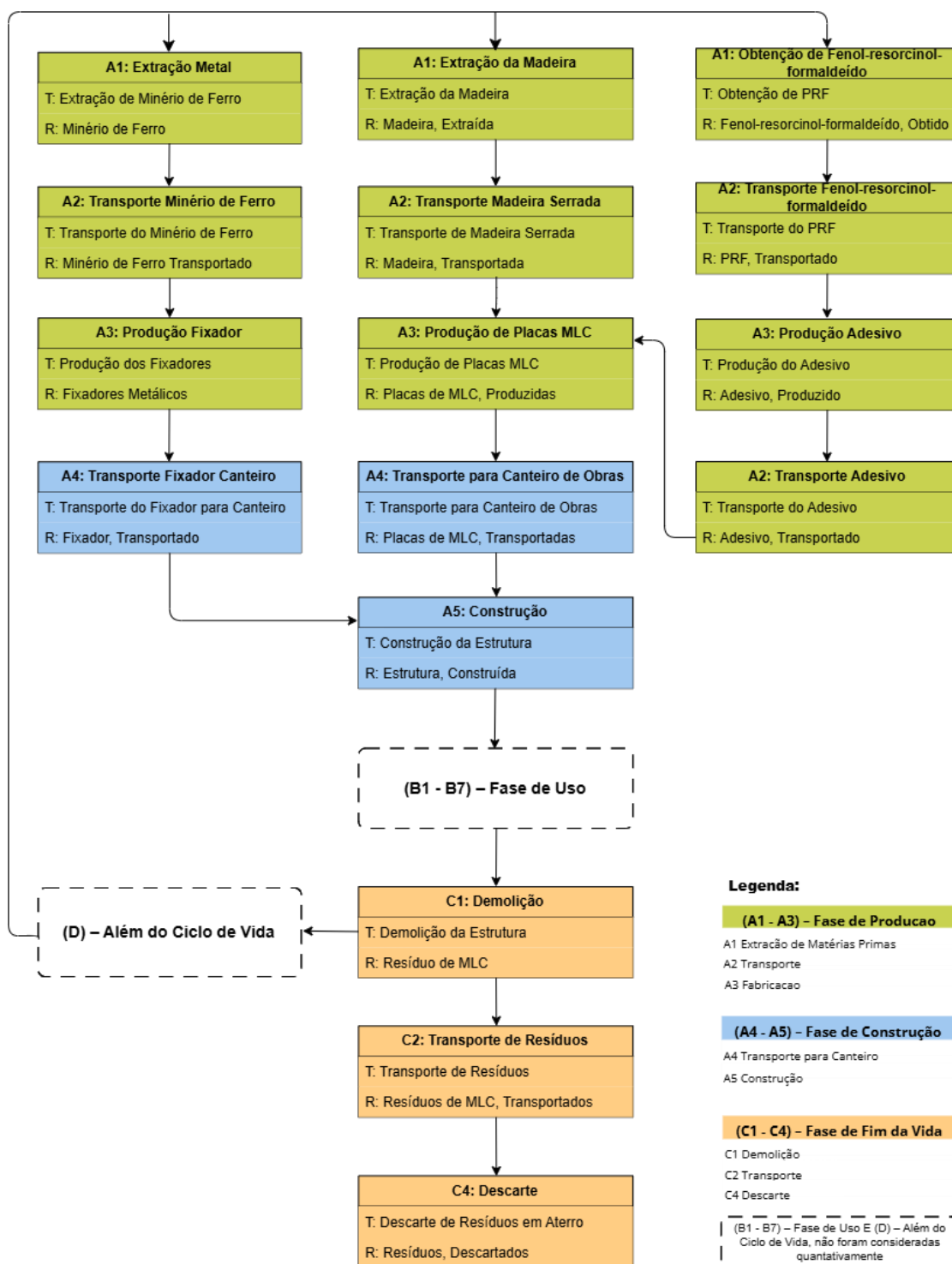


Figura 8: Fluxograma do Ciclo de Vida da Estrutura em MLC (Calil, 2023; Shigue et al. 2018, Adaptado).

Seguindo na elaboração dos sistemas para cada um dos fluxos para seus respectivos fluxos de produção, obtemos os processos envolvidos na cadeia produtiva e operacional para cada um deles. Cada bloco do fluxograma está associado a fluxos de transformação (T) e fluxos de resultado (R), indicando o que é realizado e o que é obtido em cada etapa.

Na Madeira Laminada Colada (MLC), ele parte da extração das matérias-primas, incluindo a madeira, o minério de ferro para fixadores e o fenol-resorcinol-formaldeído (utilizado na fabricação de adesivos). Em seguida, aborda as etapas de transporte, produção de componentes, montagem no canteiro de obras e construção da estrutura. Posteriormente, são apresentados os processos relacionados à fase de uso, com destaque para o reparo, e, finalmente, o fim da vida útil, com a demolição, transporte de resíduos, descarte e o potencial de reciclagem.

Por fim, a cadeia produtiva e operacional do Concreto Armado moldado in loco. Assim como no fluxograma da MLC, ela inicia com a extração das matérias-primas: minério de ferro (para a produção dos vergalhões), agregados miúdos e graúdos, filler carbonático e clínquer (para a fabricação do cimento). O fluxograma segue com o transporte de cada insumo até o canteiro de obras, a etapa de construção da estrutura, e posteriormente, as fases de reparo, demolição, transporte de resíduos e descarte.

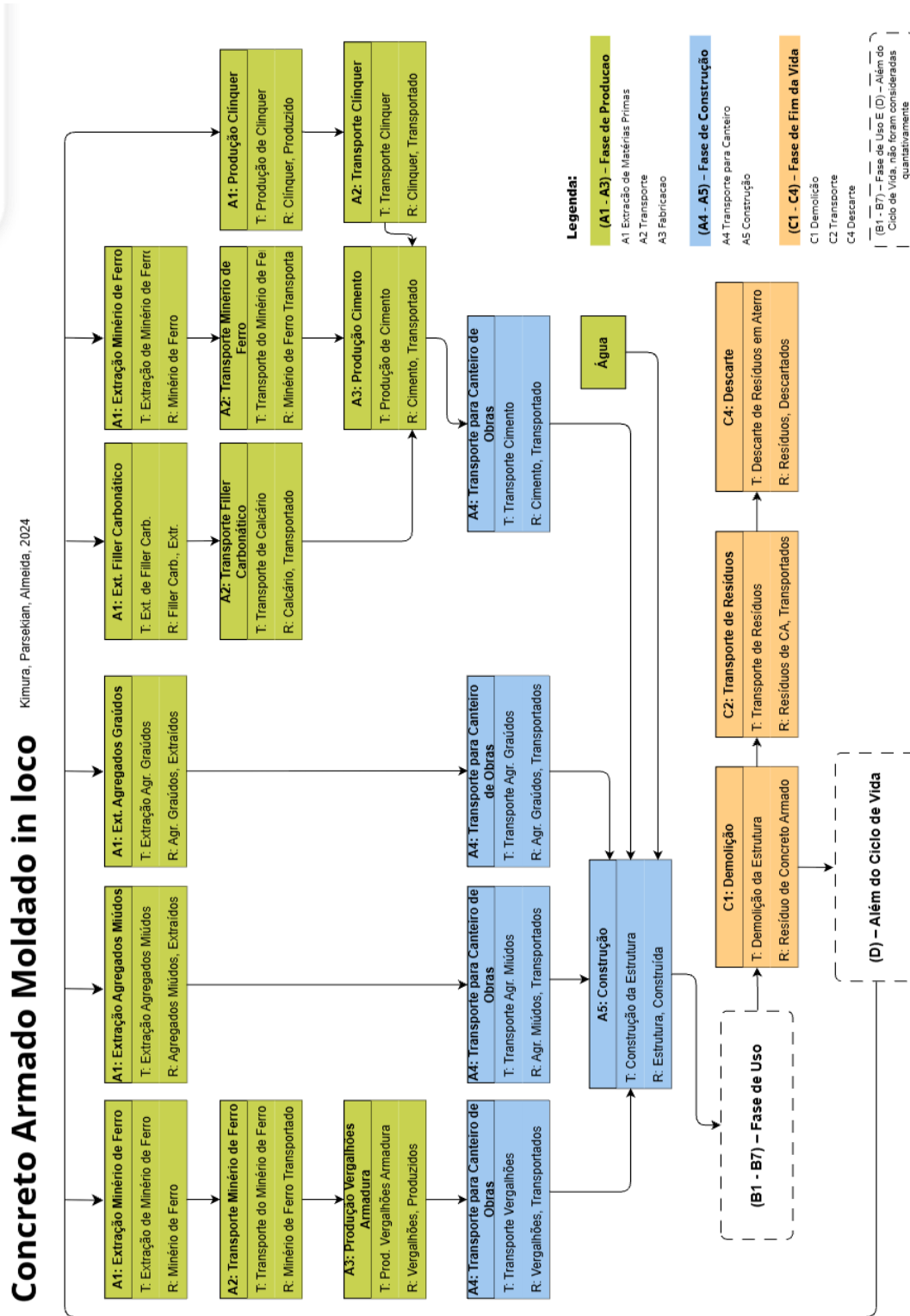


Figura 9: Fluxograma do Ciclo de Vida da Estrutura em Conc. Armado (Kimura et al. 2024, Adaptado).

Neste trabalho se considera o concreto armado moldado *in loco*, modelado com as características apontadas na Tabela 4. O traço utilizado é para 1m³ de 464 kg de

cimento para 784 kg de areia e 942 kg de brita, o que dá, em termos de proporção de massa, aproximadamente 1: 1,7: 2,0 (cimento: areia: brita), com 200 kg de água (relação água-cimento de aproximadamente 0,43) e 7,2 kg de aditivo. resultando numa densidade fresca de cerca de 2 397 kg/m³, valor compatível com as faixas típicas para concreto convencional (2 200–2 500 kg/m³)

Tabela 5 - Características e composição para concreto armado

Aspecto	Descrição
Tipo de concreto	Concreto armado moldado in loco
Cimento utilizado	Cimento Portland de Alto-forno (CP-III – NBR 5735)
Composição do CP-III	35% a 70% de escória de alto-forno (CSN, 2024)
Proporção em massa	1: 1,7: 2,0 (cimento: areia: brita)
Proporção de materiais para 1 m³ (em kg)	- Cimento: 464 kg - Areia: 784 kg - Brita: 942 kg - Água: 200 kg - Aditivo: 7,2 kg
Relação água/cimento	~ 0,43
Densidade fresca	~ 2 397 kg/m ³ (faixa típica: 2 200–2 500 kg/m ³)

Para cada um dos fluxos apresentados nas Tabelas referentes aos sistemas construtivos em Madeira Laminada Colada (MLC) e Concreto Armado, foi identificada uma correspondência direta com processos e fluxos disponíveis em repositórios de dados de Avaliação do Ciclo de Vida, como o LCA Commons. Essas correspondências asseguram a consistência metodológica da modelagem do inventário, permitindo que cada etapa do ciclo de vida — desde a extração e produção de matérias-primas (A1), passando pelo transporte (A2 e A4), fabricação (A3), construção (A5) e fim de vida (C1 a C4) — seja representada por dados secundários compatíveis com a nomenclatura e a estrutura adotadas nos bancos de dados internacionais, garantindo rastreabilidade, comparabilidade e robustez aos resultados obtidos.

Tabela 6 - Fluxos do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do sistema construtivo em Concreto Armado e suas correspondências em repositórios de ACV

Modelagem	Repositório LCA Commons	Localização
A1 Extração de calcário	Limestone; at mine	SA; CA; SA (Américas)
A1 Extração de agregado miúdo (areia)	Silica sand; at mine	SA; CA; SA (Américas)
A1 Extração de agregado graúdo (brita)	Construction gravel; at mine	SA; CA; SA (Américas)
A1 Recuperação de escória de alto-forno	Granulated blast furnace-slag; treatment for cement kiln feeding; at treatment plant	USA (Estados Unidos)
A1 Produção de Clínquer	Clinker; production mix, at kiln	GLO (Global)

A2	Transporte de calcário	Transport, combination truck, diesel powered	GLO (Global)
A2	Transporte de agregados	Transport, combination truck, diesel powered	GLO (Global)
A2	Transporte de clínquer	Transport, combination truck, diesel powered	GLO (Global)
A2	Transporte de cimento	Transport, combination truck, diesel powered	GLO (Global)
A3	Produção de Cimento Portland	Portland limestone cement; production mix, at plant	USA (Estados Unidos)
A3	Produção de aço para armaduras	Reinforcing steel; at plant	USA (Estados Unidos)
A4	Transporte de concreto	Transport, combination truck, diesel powered	GLO (Global)
A4	Transporte de aço	Combination truck, long-haul, diesel powered	GLO (Global)
A5	Execução da estrutura de concreto armado	Construction and demolition concrete; at application site	USA (Estados Unidos)
C1	Demolição	Construction and demolition concrete; at application site	USA (Estados Unidos)
C3	Transporte de resíduos de concreto	Transport, single unit bucket truck, diesel powered	NA (América do Norte)
C4	Disposição final	Disposal, non-hazardous waste, to landfill	USA (Estados Unidos)

Tabela 7 - Fluxos do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do sistema construtivo em Madeira Laminada Colada (MLC) e suas correspondências em repositórios de ACV

Modelagem	Repositório LCA Commons	Localização
A1 Extração de madeira	Roundwood, softwood; average; at forest	United States
A1 Extração de minério de ferro	Iron, ore, open pit mine, at site	United States
A1 Produção de fenol-resorcinol-formaldeído	Phenol resorcinol formaldehyde resin; at plant	Northern America
A2 Transporte de madeira	Transport, combination truck, diesel powered	United States
A2 Transporte de minério de ferro	Transport, combination truck, diesel powered	United States
A2 Transporte de fenol-resorcinol-formaldeído	Transport, combination truck, diesel powered	United States
A3 Produção de elementos de fixação	Galvanized steel nails; at plant	United States
A3 Produção de adesivo	Phenol resorcinol formaldehyde resin; at plant	Northern America
A3 Produção de painéis de MLC (GLT)	Glue laminated timber; at glulam mill	United States
A4 Transporte de elementos de fixação	Transport, combination truck, diesel powered	United States
A4 Transporte de painéis de MLC (GLT)	Transport, combination truck, diesel powered	United States
A4 Transporte de adesivo	Transport, combination truck, diesel powered	United States
A5 Construção / montagem	Building construction, heavy timber; at building site	United States
C1 Demolição / desmontagem	Building demolition; at building site	United States
C3 Transporte de resíduos	Transport, combination truck, short-haul, diesel powered	United States
C4 Disposição final	Disposal, non-hazardous waste, to landfill	United States

3.5. Energia de Transportes

O cálculo da energia associada às etapas de transporte considerou a localização da edificação analisada (Belo Horizonte – MG) e as principais fontes regionais de fornecimento de insumos e materiais de construção. Dessa forma, as distâncias estimadas não foram arbitrárias, mas sim definidas a partir da logística real observada entre centros produtores e o local da obra.

As rotas foram determinadas com base em polos industriais e mineradores relevantes da região. O cimento e seus insumos (clínquer, filer e escória) foram associados à planta da Holcim Barroso - MG, distante aproximadamente 226–251 km de Belo Horizonte. O minério de ferro foi vinculado a fornecedores de Contagem (52 km), enquanto os agregados graúdo e miúdo tiveram como origem Sabará (20 km). Para o aço, considerou-se o polo industrial de Contagem (14 km). Finalmente, os resíduos gerados na obra foram destinados a Macaúbas, em Sabará, a 18 km do canteiro. Essa abordagem garantiu maior proximidade com a realidade logística local, reforçando a consistência do inventário.

O modal predominante foi o rodoviário, em consonância com a matriz de transporte brasileira. Diferentes tipos de veículos foram associados a cada material, desde caminhões basculantes de 15~20 t para agregados até carretas de 25~30 t para cimento e vergalhões.

Como referência para o Brasil, Tavares (2006) estimou o consumo de caminhões em 1,62 MJ/t.km, valor calculado a partir da eficiência média de um veículo de 7,2 t, que consome 1 L de diesel (35 MJ) para percorrer 3 km. Esse parâmetro foi utilizado comparativo para calibração do modelo, complementando dados da literatura e das bases internacionais (GLO) do LCA Commons.

As Tabelas 8 e 9 apresentam as principais etapas de transporte, as distâncias estimadas, os tipos de veículos considerados e a energia consumida em cada fluxo, para a madeira laminada colada e o concreto, respectivamente.

Tabela 8 - Estimativa de Consumo Energético do Transporte de Materiais e Resíduos para MLC

Etapa	Meio de Transporte Comum	Tipo de Veículo	Local de Origem	Local de Destino	Distância Estimada (km)	Peso a ser transportado (kg)	Capacidade Total (kg)	Diesel Estimado (L)
A2 - Transporte Fenol/Resorcinol/Formaldeído	Rodoviário	Caminhão tanque	São José dos Pinhais (PR)	Curitiba (PR)	13 km	29,42	230000	0,048
A2 - Transporte de Adesivo	Rodoviário	Caminhão plataforma	Curitiba (PR)	Belo Horizonte (MG)	996 km	29,42	10000	9,65
A2 - Transporte Madeira	Rodoviário	Caminhão plataforma	Pompéu (MG)	Belo Horizonte (MG)	172 km	1205,4	10000	6,98
A2 - Transporte Minério de Ferro	Rodoviário	Caminhão basculante	Arcos (MG)	Contagem (MG)	200 km	14,3	8000	0,36
A4 - Transporte Fixadores	Rodoviário	Caminhão plataforma	Contagem (MG)	Belo Horizonte (MG)	15 km	14,3	10000	0,03
A4 - Transporte MLC	Rodoviário	Caminhão plataforma	Belo Horizonte (MG)	Belo Horizonte (MG)	3 km	1234,8	10000	7,95
C3 - Transporte de Resíduos	Rodoviário	Caminhão caçamba	Belo Horizonte (MG)	Macaúbas, Sabará (MG)	12 km	1249,1	5000	1,87

Tabela 9 - Estimativa de Consumo Energético do Transporte de Materiais e Resíduos para Concreto Armado

Etapa	Meio de Transporte Comum	Tipo de Veículo	Local de Origem	Local de Destino	Distância Estimada (km)	Peso a ser transportado (kg)	Capacidade Total (kg)	Diesel Estimado (L)
Transporte de Escória	Rodoviário ou Ferroviário	Caminhão basculante ou vagão tipo gôndola	Matozinhos (MG)	Holcristim Barroso (MG)	226 km	484,2	8000	2,07
Transporte de Filer	Rodoviário	Caminhão basculante	Arcos (MG)	Holcristim Barroso (MG)	251 km	60,5	8000	4,19
Transporte de Minério	Rodoviário ou Ferroviário	Caminhão basculante ou vagão tipo gôndola	Matozinhos (MG)	Contagem (MG)	52 km	513,2	8000	0,67
Transporte Vergalhão	Rodoviário	Caminhão com carroceria em U 10-14t	Contagem (MG)	Belo Horizonte (MG)	14 km	513,2	10000	1,98
Transporte de Cimento	Rodoviário	Caminhão com carroceria grade baixa 10-14t	Holcristim Barroso (MG)	Belo Horizonte (MG)	180 km	1210,0	10000	60,22
Transporte de Agregado Graúdo	Rodoviário	Caminhão basculante	Sabará (MG)	Belo Horizonte (MG)	20 km	2460,0	8000	13,60

Transporte de Agregado Miúdo	Rodoviário	Caminhão basculante	Sabará (MG)	Belo Horizonte (MG)	20 km	2040,0	8000	11,28
Transporte de Resíduos	Rodoviário	Caminhão-caçamba ou basculante	Belo Horizonte (MG)	Macaúbas, Sabará (MG)	18 km	6256,1	5000	31,13

3.6. Compilação de Dados

Após a modelagem energética do ciclo de vida das estruturas em concreto armado e em madeira laminada colada, foi feita uma análise das etapas A e C através do Cumulative Energy Demand (CED). Nessa fase, não foi levada em consideração a ponderação das fontes energéticas utilizadas, mas:

- no consumo total de energia;
- no consumo energético por etapa do ciclo de vida;
- na relação entre energia para produção e energia de transporte.

4 RESULTADOS

4.1. Apresentação de Resultados e Análise de Dados

Após a definição dos sistemas construtivos a serem comparados — concreto armado moldado in loco e madeira laminada colada (MLC) — foram elaborados os Sistemas de Produto no software OpenLCA (versão 1.10.3). Cada modelo contemplou todas as etapas do ciclo de vida consideradas nesta pesquisa: extração e beneficiamento de matérias-primas, processos industriais (produção), transporte, construção e fim de vida.

Para a realização dos cálculos de energia incorporada, utilizou-se como inventário primário a base de dados LCA Commons, disponibilizada de forma aberta pela plataforma OpenLCA Nexus (2020), com complementação de dados regionais coletados em literatura nacional e bases secundárias. A escolha por essa base se deu pela disponibilidade de processos adaptáveis à realidade brasileira e pela compatibilidade com o objetivo de comparar dois sistemas estruturais aplicados a uma mesma tipologia habitacional.

A modelagem foi realizada de forma modular, permitindo a análise individualizada de cada etapa (A1–A3: produção; A4–A5: transporte e construção; C: fim de vida). Essa estrutura favoreceu a identificação dos pontos críticos de consumo energético em cada cenário. Durante a construção dos sistemas de produto, foram efetuadas simulações preliminares a fim de identificar falhas de conexão entre processos, duplicidades ou lacunas de dados. Esse procedimento também possibilitou avaliar a sensibilidade dos resultados frente a variações de parâmetros como distâncias de transporte e eficiência de veículos.

Ressalta-se que a qualidade dos resultados está diretamente relacionada ao grau de detalhamento dos dados atribuídos a cada processo. À medida que informações mais específicas foram incorporadas, especialmente no caso do transporte de materiais e resíduos, as diferenças entre os cenários tornaram-se mais consistentes, refletindo melhor a realidade local.

Por fim, os resultados consolidados são apresentados na próxima seção, em forma de gráficos e tabelas, destacando os valores de energia incorporada para cada etapa do ciclo de vida dos sistemas em estudo. Essa estrutura permitiu não apenas a comparação direta entre

concreto e MLC, mas também a visualização de quais fases concentram maior contribuição para o consumo energético total.

A Figura 10 apresenta o consumo energético ao longo do ciclo de vida da estrutura em madeira laminada colada (MLC), segmentado pelas etapas A e C, conforme metodologia de análise de ciclo de vida proposta por Calil (2023); Shigue, Kazuo (2018). Os dados são expressos em megajoules (MJ) e correspondem ao consumo total para produção, transporte, construção e fim de vida da estrutura.

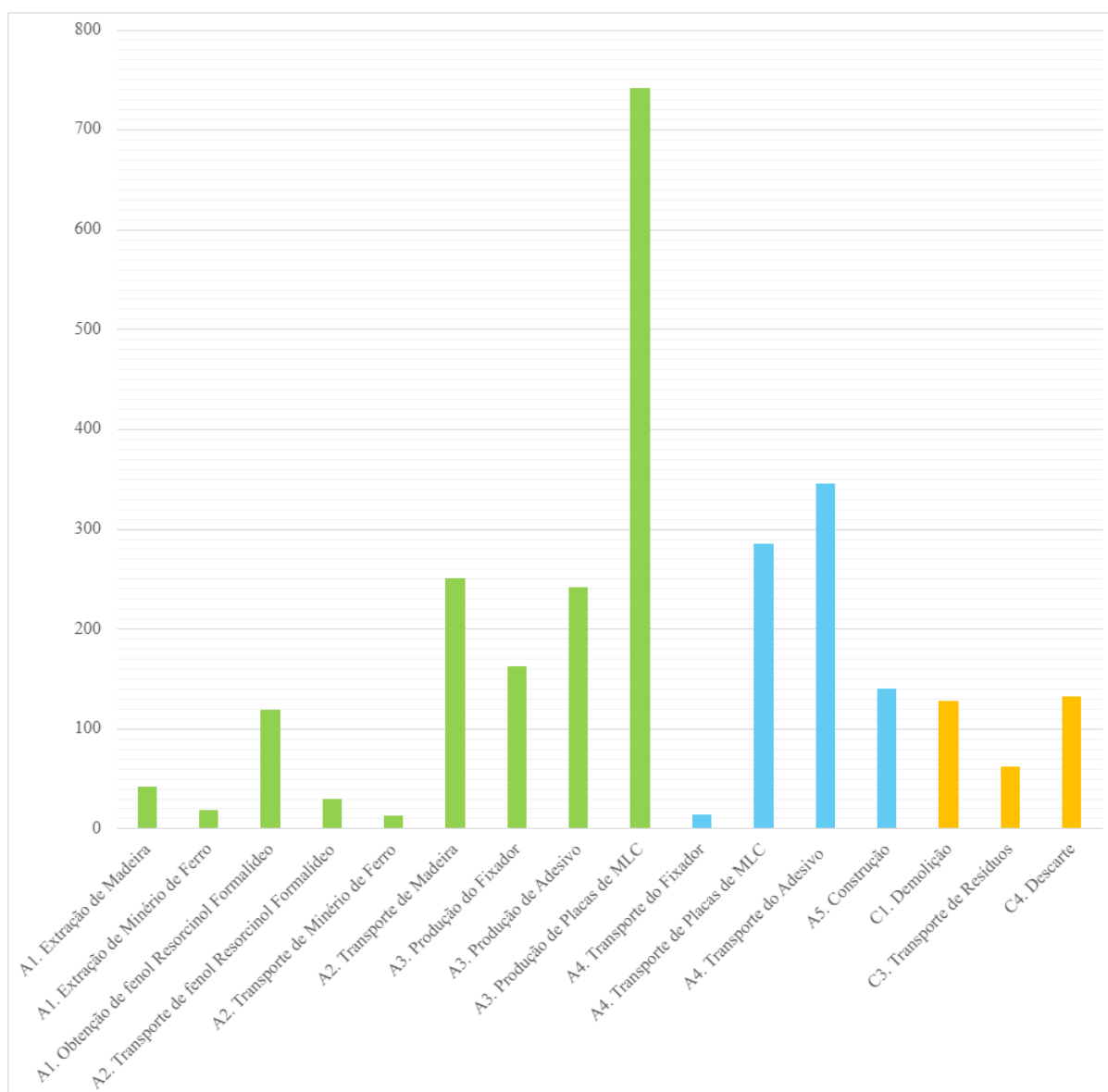


Figura 10: Consumo Energético Por Etapa para Estrutura em Madeira Laminada Colada em MJ (Autora).

Observa-se que o maior pico de consumo energético está concentrado na etapa A3 — referente à produção industrial das placas de MLC, com um valor próximo de 740 MJ,

representando o maior consumo energético de todo o ciclo. Ainda dentro da etapa A3, destaca-se também o consumo energético significativo do processo de produção do adesivo.

A etapa C, correspondente ao fim de vida útil da estrutura, apresenta um consumo energético moderado se comparado ao sistema em concreto. O menor peso da estrutura de MLC, aliado à menor complexidade nos processos de demolição e descarte, contribui para essa diferença observada.

Embora as etapas de extração de matéria-prima e transformação inicial também tenham relevância, o transporte aparece, mais uma vez, como fator de peso na análise. Por se tratar de um sistema estrutural mais leve, por consequência, ela apresente um consumo energético reduzido com transporte e manuseio. A cadeia produtiva da madeira laminada colada também se mostra mais enxuta e linear e por contar com menos etapas intermediárias. Dessa forma, a MLC representa uma alternativa estrutural com menor intensidade energética se comparada ao concreto armado, com destaque para o impacto concentrado na fase industrial (A3).

A Figura 11 representa o consumo de energético do ciclo da estrutura de concreto armado para as etapas A e C, separado por etapas como definido por Kimura, Parsekian, Almeida (2024). A análise leva em conta o consumo energético total para a produção, transporte, construção e demolição para as quantidades totais de materiais calculadas em MJ. Podemos notar que as etapas que representam picos na análise são referentes aos transportes de agregado miúdo e graúdo e demolição da estrutura ao fim do ciclo de vida.

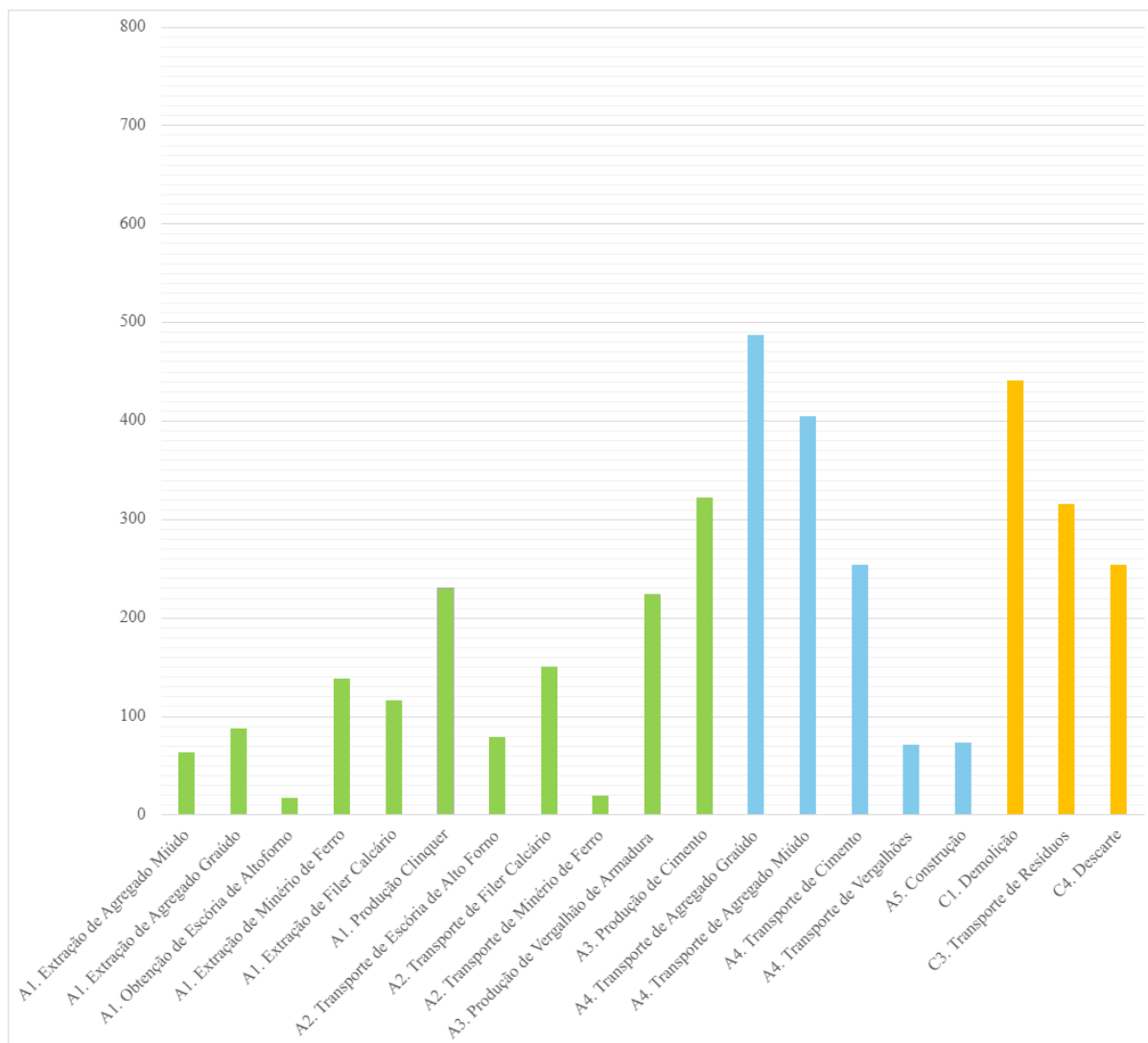


Figura 11: Consumo Energético Por Etapa para Estrutura em Concreto Armado em MJ (Autora).

Dentro da etapa A — referente aos processos produtivos da estrutura — a produção do concreto apresenta um alto consumo energético total se comparado com a produção de vergalhões de armadura.

Na etapa C — referente aos processos de demolição e descarte de resíduos da estrutura — todas as etapas apresentam um alto consumo, presumivelmente em função da alta quantidade de maquinários relacionados ao processo de demolição e acondicionamento de resíduos dentro de um aterro sanitário.

Analisando a cadeia produtiva do concreto, vemos que um dos grandes vilões em seu consumo energético são as etapas de transporte. O concreto armado apresenta um peso maior total para a produção de uma estrutura de desempenho similar a madeira devido à sua maior

densidade, o que contribui negativamente para o impacto nessa categoria. A complexidade das cadeias de produção dentro do ciclo de vida também aumenta o número de vezes que seus materiais precisam ser transportados até chegarem ao local da obra, o que também gera um maior impacto nessa categoria.

O gráfico horizontal apresentado na Figura 12 compara o consumo energético total dos dois sistemas estruturais — concreto armado e madeira laminada colada (MLC) —, separando os impactos relacionados ao transporte dos demais processos do ciclo de vida, conforme metodologia de avaliação adotada por Kimura, Parsekian e Almeida (2024).

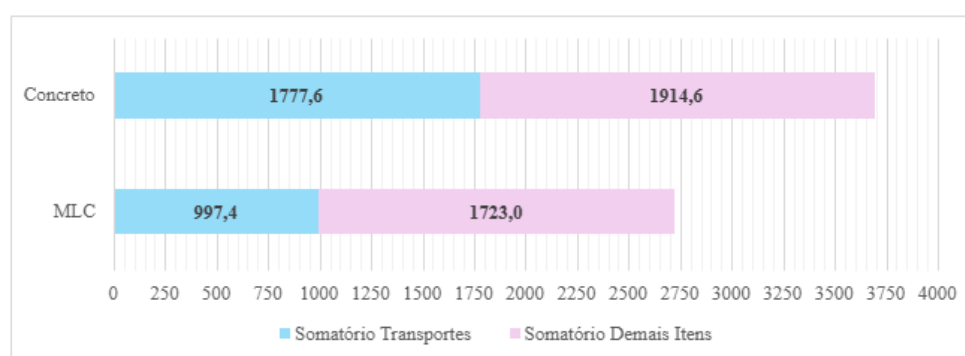


Figura 12: Comparativo de Consumo Energético por Atividade em MJ (Autora).

Os dados indicam que o sistema em concreto armado apresenta o maior consumo energético total, superando 3600 MJ. Desse total, 49,7% estão associados às atividades de transporte, evidenciando a relevância dessa etapa no impacto geral do sistema.

Já o sistema em MLC apresenta um consumo energético total inferior, da ordem de 2800 MJ. Apesar de também apresentar um percentual significativo de energia associada ao transporte — cerca de 37,6% — esse valor é proporcionalmente menor em relação ao sistema em concreto, refletindo a menor massa envolvida e a simplificação da cadeia logística.

O gráfico apresentado na Figura 13 segmenta o consumo energético total dos sistemas estruturais de concreto armado e madeira laminada colada (MLC) de acordo com as principais etapas do ciclo de vida (A1-A3, A4-A5 e C), conforme abordagem de Avaliação de Ciclo de Vida Energético.

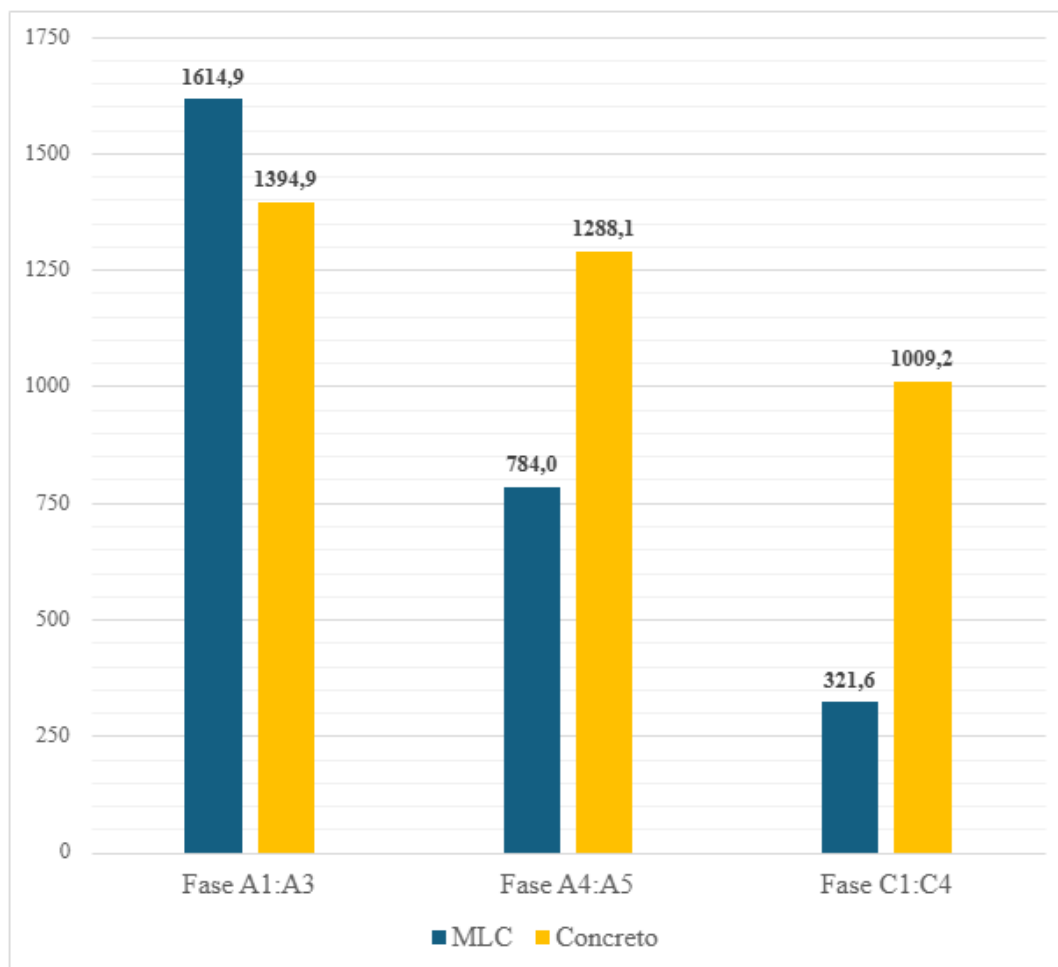


Figura 13: Comparativo de Consumo Energético por Etapa em MJ (Autora).

Nas etapas A1-A3, que englobam a extração e processamento da matéria-prima até a fabricação do produto, observa-se que o sistema em MLC apresenta maior consumo energético (aproximadamente 1600 MJ) em comparação ao concreto armado (que fica na casa dos 1400 MJ). Esse dado reflete o esforço energético mais elevado associado ao processamento industrial da madeira engenheirada, especialmente nas etapas de colagem e prensagem.

Nas etapas A4 e A5, correspondentes às fases de transporte até o canteiro de obras e execução da estrutura, o sistema em concreto armado se destaca negativamente, com consumo superior a 1300 MJ, enquanto o sistema em MLC permanece abaixo de 800 MJ. Essa diferença está diretamente relacionada à densidade e massa significativamente maiores do concreto, que implicam maior gasto energético na logística de transporte e maior demanda operacional no canteiro.

Na etapa C, referente ao fim de vida útil da estrutura, o concreto novamente apresenta consumo energético elevado (1000 MJ), muito superior ao observado para o sistema em MLC (300 MJ). Tal diferença pode ser atribuída à maior complexidade e necessidade de uso de maquinário pesado para realizar os processos de demolição, manuseio e destinação de resíduos no sistema de concreto.

Dessa forma, podemos perceber que o sistema em MLC concentra maior consumo energético na fase de produção, enquanto as fases de transporte, execução e descarte apresentam desempenhos mais eficientes. Em comparativa, o sistema em concreto exibe um perfil mais desequilibrado, com picos concentrados de energia nas etapas de transporte e fim de vida, o que compromete sua eficiência global sob a ótica energética.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Sobre o Trabalho Realizado

A partir da revisão bibliográfica, constatou-se que a construção civil é responsável por uma parcela significativa do consumo global de energia e das emissões de carbono, sendo frequentemente apontada como um dos setores que mais pressionam os limites ambientais. Nesse cenário, torna-se cada vez mais urgente repensar os materiais e sistemas construtivos empregados, sobretudo em países emergentes como o Brasil, que ainda apresentam grande déficit habitacional aliado a elevadas demandas energéticas e carência de soluções de baixo impacto. Embora o concreto armado moldado in loco seja o sistema estrutural mais utilizado e consolidado no país, diversos estudos já evidenciaram sua intensidade energética e ambiental, tanto em razão da produção do cimento quanto da logística associada ao seu transporte e descarte. Em contrapartida, a madeira engenheirada, especialmente a madeira laminada colada (MLC), surge como uma alternativa promissora por sua menor densidade, possibilidade de modularidade, reaproveitamento e origem renovável.

Os resultados desta pesquisa confirmam parte dessas expectativas. Em ambos os sistemas estudados, a energia associada ao transporte emergiu como componente expressivo, representando aproximadamente 50% do consumo energético no caso do concreto e cerca de 37,6% na MLC. Esse resultado ressalta a importância da cadeia logística e da localização dos fornecedores, uma vez que distâncias maiores podem comprometer a eficiência energética do sistema, independentemente do material escolhido. A se observar que os materiais a serem transportados para ao uso do concreto são disponíveis em localidades próximas do local escolhido para o modelo, enquanto grande parte dos materiais para a MLC têm que ser transportados de outros Estados. Além disso, verificou-se que, embora o processo industrial da MLC (etapa A3) demande maior quantidade de energia devido a operações de colagem e prensagem, esse impacto inicial é compensado pela leveza, pela facilidade de montagem e desmontagem e pela modularidade do material, fatores que contribuem para um balanço energético global mais eficiente ao longo de todo o ciclo de vida.

O concreto armado, por sua vez, mostrou-se mais oneroso em termos energéticos tanto na execução da obra quanto no fim de vida, atingindo valores superiores a 3600 MJ, contra cerca de 2800 MJ observados no sistema em MLC. A discrepância evidencia que a MLC, mesmo ainda pouco difundida no Brasil, já apresenta um potencial real de redução da energia incorporada nas edificações, sobretudo quando aplicada em programas de habitação social em larga escala. Esses resultados reforçam a necessidade de ampliar estudos comparativos, para que alternativas baseadas em madeira engenheirada possam ganhar robustez científica e respaldo técnico frente ao sistema hegemônico de concreto.

No entanto, algumas limitações precisam ser consideradas. A principal delas refere-se à disponibilidade e precisão de dados nacionais nas bases de inventário utilizadas. Diversos processos relacionados ao ciclo de vida da MLC e mesmo do concreto tiveram de ser estimados a partir de bases internacionais, como a LCA Commons, devido à escassez de informações regionais específicas. Esse desafio não é exclusivo deste estudo: trata-se de uma limitação recorrente nas análises de ciclo de vida aplicadas à construção civil no Brasil, onde muitas empresas não têm controle detalhado sobre aspectos como distâncias exatas de transporte, consumo energético em etapas intermediárias ou dados completos de processos produtivos. Ainda assim, o uso do software OpenLCA associado a bases reconhecidas internacionalmente permitiu resultados consistentes e comparáveis, ainda que se reconheça a necessidade de avanços futuros em inventários nacionais mais robustos.

Outra limitação diz respeito à representatividade do estudo de caso. Por se tratar de uma tipologia habitacional específica (modelo padrão da COHAB-MG), os resultados não podem ser generalizados automaticamente para todas as tipologias construtivas brasileiras. Além disso, a análise concentrou-se nas etapas A (produção, transporte e construção) e C (fim de vida), não incorporando em profundidade a etapa B (uso e operação). Em contextos climáticos distintos, especialmente em regiões de clima frio, a etapa de uso poderia alterar significativamente os resultados comparativos, uma vez que a madeira apresenta melhor desempenho em termos de isolamento térmico, enquanto o concreto pode ser mais vantajoso em climas quentes devido à sua inércia térmica. Essa delimitação metodológica deve ser considerada na interpretação dos resultados.

Conclui-se, portanto, que a madeira laminada colada representa uma alternativa construtiva interessante para reduzir o consumo energético no ciclo de vida de habitações

sociais no Brasil. Sua adoção em larga escala, no entanto, depende não apenas do desempenho técnico, mas também da consolidação de cadeias produtivas locais, da capacitação de mão de obra especializada e da implementação de estratégias logísticas que minimizem distâncias e garantam o uso de madeira certificada. O fortalecimento desses aspectos poderá colocar a MLC em posição de protagonismo na transição para uma construção civil mais sustentável no país.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Analisando as lacunas apresentadas nesse trabalho, surgem as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

1. Levantamento de dados visando a produção de uma base de dados nacional para a fase de uso (B) da Avaliação do Ciclo de Vida Energético (AECV) para sistemas construtivos em Madeira Laminada Colada;

Modelar o consumo energético operacional das unidades habitacionais (UH), considerando diferentes tipologias de uso (climatização, iluminação, eletrodomésticos) e cenários climáticos regionais. Essa abordagem permitirá avaliar se a maior eficiência térmica da madeira laminada colada (MLC), que demanda menos energia para aquecimento ou refrigeração, pode compensar seu consumo elevado na fase de produção. As categorias de manutenção, reparo e substituição também apresentam dados escassos ou inexistentes para sistemas construtivos em madeira, o que é um fator que pode ter um impacto direto no ACV para esse tipo de sistema.

2. Análise de custo-benefício e ciclo de vida econômico;

Se tratando de edificações de interesse social, se mostra relevante integrar indicadores econômicos — como custo de implantação, manutenção e desmonte — à AECV, gerando uma análise de custo do ciclo de vida total (Life Cycle Costing), que possibilite a comparação da viabilidade financeira e ambiental das alternativas avaliadas. Uma opção interessante também é um estudo de viabilidade técnica e social da MLC em habitação social. Realizar estudos de caso piloto em parceria com órgãos governamentais (COHAB MG, Caixa Econômica Federal)

e com empreiteiras especializadas nesse tipo de sistema construtivo para avaliar o desempenho real da MLC em condições de mercado.

3. Investigação de sistemas mistos e variantes construtivas adicionais

Avaliar sistemas construtivos combinados, como estruturas em GLT associadas a fechamentos em alvenaria estrutural com blocos ecológicos ou painéis de terra comprimida estabilizada, ampliando o leque de alternativas para edificações com menor energia incorporada. Incluir, também, a análise de sistemas híbridos GLT-aço sem o uso de adesivos, conforme proposto por Pang & Oh (2023), a fim de investigar seu desempenho estrutural e energético.

4. Aprofundamento no potencial de reciclagem e economia circular

Desenvolver protocolos de projeto orientados para a desmontabilidade de estruturas em GLT, com detalhamento de conexões parafusadas e métodos de rastreabilidade de componentes. Avaliar o desempenho de componentes reciclados em novas aplicações estruturais, bem como estabelecer fluxos de resíduos de madeira que possam ser destinados a cadeias produtivas secundárias, como a fabricação de mobiliário ou painéis de aglomerados.

6 REFERENCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2559 – *Standard Specification for Adhesives for Bonded Structural Wood Products for Use Under Exterior Exposure Conditions*. (Especificação padrão para adesivos para produtos estruturais de madeira colada para uso em condições de exposição externa). 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14040 - *Gestão ambiental e Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura*. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14044 - *Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações*. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5735 - *Cimento Portland - Requisitos*.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118 *Projeto de Estruturas de Concreto*. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7190 - *Projeto de Estruturas de Madeira*. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15575-1 - *Edificações Habitacionais - Desempenho*. 2023.

BERTOLI, G. et al. *Life cycle integrated analysis of thermal, environmental and cost performance of building envelope system: Small house case study considering grid mix change in Brazil*. *Energy and Buildings* (Análise integrada do ciclo de vida do desempenho térmico, ambiental e de custo de sistemas de envoltória de edificações: Estudo de caso de uma pequena residência considerando a mudança da matriz elétrica no Brasil), v. 310, 1 maio 2024.

BICALHO, T. et al. *LCA data quality: A management science perspective*. (Qualidade de dados em ACV: Uma perspectiva da ciência da gestão). *Journal of Cleaner Production*, v. 156, p. 888–898, 10 jul. 2017.

BODACH, S.; HAMHABER, J. *Energy efficiency in social housing: Opportunities and barriers from a case study in Brazil*. (Eficiência energética em habitação social: Oportunidades e barreiras a partir de um estudo de caso no Brasil). *Energy Policy*, v. 38, n. 12, p. 7898–7910, dez. 2010

COMITÊ EUROPEU DE NORMATIZAÇÃO. EN 15804+A2 *Sustainability of construction works – Environmental product declarations*. (Sustentabilidade na Construção - Declaração Ambiental de Produtos). 2019.

CALIL, C.; ICIMOTO, F. H.; BRITO, L. D. *The New Brazilian Timber Structures Code NBR7190: 2022*. (O novo Código Brasileiro de Estruturas de Madeira NBR 7190:2022). 13th World Conference on Timber Engineering (WCTE), 2023.

CHAU, C. K.; LEUNG, T. M.; NG, W. Y. *A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings*. (Uma revisão sobre Avaliação do Ciclo de Vida,

Avaliação do Ciclo de Vida Energético e Avaliação das Emissões de Carbono no Ciclo de Vida em edificações). Applied Energy. Elsevier Ltd., 2015.

CIROTH, A. *ICT for environment in life cycle applications openLCA - A new open source software for Life Cycle Assessment*. (TIC para o meio ambiente em aplicações de ciclo de vida: openLCA – Um novo software de código aberto para Avaliação do Ciclo de Vida). International Journal of Life Cycle Assessment. Springer Verlag, 2007.

COMPANHIA DE HABITAÇÃO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Plantas – COHAB MINAS. Disponível em: <<http://www.cohab.mg.gov.br/plantas/>>. Acesso em: 29 maio. 2024.

COMPANHIA SIDERURGICA NACIONAL – CSN. Composição do cimento CPIII Cimentos - CSN Guia. Disponível em: <https://www.csn.com.br/produtos-e-servicos/cimentos>. Acesso em: 26 ago. 2025.

DE LARA, B. L. E.; PENTEADO, C. S. G. *Environmental assessment of construction waste prevention: A case study in a social housing project in Southeast Brazil*. (Avaliação ambiental da prevenção de resíduos da construção civil: Um estudo de caso em um projeto de habitação social no Sudeste do Brasil). Cleaner Waste Systems, v. 8, 1 ago. 2024.

DIEGO APELLÁNIZ. *A parametric and machine learning-based approach to implement life-cycle assessment in the early design stages*. (Uma abordagem paramétrica e baseada em aprendizado de máquina para implementar a Avaliação do Ciclo de Vida nas fases iniciais do projeto) Disponível em: <<https://www.udk-berlin.de/studium/architektur/fachgebiete/konstruktives-entwerfen-und-tragwerksplanung/forschung/a-holistic-and-parametric-app>>.

DONG, Y. et al. *Assessment of energy saving potential by replacing conventional materials by cross laminated timber (CLT)-A case study of office buildings in China*. (Avaliação do potencial de economia de energia pela substituição de materiais convencionais por madeira laminada cruzada (CLT) – Um estudo de caso de edifícios comerciais na China). Applied Sciences (Switzerland), v. 9, n. 5, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas). Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>>.

FLAMANT, G. et al. Thermal and environmental evaluation of mid-rise social housing retrofit under different climate conditions. (Avaliação térmica e ambiental da reabilitação de habitação social de altura média sob diferentes condições climáticas). Journal of Building Engineering, v. 46, 1 abr. 2022.

FONSECA, E. M. M. et al. Parametric Study of Three Types of Timber Connections with Metal Fasteners Using Eurocode 5. (Estudo paramétrico de três tipos de conexões em madeira com fixadores metálicos usando o Eurocódigo 5). Applied Sciences (Switzerland), v. 12, n. 3, 1 fev. 2022.

FRISCHKNECHT, R. et al. Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. (Demanda energética cumulativa em ACV: a abordagem da energia capturada). International Journal of Life Cycle Assessment, v. 20, n. 7, p. 957–969, 24 jul. 2015.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO; MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. Deficit habitacional e da inadequação de domicílios no Brasil. 2024.

MAHECHA, R. E. et al. Constructive systems for social housing deployment in developing countries: A case study using dynamic life cycle carbon assessment and cost analysis in Brazil. (Sistemas construtivos para

implementação de habitação social em países em desenvolvimento: Um estudo de caso usando avaliação dinâmica do carbono no ciclo de vida e análise de custos no Brasil). *Energy and Buildings*, v. 227, 15 nov. 2020.

KAHN, E.; ANTOGNOLI, E.; ARBUCKLE, P. The LCA Commons—How an Open-Source Repository for US Federal Life Cycle Assessment (LCA) Data Products Advances Inter-Agency Coordination. (O LCA Commons — Como um repositório de código aberto para produtos de dados de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) federal dos EUA promove a coordenação entre agências). *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 12, n. 2, 1 jan. 2022.

KARIMPOUR, M. et al. Minimising the life cycle energy of buildings: Review and analysis. (Minimizando a energia do ciclo de vida em edificações: Revisão e análise). *Building and Environment*, mar. 2014.

KAHN, E.; ANTOGNOLI, E.; ARBUCKLE, P. *The LCA Commons—How an Open-Source Repository for US Federal Life Cycle Assessment (LCA) Data Products Advances Inter-Agency Coordination*. (O LCA Commons — Como um repositório de código aberto para produtos de dados de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) federal dos EUA promove a coordenação entre agências). *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 12, n. 2, 1 jan. 2022.

KIMURA, Alio. *Revista Concreto IBRACON*, São Paulo, v. LI, n. 111, p. 56, jul.-set. 2023. ISSN 1809-7197. Disponível em: www.ibracon.org.br. Acesso em: 03 de outubro de 2025.

KNOP, A. Desempenho Termoenergético De Habitação Em CLT Por Meio De Simulações Computacionais Para Diferentes Climats Brasileiros. XIII Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. São Paulo – SP. 2023. KOHL, F.; DA SILVA, T. L.; RIBEIRO, L. A. Análise de eficiência energética em edificação de concreto armado moldado in loco. *Revista de Arquitetura IMED*, v. 12, n. 2, p. 157, 30 dez. 2023.

KUMAR, V. et al. Environmental impact assessment of mass timber, structural steel, and reinforced concrete buildings based on the 2021 international building code provisions. (Avaliação do impacto ambiental de edifícios de madeira maciça, aço estrutural e concreto armado com base nas disposições do Código Internacional de Construção de 2021). *Building and Environment*, v. 251, 1 mar. 2024.

MAIDEL, B.; TAVARES, SÉRGIO F. Consumo Operacional Para Edificações Em GLT: Estudo Comparativo Com Alvenarias Convencionais Por Meio De Bim. [s.l: s.n.].

MASILI, Gustavo Santos. *Políticas de eficiência energética no Brasil*. Apresentação preparada para a Comissão de Minas e Energia da Câmara dos Deputados, Brasília, 27 jun. 2023. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cme/apresentacoes-em-eventos/apresentacoes-de-convidados-em-2023/27-06-2023-politicas-de-eficiencia-energetica-no-brasil/1_MME.pdf. Acesso em: 29/09/2025.

Minha Casa, Minha Vida-FAR. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/habitacao/programa-minha-casa-minha-vida/portarias-far-2023>>. Acesso em 26 agosto 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). *Brasil avança na descarbonização da matriz energética*. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 10 set. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-avanca-na-descarbonizacao-da-matriz-energetica>. Acesso em: 29/09/2025.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA; SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO; LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS. *Habitação Social em Madeira*. Brasília. 2023.

PAULSEN, J. S.; SPOSTO, R. M. *A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “mY HOUSE MY LIFE.”* (Análise da energia do ciclo de vida da habitação social no Brasil: Estudo de caso do programa “Minha Casa Minha Vida”). *Energy and Buildings*, v. 57, p. 95–102, 2013.

PEDERSEN WEIDEMA, B.; SUHR WESNAES, M. *Data quality management for life cycle inventories – an example of using data quality indicators.* (Gestão da qualidade de dados para inventários do ciclo de vida – um exemplo do uso de indicadores de qualidade de dados). *J. Cleaner Prod.* [S.l.: s.n.].

PEREIRA, Mirian Pires. *Análise do potencial de descarbonização da matriz elétrica brasileira a partir da substituição de insumos nas termoelétricas e o avanço da biomassa* (monografia). São Paulo: Universidade de São Paulo, 2021. Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/bcbdaf47-dc20-4404-a092-35e81d45e903/MirianPiresPereira.pdf>. Acesso em: 29/09/2025.

FRANCO, José Thomas. *A Madeira Laminada Cruzada (CLT) é o concreto do futuro?.* Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/922665/a-madeira-laminada-cruzada-clt-e-o-concreto-do-futuro#:~:text=por>>. Acesso em 26 agosto 2025.

RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. *Life cycle energy analysis of buildings: An overview.* *Energy and Buildings* Elsevier Ltd, , 2010a.

RANTTILA, H. et al. *Circulating structural timber and engineered wood products—challenges and potentials towards reliable evaluation of mechanical properties.* *Wood Material Science and Engineering*, 2025.

REWOOD BRASIL. *Caderno de Detalhes Construtivos em Madeira Laminada Colada (MLC) Segundo a NBR 7190.* Taboão da Serra, São Paulo Brasil. 2025)

ROITHNER, C.; CENCIC, O.; RECHBERGER, H. *Product design and recyclability: How statistical entropy can form a bridge between these concepts.* (Design de produto e reciclabilidade: Como a entropia estatística pode criar uma ponte entre conceitos). *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, 10 jan. 2022.

SALONVAARA, M. et al. *Impact of Mass Wood Walls on Building Energy Use, Peak Demand, and Thermal Comfort.* (Impacto de paredes maciças de madeira no consumo de energia de edificações, demanda máxima e conforto térmico). [S.l.: s.n.]. Disponível em: <www.osti.gov>. Acesso em: 26 ago. 2025.

SARTORI, I.; HESTNES, A. G. *Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article.* (Consumo de energia no ciclo de vida de edifícios convencionais e de baixo consumo energético: Um artigo de revisão). *Energy and Buildings*, v. 39, n. 3, p. 249–257, mar. 2007.

SHARMA, A. et al. *Life cycle assessment of buildings: A review.* (Avaliação do ciclo de vida de edificações: Uma revisão). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, jan. 2011.

SHIGUE, E. K. *Difusão da Construção em Madeira no Brasil - Agentes, Ações e Produtos.* São Carlos. 2014.

STEPHAN, André; STEPHAN, Laurent. *Reducing the total life cycle energy demand of recent residential buildings in Lebanon.* *Energy*, Elsevier, v. 74, p. 618–637, 2014. DOI: 10.1016/j.energy.2014.07.028.

TAVARES, Sérgio Fernando. *Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos.* 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em:

https://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/TESE_Sergio_Fernando_Tavares.pdf. Acesso em: 3 out. 2025.

THORMARK, Catarina. *A low energy building in a life cycle – its embodied energy, energy need for operation and recycling potential*. *Building and Environment*, v. 37, n. 4, p. 429–435, 2002. Elsevier. DOI: 10.1016/S0360-1323(01)00033-6.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). *Emissions Gap Report 2022: The closing window: climate crisis calls for rapid transformation of societies*. (Relatório da Lacuna de Emissões 2022: A janela se fecha: a crise climática exige transformação rápida das sociedades). [S.l.: s.n.], 2022.

UNITED STATES GOVERNMENT. Memorandum of Understanding among the U.S. Department of Energy (DOE), U.S. Environmental Protection Agency (EPA), U.S. Department of Agriculture (USDA), U.S. Department of Transportation (DOT), and the National Institute of Standards and Technology (NIST) on the Federal Life Cycle Assessment (LCA) Commons. 2024. Disponível em: <<http://www.lcacommons.gov>>. Acesso em 26 agosto 2025.

ANEXOS

ANEXO A – Modelagem Open LCA

A modelagem em open LCA se distribui em níveis de hierarquia de blocos, que juntos produzem um sistema para um produto. A unidade mais básica dessa modelagem são os flows, que são traduzidos em unidades básicas que representam materiais que se movem e se transformam ao longo de um ciclo de vida. As Figura A1 e A2 representam cada uma dessas unidades chaves de materiais para cada um dos sistemas construtivos apresentados.

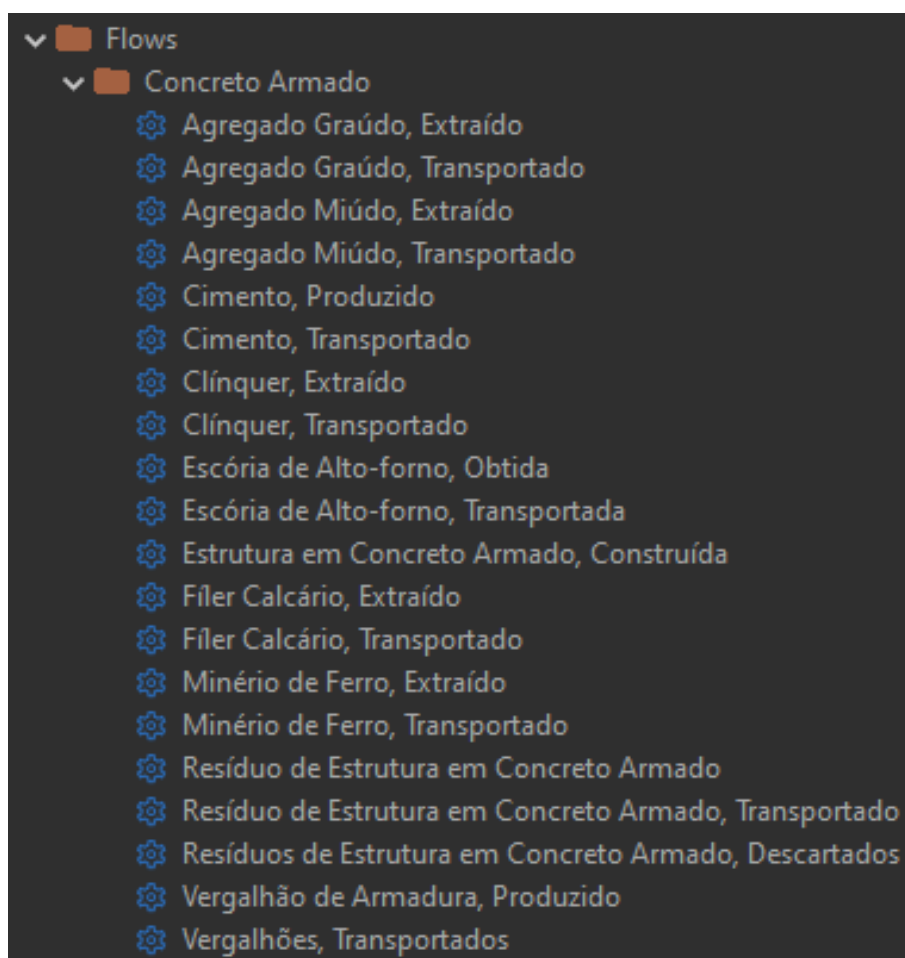


Figura A1 – Fluxos do ciclo de vida da Madeira Laminada Colada (MLC).

Autora (2025).

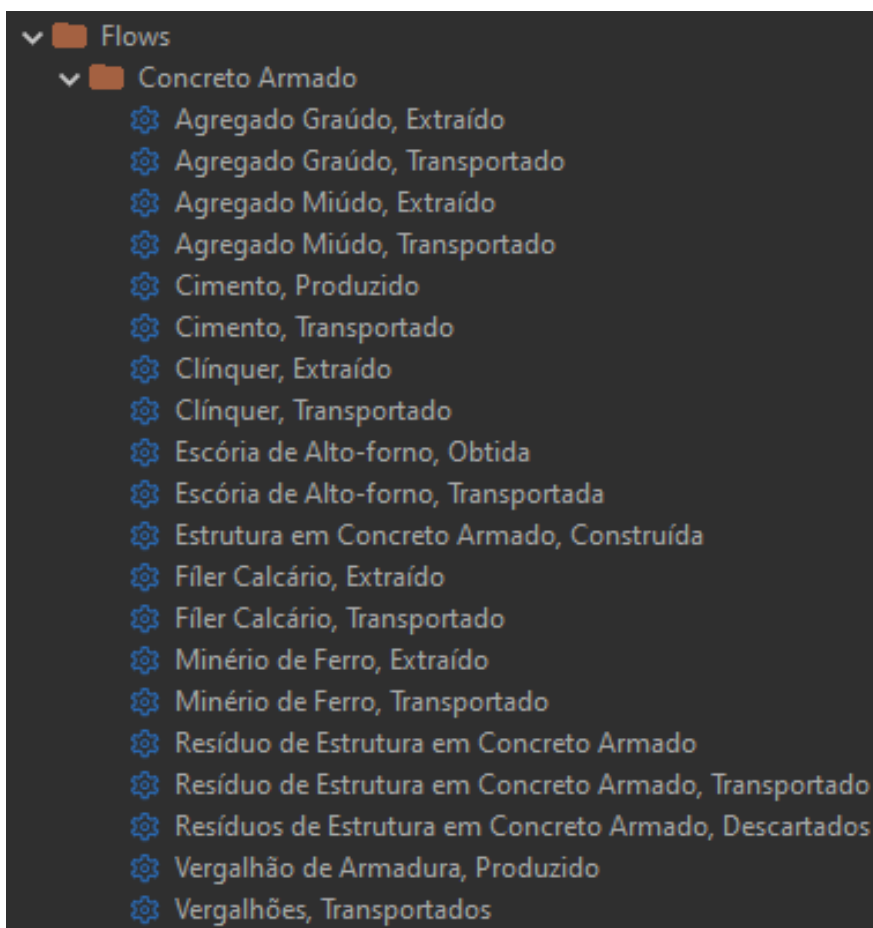


Figura A2 – Fluxos do ciclo de vida do Concreto Armado.

Autora (2025).

Em um nível acima na hierarquia da modelagem estão os Processos. Os flows representam os materiais em si, já os processos marcam cada um dos nós dos processos envolvidos nas transformações desses produtos, como um conjunto de ações desempenhadas ao longo do ciclo de vida. As Figura A3 e A4 representam cada uma dessas unidades chave de materiais para cada um dos sistemas construtivos apresentados.

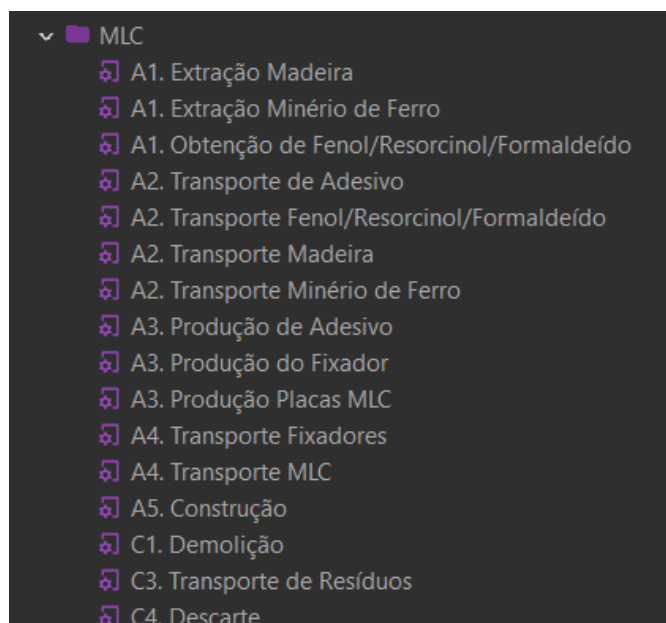


Figura A3 – Processos do ciclo de vida da Madeira Laminada Colada (MLC).

Fonte: Autora (2025).

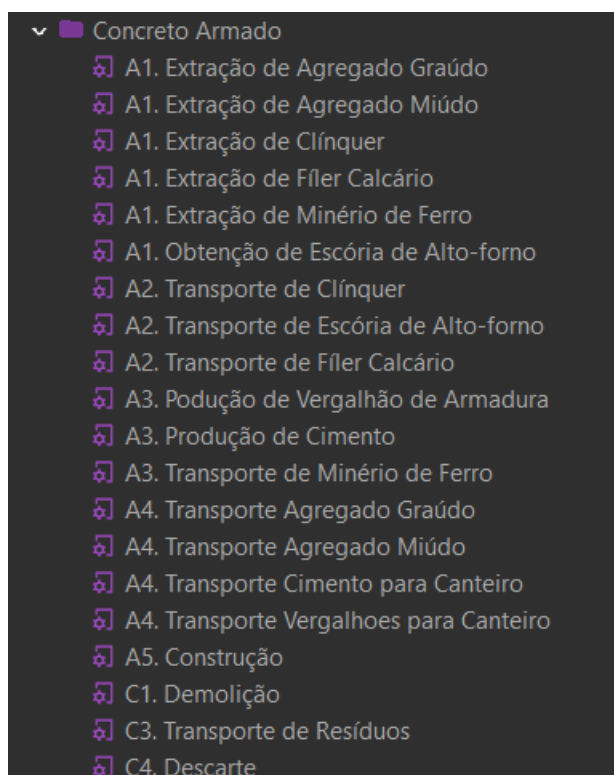


Figura A4 – Processos do ciclo de vida do Concreto Armado.

Fonte: Autora (2025).

Analisando de forma mais completa a modelagem estão os Model Graphs, que integram e organizam os fluxos e processos em uma estrutura sistêmica completa. Esses gráficos representam a interconexão entre todas as unidades modeladas, evidenciando o encadeamento das etapas do ciclo de vida e as relações energéticas entre os módulos considerados. As Figuras A5 e A6 apresentam, respectivamente, a estrutura geral dos sistemas em madeira laminada colada (MLC) e em concreto moldado in loco, sintetizando o conjunto de processos e fluxos que compõem cada um dos modelos analisados.

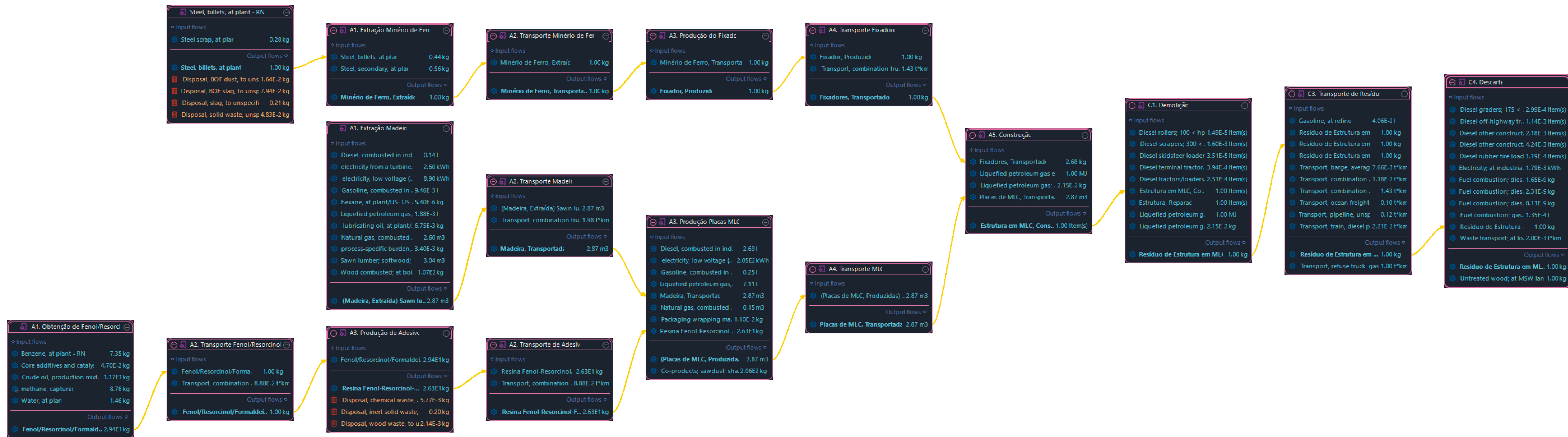


Figura A5 - Model Graph de Processos para Madeira Laminada Colada. Autora (2025)



Figura A6 - Model Graph de Processos para Concreto Armado. Autora (2025)