

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LUCIANA FREITAS DA SILVA

**INTEGRAÇÃO DA METODOLOGIA BIM AOS PROCESSOS DE AVALIAÇÃO DA  
SUSTENTABILIDADE EM PROJETOS DE CONSTRUÇÃO**

MANAUS - AM  
2025

LUCIANA FREITAS DA SILVA

**INTEGRAÇÃO DA METODOLOGIA BIM AOS PROCESSOS DE AVALIAÇÃO DA  
SUSTENTABILIDADE EM PROJETOS DE CONSTRUÇÃO**

Projeto Final de Curso – PFEC II apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Maria de Nazaré Alves da Silva

MANAUS - AM  
2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

---

- S586i Silva, Luciana Freitas da  
Integração da metodologia BIM aos processos de avaliação da sustentabilidade em projetos de construção / Luciana Freitas da Silva. - 2025.  
101 f. : il., color. ; 31 cm.
- Orientador(a): Maria de Nazaré Alves da Silva.  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal do Amazonas, Faculdade de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Manaus, 2025.
1. Sustentabilidade . 2. Construção Civil. 3. BIM. 4. Avaliação de ciclo de vida (ACV). I. Silva, Maria de Nazaré Alves da. II. Universidade Federal do Amazonas. Faculdade de Tecnologia. Curso de Engenharia Civil. III. Título
-

LUCIANA FREITAS DA SILVA

**INTEGRAÇÃO DA METODOLOGIA BIM AOS PROCESSOS DE AVALIAÇÃO DA  
SUSTENTABILIDADE EM PROJETOS DE CONSTRUÇÃO**

Projeto Final de Curso – PFEC II apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Manaus, 24 de Novembro de 2025

**BANCA EXAMINADORA**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Maria de Nazaré Alves da Silva, Presidente  
Universidade Federal do Amazonas - UFAM

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ellem Cristiane Morais de Sousa Contente - Avaliador  
Universidade Federal do Amazonas - UFAM

Prof. Dr. Régis Pamponet da Fonseca – Avaliador  
Universidade Federal do Amazonas – UFAM

Dedico este trabalho à minha mãe e ao meu Duque, que partiram deixando saudade, mas também deixando amor, força e lembranças que me acompanham. Cada página deste trabalho carrega um pouco do que aprendi com vocês. Que esta conquista seja um gesto de gratidão por tudo o que representaram na minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo Seu amor, graça e cuidado, que me sustentaram e continuam sustentando nos momentos mais sombrios, e nos mais felizes da minha vida, permitindo que eu chegasse até aqui.

Aos meus pais, José Águila e Graciene Freitas, minha gratidão infinita por tudo: por me apoiarem, sonharem os meus sonhos, lutarem pelas minhas conquistas e serem meu alicerce, minha força e meu amor. Obrigada por sempre me incentivarem a jamais desistir e por me ensinarem a ser forte e corajosa.

Aos meus cachorrinhos, Duque e Estrela, que tantas madrugadas passaram ao meu lado enquanto eu estudava, trazendo alegria e conforto quando eu mais precisei.

Aos meus irmãos, Luciano, Juliana, Gracineide, Mônica e Sabrina, que sempre me apoiam, caminham comigo, me incentivam e lutam por mim. Obrigada por permanecerem ao meu lado nos momentos mais difíceis e por me encorajarem a nunca desistir.

Aos meus sobrinhos, Fernanda, Antônia, Henrique e José, e ao meu cunhado, Osmair que me ajudaram em tantos momentos da trajetória, oferecendo apoio, carinho e incentivo até o fim.

Aos meus pastores, Lidiane e Ronan, que me auxiliaram profundamente no âmbito emocional e espiritual, me ensinando, me fortalecendo, ajudando a curar a dor do luto e me incentivando a não desistir dos meus sonhos.

Aos meus amigos Ludmila, Delma, Dinah, Eduarda, Rômulo, Nilton e Janaína, que estiveram comigo durante toda a jornada acadêmica, compartilhando experiências únicas, me apoiando, acreditando em mim e vivendo, juntos, momentos bons e desafiadores.

À minha orientadora, Maria de Nazaré, minha sincera gratidão pela inspiração, pela compreensão e pelo apoio emocional nos momentos em que mais precisei, além do incentivo constante para que eu continuasse até o fim.

Agradeço também aos professores Ellem Contente e Régis Pamponet, que foram fundamentais na minha formação acadêmica.

Ao Programa PEECS, expressei minha gratidão pelas vivências intensas e emocionantes que me proporcionou.

Por fim, agradeço a todos os familiares, amigos e professores que, de forma direta ou indireta, contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e acadêmico.

“Louvem o Senhor, todas as nações; exaltem-no,  
todos os povos!  
Porque imenso é o seu amor leal por nós, e a  
fidelidade do Senhor dura para sempre.”

**Salmo 117**

## RESUMO

A presente pesquisa tem como objetivo aplicar a metodologia BIM (*Building Information Modeling*) como suporte aos processos de avaliação da sustentabilidade na construção civil. Diante dos impactos ambientais significativos associados ao setor, torna-se necessário adotar práticas mais eficientes e integradas desde as etapas iniciais do projeto. Nesse contexto, o BIM é compreendido como uma metodologia que organiza fluxos de trabalho e integra diferentes ferramentas tecnológicas, permitindo centralizar informações ao longo do ciclo de vida da edificação, incluindo simulações de desempenho e análises ambientais. O estudo de caso foi desenvolvido a partir da modelagem, em ambiente BIM (Revit®), de um componente construtivo-chave, a parede externa com esquadria, comparando um cenário convencional e outro sustentável. As estratégias sustentáveis incorporaram o uso de materiais alternativos e, de forma complementar, a modelagem dos sistemas fotovoltaico e pluvial para avaliação de sua influência no desempenho operacional da residência. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi realizada por meio do plugin Tally®, ferramenta integrada ao Revit®, que permitiu estimar os impactos ambientais dos materiais empregados em cada cenário. Os resultados demonstraram reduções significativas nos impactos ambientais da parede sustentável, especialmente nas categorias de Potencial de Aquecimento Global e Eutrofização, ainda que algumas diferenças tenham sido limitadas pelo uso de um banco de dados internacional. Na fase de operação, verificou-se melhora relevante no desempenho financeiro e no consumo de recursos, com redução nos gastos de energia elétrica após a implementação do sistema fotovoltaico e diminuição no consumo de água potável com o sistema pluvial. Conclui-se que o BIM, ao integrar processos e ferramentas como o Revit® e o Tally®, constitui uma abordagem estruturante para apoiar decisões de projeto voltadas à sustentabilidade, permitindo análises mais precisas e alinhadas às demandas contemporâneas da construção civil.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sustentabilidade. Construção civil. BIM. Avaliação de ciclo de vida (ACV).

## ABSTRACT

This research aims to apply the BIM (Building Information Modeling) methodology to support sustainability assessment processes in civil construction. Given the significant environmental impacts associated with the sector, it is necessary to adopt more efficient and integrated practices from the initial stages of the project. In this context, BIM is understood as a methodology that organizes workflows and integrates different technological tools, allowing the centralization of information throughout the building's life cycle, including performance simulations and environmental analyses. The case study was developed from the modeling, in a BIM environment (Revit®), of a key constructive component, the external wall with window frame, comparing a conventional scenario and a sustainable one. The sustainable strategies incorporated the use of alternative materials and, in a complementary way, the modeling of the photovoltaic and rainwater systems to assess their influence on the operational performance of the residence. Life Cycle Assessment (LCA) was performed using the Tally® plugin, a tool integrated into Revit®, which allowed for the estimation of the environmental impacts of the materials used in each scenario. The results demonstrated significant reductions in the environmental impacts of the sustainable wall, especially in the categories of Global Warming Potential and Eutrophication, although some differences were limited by the use of an international database. In the operational phase, a relevant improvement was observed in financial performance and resource consumption, with a reduction in electricity costs after the implementation of the photovoltaic system and a decrease in potable water consumption with the rainwater harvesting system. It is concluded that BIM, by integrating processes and tools such as Revit® and Tally®, constitutes a structuring approach to support design decisions focused on sustainability, allowing for more precise analyses aligned with the contemporary demands of the construction industry.

**KEYWORDS:** Sustainability. Civil construction. BIM. Life cycle assessment (LCA).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Comparativo entre técnica, método, processo e sistema construtivo .....	22
Figura 2 - Estratégias de aproveitamento passivo dos recursos naturais.....	24
Figura 3 - Pilares da Sustentabilidade .....	25
Figura 4 - Os fundamentos do BIM: pessoas, processos e tecnologia .....	28
Figura 5 - Ciclo de vida de um projeto com aplicação do BIM .....	29
Figura 6 - Representação das dimensões do BIM .....	30
Figura 7 - Fluxograma das etapas metodológicas .....	37
Figura 8 - Objetivos de Desenvolvimento (ODS) da Agenda 2030 da ONU.....	39
Figura 9 - Critérios sustentáveis aplicados ao modelo arquitetônico .....	39
Figura 10 - Localização e dimensões da parede analisada no modelo BIM.....	41
Figura 11 - Parede Convencional modelada isolamento no Revit®.....	46
Figura 12 - Montagem das camadas da parede convencional no Revit ®.....	48
Figura 13 - Tela inicial do Tally ® (Convencional) .....	49
Figura 14 - Associação do material no Tally® (Convencional).....	50
Figura 15 - Estrutura final após a associação de materiais (Convencional).....	51
Figura 16 - Legenda dos Estágios (Convencional).....	55
Figura 17 - Resultados por Estágio do Ciclo de Vida (Convencional) .....	56
Figura 18 - Gráfico pizza dos Resultados por Estágio do Ciclo de Vida (Convencional) .....	57
Figura 19 - Legenda da organização dos materiais (Convencional) .....	58
Figura 20 - Resultados por Divisão (Convencional) .....	58
Figura 21 - Gráfico Pizza da Revisão por Divisão (Convencional) .....	59
Figura 22 - Resultados por Divisão discriminados por Material (Convencional).....	61
Figura 23 - Resultados por Categoria do Revit® (Convencional) .....	63
Figura 24 - Parede Sustentável modelada isolamento no Revit® .....	64
Figura 25 - Montagem das camadas da parede sustentável no Revit ® .....	66
Figura 26 - Tela inicial do Tally® (Sustentável).....	67
Figura 27 - Associação do material no Tally® (Sustentável).....	67
Figura 28 - Estrutura final após a associação dos materiais (Sustentável).....	68
Figura 29 - Legenda dos Estágios (Sustentável) .....	69
Figura 30 - Resultados por Estágio do Ciclo de Vida (Sustentável) .....	69
Figura 31 - Gráfico pizza dos Resultados por Estágio do Ciclo de Vida (Sustentável) .....	70
Figura 32 - Legenda da organização dos materiais (Sustentável) .....	71
Figura 33 - Resultados por Divisão (Sustentável) .....	72
Figura 34 - Gráficos Pizza da Revisão por Divisão (Sustentável) .....	73
Figura 35 - Resultados por Divisão discriminados por Material (Sustentável).....	74
Figura 36 - Resultados por Categoria do Revit® (Sustentável) .....	76
Figura 37 - Comparativo A1-A3 (Produção dos Materiais) .....	77
Figura 38 - Comparativo A4 (Transporte).....	78
Figura 39 - Comparativo B2-B5 (Manutenção e Substituição).....	79
Figura 40 - Comparativo C2-C4 (Fim de Vida) .....	80
Figura 41 - Fatura real da Concessionária (Energia).....	82

Figura 42 - Modelo 3D com a inserção dos painéis solares .....	84
Figura 43 - Fatura real da Concessionária (Água).....	86
Figura 44 - Modelo 3D do Sistema de captação de água pluvial .....	89
Figura 45 - Reservatório Superior .....	90
Figura 46 - Reservatório setorizado.....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição das camadas da parede convencional .....	47
Tabela 2 - Composição das camadas da parede sustentável.....	65
Tabela 3 - Comparação entre os sistemas de energia (Base 452 kWh).....	83
Tabela 4 - Comparação entre os sistemas de água (Base 31 m <sup>3</sup> /mês).....	88

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>17</b>
2.1. GERAL.....	17
2.2. ESPECÍFICOS .....	17
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>18</b>
3.1. MEIOS E MÉTODOS DE PRODUÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	18
<b>3.1.1. Técnica construtiva</b> .....	<b>18</b>
<b>3.1.2. Método construtivo</b> .....	<b>18</b>
<b>3.1.3. Processos construtivos</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1.4. Sistemas construtivos</b> .....	<b>20</b>
3.1.4.1. Convencional.....	20
3.1.4.2. Sustentável.....	21
<b>3.1.5. Sustentabilidade na construção civil</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1.6. Diretrizes gerais para Construções Sustentáveis</b> .....	<b>23</b>
<b>3.1.7. Impactos ambientais na Construção Civil</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1.8. Análise de Ciclo de Vida (ACV)</b> .....	<b>26</b>
3.2. BUILDING INFORMATION MODELING OU BIM .....	27
<b>3.2.1. Conceito BIM</b> .....	<b>27</b>
<b>3.2.2. Dimensões e níveis de desenvolvimento do BIM</b> .....	<b>29</b>
<b>3.2.3. Interoperabilidade e recursos tecnológicos do BIM</b> .....	<b>31</b>
<b>3.2.4. Benefícios e desafios da implementação do BIM</b> .....	<b>31</b>
<b>3.2.5. Softwares do sistema BIM</b> .....	<b>32</b>
3.2.5.1. Revit® .....	32
3.2.5.2. Tally®.....	32
3.3. TECNOLOGIA BIM NA CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL.....	32
<b>3.3.1. Principais aplicações de BIM na sustentabilidade</b> .....	<b>32</b>
<b>3.3.2. Exemplo do BIM na sustentabilidade</b> .....	<b>33</b>
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>34</b>
4.1. ESTUDO DE CASO .....	34
4.2. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	36
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>46</b>
5.1. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) – PAREDE CONVENCIONAL.....	46

<b>5.1.1. Modelagem da Parede Convencional</b> .....	<b>46</b>
<b>5.1.2. Camadas da Parede Convencional</b> .....	<b>46</b>
<b>5.1.3. Associação dos Materiais no Tally®</b> .....	<b>48</b>
<b>5.1.4. Processamento da ACV e Conceitos</b> .....	<b>51</b>
<b>5.1.5. Resultados da ACV da Parede Convencional</b> .....	<b>54</b>
5.1.5.1. Distribuição dos Impactos por estágio do Ciclo de Vida .....	55
5.1.5.2. Resultados por divisão .....	57
5.1.5.3. Resultados por Divisão discriminados por Material .....	60
5.1.5.4. Resultados por Categoria do Revit® .....	62
<b>5.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) – PAREDE SUSTENTÁVEL</b> .....	<b>64</b>
<b>5.2.1. Modelagem da Parede Sustentável</b> .....	<b>64</b>
<b>5.2.2. Camadas da Parede Sustentável</b> .....	<b>64</b>
<b>5.2.3. Associação dos Materiais no Tally ®</b> .....	<b>66</b>
<b>5.2.4. Resultados da ACV da Parede Sustentável</b> .....	<b>68</b>
5.2.4.1. Distribuição dos Impactos por estágio do Ciclo de Vida .....	68
5.2.4.2. Resultado por Divisão .....	71
5.2.4.3. Resultados por Divisão discriminados por Material .....	73
5.2.4.4. Resultados por Categoria do Revit® .....	75
<b>5.3. COMPARAÇÃO ENTRE PAREDE CONVENCIONAL E SUSTENTÁVEL (ACV)</b> ...	<b>77</b>
<b>5.4. ANÁLISE COMPARATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO RESIDENCIAL</b> .....	<b>81</b>
<b>5.4.1. Cenário 1: Residência Convencional (Sem Geração Fotovoltaica)</b> .....	<b>82</b>
<b>5.4.2. Cenário 2: Residência Sustentável (Com Geração Fotovoltaica)</b> .....	<b>83</b>
<b>5.4.3. Análise Comparativa da Economia</b> .....	<b>83</b>
<b>5.4.4. O papel Integrador do BIM</b> .....	<b>85</b>
<b>5.5. ANÁLISE ECONÔMICA DO CONSUMO DE ÁGUA E POTENCIAL DE REDUÇÃO</b> 86	
<b>5.5.1. Cenário 1: Residência Convencional (Sem sistema de captação da água pluvial)</b> ..	<b>87</b>
<b>5.5.2. Cenário 2: Residência Sustentável (Com sistema de captação da água pluvial)</b> .....	<b>87</b>
<b>5.5.3. Análise Comparativa da Economia</b> .....	<b>88</b>
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	<b>92</b>
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	94
ANEXO A – PLANTA BAIXA DO TÉRREO.....	101

## 1. INTRODUÇÃO

A construção civil possui papel de destaque na economia brasileira, movimentando significativamente o setor produtivo e contribuindo para o desenvolvimento urbano. Entretanto, essa mesma relevância contrasta com deficiências recorrentes no setor, como baixa produtividade, retrabalho, desperdício de materiais, falhas no gerenciamento de estoque e execução das atividades em obra (Araújo et al., 2023). Além disso, o crescimento populacional, o aumento do padrão de vida e a ampliação da demanda por infraestrutura intensificam a atuação da indústria da construção, ao mesmo tempo em que elevam seus impactos ambientais (Chicombo, 2023).

O setor é reconhecidamente um dos maiores consumidores de recursos naturais, como os derivados de extração mineral, e um dos principais geradores de resíduos sólidos. A destinação inadequada desses resíduos, associada ao uso de métodos construtivos convencionais e pouco eficientes, compromete diretamente o meio ambiente (Gomes et al., 2021). Nesse cenário, a sustentabilidade se apresenta como uma exigência urgente, sendo necessário adotar práticas que reduzam os impactos ambientais e promovam o uso racional dos recursos ao longo do ciclo de vida das edificações (Barbosa; Pedreiro, 2024).

Com os avanços tecnológicos e as novas exigências da sociedade, a indústria da construção civil tem buscado soluções mais duráveis, eficientes e ambientalmente conscientes. A adoção de ferramentas inovadoras, como o *Building Information Modeling* (BIM) representa um passo importante nesse processo de transição. A metodologia BIM permite uma abordagem integrada ao projeto, possibilitando o planejamento multidisciplinar e a simulação de desempenho das edificações antes da execução da obra (Machado; Souza, 2024).

Entre suas aplicações, o BIM se destaca pela capacidade de reduzir custos e desperdícios, facilitar o reaproveitamento de materiais e integrar dados sobre custos, prazos e materiais em modelos digitais tridimensionais. A combinação do BIM com práticas sustentáveis, como a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e a economia circular, tem promovido reduções significativas nas emissões de carbono e no descarte de resíduos, aproximando o setor dos compromissos estabelecidos pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Gonçalves et al., 2025).

Diante desse cenário, esta pesquisa propõe-se a aplicar a metodologia BIM como suporte aos processos de análise da sustentabilidade na construção civil. A proposta fundamenta-se na comparação entre dois cenários construtivos para o componente parede externa de uma residência unifamiliar localizada em Manaus/AM: um baseado em um sistema

convencional e outro incorporando estratégias sustentáveis, incluindo o uso de materiais ecológicos, painéis solares e um sistema de captação de águas pluviais para fins não potáveis. Ambos os modelos foram desenvolvidos em ambiente BIM, utilizando ferramentas integradas da metodologia, como o Revit® para a modelagem e organização das informações do projeto, e o Tally® para a realização da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Esses recursos possibilitaram a simulação dos impactos ambientais associados aos materiais e às soluções construtivas adotadas em cada cenário. A partir dessas aplicações, busca-se evidenciar o potencial do BIM como uma abordagem estruturante na construção de edificações mais eficientes, conscientes e alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. GERAL

Aplicar a metodologia BIM como suporte para integrar e promover práticas sustentáveis em componentes específicos de um projeto de construção civil, com ênfase no sistema de parede, contribuindo para a redução da geração de resíduos e para a otimização do uso de recursos (materiais, água e energia) ao longo do ciclo de vida da edificação.

### 2.2. ESPECÍFICOS

1. Identificar, no estudo de caso, os aspectos da sustentabilidade aplicáveis ao sistema de parede e aos sistemas complementares (captação de água pluvial e energia solar), estabelecendo os critérios de desempenho utilizados na avaliação.
2. Explorar a aplicação da metodologia BIM por meio das ferramentas Revit® (modelagem) e Tally® (Avaliação do Ciclo de Vida), demonstrando como essas soluções contribuem para a redução dos impactos ambientais e para a otimização do uso de recursos (água, energia e materiais) ao longo do ciclo de vida da edificação.
3. Realizar o estudo comparativo entre os cenários convencional e sustentável por meio das simulações BIM (ACV da parede e análises de água e energia), quantificando e analisando os impactos gerados e verificando a aderência das soluções avaliadas às metas de sustentabilidade propostas.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. MEIOS E MÉTODOS DE PRODUÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

##### 3.1.1. Técnica construtiva

De acordo com Santos (2022), as técnicas construtivas referem-se ao conjunto de procedimentos práticos empregados na execução de edificações, abrangendo desde a preparação do terreno até a finalização de elementos estruturais, fechamentos e acabamentos. Nesse cenário, a construção civil brasileira é historicamente conservadora quanto à adoção de inovações tecnológicas, o que faz com que os métodos construtivos tradicionais ainda sejam amplamente utilizados como referência na maior parte das obras no país. Apesar da existência de diversas soluções inovadoras já desenvolvidas, muitas delas ainda não foram incorporadas integralmente às práticas construtivas vigentes (Juliano, 2022).

O setor da construção civil tem buscado cada vez mais alternativas para enfrentar os impactos ambientais associados aos métodos tradicionais, além de práticas que contribuam para a redução dos custos finais de uma obra. Essas alternativas incluem desde melhorias nos processos de extração e transporte até a adoção de sistemas construtivos que demandam menos recursos e menor tempo de execução, representando um avanço técnico e econômico relevante para o setor (Dias et al., 2019). Nesse contexto, Cruz (2021) destaca a existência de diversos sistemas construtivos atualmente empregados, como a alvenaria estrutural, o *wood frame*, o *steel frame*, o concreto pré-moldado e o uso de containers, entre outros.

Nesse contexto, destaca-se o sistema monolítico com EPS (Poliestireno Expandido), considerado uma das técnicas construtivas mais avançadas atualmente, especialmente em termos de economia de tempo, qualidade construtiva e custo-benefício. Essa técnica emprega painéis compostos por núcleos de EPS, revestidos por telas de aço eletrossoldadas e argamassa projetada, formando um sistema leve, resistente e com ótimo desempenho termoacústico (Santos, 2022).

##### 3.1.2. Método construtivo

Segundo Lopes (2022), os métodos construtivos correspondem às diferentes formas de execução de uma obra, sendo definidos como o conjunto de procedimentos e técnicas aplicados para viabilizar a concretização de um projeto. Com o avanço das exigências do setor e a

crescente busca por eficiência e qualidade, a construção civil passou a exigir melhorias contínuas nos métodos adotados, o que impulsiona um mercado dinâmico e em constante evolução.

A introdução de novas tecnologias e a intensificação das preocupações ambientais têm incentivado o surgimento de métodos construtivos que aliam inovação à sustentabilidade. De acordo com Petrunaro et al. (2020), os processos produtivos vêm sendo reestruturados para reduzir impactos ambientais, incluindo o uso de materiais reaproveitados e soluções mais limpas. Um exemplo é a utilização de containers, originalmente empregados no transporte de cargas, que passaram a ser adaptados como alternativa construtiva sustentável. Essa prática proporciona significativa redução no tempo de execução e na geração de resíduos, promovendo um uso mais eficiente de materiais que, de outro modo, seriam descartados. Segundo Branco (2022), uma das principais características da aplicação de contêineres na construção civil é justamente a sua sustentabilidade, marcada pela reutilização de um material previamente descartado. A autora destaca ainda que essa tipologia construtiva resulta em uma obra seca, rápida e alinhada às demandas atuais por soluções mais limpas e economicamente viáveis.

### **3.1.3. Processos construtivos**

Conforme Dayan (2017), o desenvolvimento de uma construção civil envolve desde a escolha do terreno e a criação do projeto arquitetônico até as fases finais de acabamento e limpeza, exigindo planejamento e conhecimento de todas as etapas que integram esse processo. Nessa circunstância, com o avanço das estratégias produtivas e a inclusão de fatores tecnológicos, o setor vem buscando melhorias contínuas que contribuam para a gestão desses processos, com o objetivo de minimizar riscos, reduzir danos e elevar a qualidade na entrega final. Nesse contexto, o mapeamento logístico destaca-se como uma técnica que permite uma análise detalhada do processo produtivo, identificando gargalos, otimizando o fluxo de materiais e pessoas, e contribuindo para a criação de estratégias que reduzam custos, aumentem a produtividade e garantam a segurança nas obras (Leão et al., 2023). Conforme mencionado pelos autores, quando considerada um componente indispensável e estratégico desde as fases iniciais do projeto, a logística possibilita o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis e a organização eficiente do canteiro de obras. Dessa forma, a abordagem logística integrada aos processos construtivos favorece a racionalização da construção, a continuidade das atividades e o cumprimento dos prazos com qualidade.

### 3.1.4. Sistemas construtivos

Segundo Silveira et al. (2022) e Miranda et al. (2022), com o avanço do setor da construção civil, observa-se uma crescente busca por novos métodos e tecnologias construtivas que visam aumentar a produtividade e reduzir a dependência de mão de obra intensiva. Essa tendência está associada à necessidade de amenizar os impactos negativos provocados pelos métodos convencionais, promovendo a adoção de alternativas mais sustentáveis para a execução de estruturas, produzindo uma edificação confortável e segura. A inclusão de sistemas construtivos inovadores contribui para a melhoria do desempenho das edificações e para a redução dos resíduos gerados no canteiro de obras, alinhando-se às demandas por eficiência e responsabilidade ambiental no setor.

De modo geral, os sistemas construtivos podem ser classificados em dois grupos principais: sistemas convencionais e sistemas sustentáveis, conforme detalhado a seguir.

#### 3.1.4.1. Convencional

Segundo Silveira et al. (2022) e Simão e Junior (2023), o sistema construtivo convencional é o mais amplamente utilizado no setor da construção civil brasileira, principalmente devido à grande disponibilidade de matéria-prima e à facilidade de encontrar mão de obra qualificada para sua execução. Apesar dessas vantagens, esse sistema apresenta limitações significativas, como baixa produtividade, elevada geração de resíduos e o uso intensivo de recursos não renováveis.

Esse sistema construtivo é composto por estruturas formadas por pilares, vigas e lajes em concreto armado, moldado in loco e associado a armaduras de aço. A alvenaria, geralmente composta por blocos cerâmicos, é utilizada apenas para vedação dos vãos entre os elementos estruturais (Silvera et al., 2022).

Miranda et al. (2022) acrescentam que os principais sistemas convencionais podem ser divididos em dois tipos: o sistema reticulado, no qual lajes, vigas e pilares transferem as cargas até a fundação, e a alvenaria atua apenas como vedação; e o sistema autoportante, em que a própria alvenaria exerce função estrutural, sendo responsável por suportar e transmitir as cargas até a fundação.

#### 3.1.4.2. Sustentável

Segundo Reginatto e Schmitz (2022), o sistema *wood frame* é amplamente utilizado em países desenvolvidos, como Estados Unidos, Canadá e Alemanha, destacando-se pelo uso de madeira de reflorestamento como principal matéria-prima. Por essa razão, integra o grupo dos sistemas construtivos sustentáveis, apresentando-se como uma alternativa capaz de aliar qualidade, rapidez e redução significativa de desperdícios e impactos ambientais. Esse sistema evidencia o potencial da industrialização da construção civil, demonstrando que é possível conciliar eficiência produtiva e responsabilidade ambiental.

No campo das soluções sustentáveis, outra alternativa relevante é o sistema monolítico, o qual, conforme Silveira et al. (2022), apresenta desempenho superior ao sistema convencional no que diz respeito à geração de resíduos. Sua execução resulta em menor acúmulo de materiais descartados no canteiro e contribui para a redução de problemas sanitários, como a proliferação de insetos vetores de doenças e roedores, promovendo um ambiente mais limpo e seguro.

Além disso, o *Light Steel Framing* (LSF) compõe a segunda categoria dos sistemas sustentáveis, sendo considerado uma alternativa ao uso da alvenaria tradicional. De acordo com Miranda et al. (2022), o LSF utiliza perfis de aço como principal elemento estrutural, enquanto o fechamento dos painéis pode ser executado com placas cimentícias, PVC (*Policloruro de Vinila*) ou OSB (*Oriented Strand Board*). Suas características leveza, versatilidade e facilidade de montagem contribuem para o menor consumo de recursos e para a necessidade reduzida de fundações robustas, reforçando seu enquadramento entre os sistemas de menor impacto ambiental. Com base nos conceitos abordados, observa-se que os termos técnica, método, processo e sistema construtivo possuem particularidades distintas, embora estejam inter-relacionados dentro do contexto da construção civil. A Figura 1, apresenta um comparativo entre as categorias construtivas com o objetivo de sintetizar as diferenças e facilitar a compreensão entre as categorias:

Figura 1- Comparativo entre técnica, método, processo e sistema construtivo

CATEGORIA	DEFINIÇÃO	CARACTERÍSTICAS
Técnica Construtiva	Conjunto de procedimentos práticos aplicados na execução das edificações, desde o preparo do terreno até os acabamentos.	Atuação direta na obra; execução prática; é específica por etapa ou material.
Método Construtivo	Forma organizada de executar a obra, composta por procedimentos e técnicas com o objetivo de concretizar o projeto.	Define o modo de construir; organiza etapas; pode envolver inovação tecnológica.
Processo Construtivo	Sequência integrada de etapas que compõem a execução da obra, do planejamento à finalização.	Abrange logística, cronograma e gestão; envolve controle de recursos, qualidade e execução no canteiro.
Sistema Construtivo	Conjunto integrado de técnicas, métodos e tecnologias utilizadas para viabilizar a construção de uma edificação.	Integra técnica, método e processo de forma sistêmica; integra elementos e soluções construtivas.

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

### 3.1.5. Sustentabilidade na construção civil

A sustentabilidade sempre foi uma questão urgente, mas, com o passar do tempo, essa urgência tornou-se ainda mais evidente diante da intensificação das práticas humanas prejudiciais ao meio ambiente. Atender às necessidades imediatas sem comprometer o futuro é um dos principais desafios da atualidade (Barbosa, 2021). Nesse sentido, a autora destaca que a sustentabilidade pode estar presente em todas as etapas de uma obra, desde sua concepção até a execução, considerando seus pilares fundamentais: a economia de recursos, o bem coletivo e a preservação ambiental. Com o crescimento acelerado das cidades, a construção civil contribui diretamente para a ampliação dos impactos ambientais, exigindo, portanto, uma mudança significativa de postura.

Segundo Nascimento et al. (2022) a construção civil possui papel de grande relevância nas dimensões econômica e social, mas também se destaca como uma das principais responsáveis pelos impactos negativos ao meio ambiente. Estima-se que mais de 50% dos resíduos sólidos descartados de forma inadequada são oriundos do setor, evidenciando a necessidade urgente da aplicação de práticas mais sustentáveis. Nesse contexto, os autores

mencionam que a sustentabilidade pode ser compreendida como a capacidade de suprir as necessidades atuais sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas próprias necessidades.

O conceito de sustentabilidade tem se tornado cada vez mais presente nas discussões contemporâneas e vai além da simples redução dos impactos ambientais, quando aplicado à construção civil, é normalmente associado apenas à diminuição de danos ao meio ambiente, mas é necessário considerar outros aspectos igualmente relevantes, como os de ordem social, econômica e cultural (Lopes et al., 2022). Nesse sentido, os autores destacam que o conceito de sustentabilidade evoluiu ao longo dos anos e passou a abranger todos os recursos ligados ao desenvolvimento das atividades humanas, com isso para que a sustentabilidade seja efetivamente alcançada, ela não deve ser vista apenas como uma prática corretiva, mas como um princípio orientador de políticas públicas e ações sociais.

Nesse cenário, compreender os aspectos da sustentabilidade e suas aplicações em diferentes áreas permite planejar soluções mais eficazes. No contexto da construção civil, isso significa buscar o equilíbrio entre a necessidade de edificar e a preservação do meio ambiente, garantindo a harmonia entre o desenvolvimento urbano e os recursos naturais (Marques et al., 2025).

### **3.1.6. Diretrizes gerais para Construções Sustentáveis**

Historicamente, o ser humano mantinha uma relação em equilíbrio com o meio ambiente, fazendo o uso apenas dos recursos necessários para a sua sobrevivência. No entanto, com o avanço da Revolução Industrial Inglesa, no século XVIII, esse equilíbrio foi rompido pois houve uma intensa exploração dos recursos naturais em decorrência do crescimento do mercado consumidor (Conceição; Santos, 2020). Nesse contexto, a construção civil passou a consumir elevadas quantidades de água, energia e matérias-primas, gerando assim mais resíduos influenciando negativamente o meio ambiente, causando grandes impactos como as mudanças climáticas e a degradação dos ecossistemas (Paiva; Ravache, 2021). Segundo Conceição e Santos (2020) o conceito de desenvolvimento sustentável surgiu na década de 1980, por meio de uma comissão da Organização das Nações Unidas (ONU), com o objetivo de suprir as necessidades da geração presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem as suas próprias necessidades. Nesse cenário, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela ONU, representam um apelo global à ação para erradicar a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima, e promover paz e

prosperidade para todos. A Agenda 2030, da qual o Brasil é signatário, orienta políticas públicas e estratégias setoriais em diferentes áreas, incluindo a construção civil. Dessa forma, práticas sustentáveis no setor contribuem diretamente para o alcance das metas dos ODS, reforçando a importância de soluções que integrem responsabilidade ambiental, equidade social e viabilidade econômica (ONU Brasil, 2025).

Como resposta a essa nova realidade, surgiram as construções sustentáveis, que buscam unir o desenvolvimento econômico à preservação ambiental (Conceição; Santos, 2020). Entre as principais diretrizes destacam-se: o uso racional da água, a eficiência energética, o reaproveitamento de materiais, a ventilação natural e a escolha de materiais adequados, com baixo impacto ambiental e maior durabilidade. Essas práticas devem ser aplicadas desde a concepção do projeto até a execução da obra, visando reduzir os impactos ambientais e garantir melhores condições de conforto e qualidade de vida (Conceição; Santos, 2020; Paiva; Ravache, 2021). A Figura 2 ilustra algumas estratégias de aproveitamento passivo dos recursos naturais na construção civil, como ventilação cruzada, telhado verde, orientação solar e o uso de materiais adequados ao clima local.

Figura 2 - Estratégias de aproveitamento passivo dos recursos naturais



Fonte: Souza, 2014.

Além das vantagens ambientais, essas diretrizes promovem economia no consumo de recursos e alinhamento com os ODS, em especial quando são inseridas por grandes corporações do setor, que possuem potencial para causar impactos positivos em larga escala (Ferreira et al., 2023). Assim, a construção sustentável deve assegurar a integração equilibrada dos três pilares da sustentabilidade: ambiental, social e econômico, conforme definidos por Elkington (1997) e reafirmados por Monteiro (2022). A Figura 3 apresenta esses pilares de forma simbólica, reforçando a base conceitual que equilibra o desenvolvimento sustentável na construção civil.

Figura 3 - Pilares da Sustentabilidade



Fonte: Araújo, 2022.

Nesse contexto, Oliveira (2022) aprofunda a conceituação dessas dimensões, explicando que a dimensão social está relacionada ao capital humano envolvido nas atividades da organização, bem como às relações com a comunidade do entorno e a sociedade em geral. Já a dimensão econômica deve ser compreendida como o desenvolvimento da economia com vistas à melhoria da qualidade de vida das pessoas, sem comprometer os recursos das futuras gerações. Por fim, a dimensão ambiental refere-se a todas as condutas que, direta ou indiretamente, impactam o meio ambiente, exigindo ações que minimizem esses impactos e promovam o uso racional dos recursos naturais.

### **3.1.7. Impactos ambientais na Construção Civil**

A construção civil é um dos setores que mais impactam o meio ambiente (Conceição; Santos, 2020). Diante desse cenário, Petrunaro (2020) destaca o crescimento acelerado da urbanização e a crescente demanda por edificações tem expandido de forma significativa o consumo de recursos naturais a degradação dos ecossistemas. De acordo com Conceição e Santos (2020), o setor é responsável por cerca de 75% do consumo dos recursos naturais, 20% da água das cidades e pela geração de aproximadamente 80 milhões de toneladas por ano de resíduos, com isso esse panorama mostra a urgência de que se deve repensar os métodos construtivos com o objetivo de minimizar os impactos sociais associados.

Conforme o Art. 1º da Resolução CONAMA nº 001/1986, considera-se o impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente causadas por atividades humanas, que afetem de forma direta ou indiretamente: a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas do meio ambiente; e a qualidade dos recursos naturais (Brasil, 1986).

Entre os principais impactos ambientais gerados pela construção civil, Paiva e Ravanche (2021) enfatizam: o alto consumo de recursos naturais; a geração de resíduos; a poluição sonora durante as obras; o aumento do aquecimento global; o desperdício de água; as alterações em áreas de vegetação e insolação; impactos nos depósitos hídricos; e o consumo elevado de energia elétrica por uso ineficiente de equipamentos e máquinas. Nesse contexto, os autores ainda afirmam que, embora esses impactos sejam em alguns casos inevitáveis para o progresso tecnológico e o desenvolvimento do país muitas vezes são agravados pela falta de processos adequados, pela escolha inadequada de materiais e pela ausência de planejamento sustentável. Como forma de minimizar esses efeitos negativos, várias estratégias vêm surgindo e têm sido adotadas, entre elas o uso de certificações ambientais, como LEED, AQUA-HQE, BREEAM e Casa Azul + Caixa, que oferecem reconhecimento técnico a empreendimentos que atendem aos critérios de sustentabilidade ambiental (Viana; Woelffel, 2024). Entre as práticas sustentáveis aplicáveis ao setor, destaca-se também o aproveitamento da água da chuva para fins não potáveis, como irrigação, limpeza e descargas sanitárias. De acordo com a NBR 15527 (2007), essa técnica é recomendada para reduzir o consumo de água potável e mitigar os impactos associados à exploração excessiva dos recursos hídricos.

### **3.1.8. Análise de Ciclo de Vida (ACV)**

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) consolidou-se como uma das principais ferramentas para medir, interpretar e comparar os impactos ambientais associados a produtos e sistemas construtivos. Segundo Wahrlich et al. (2020), trata-se de um método capaz de visualizar toda a cadeia produtiva e seus impactos ambientais, sociais e econômicos, permitindo quantificar e gerenciar os recursos naturais envolvidos, como água, energia, matéria-prima, insumos e até esforços de mão de obra. No Brasil, sua estrutura metodológica é regulamentada pela ABNT NBR ISO 14040:2009, a qual organiza o processo em três etapas fundamentais: classificação, caracterização e ponderação, constituindo a base normativa para qualquer estudo de ACV aplicado ao setor da construção. No contexto da sustentabilidade das edificações, Nogueira (2018) destaca que a ACV se tornou essencial diante do aumento das preocupações ambientais relacionadas ao setor, sendo particularmente eficiente quando aplicada nas fases iniciais do projeto, momento no qual o potencial de redução de impactos é maior devido à possibilidade de ajustes no sistema construtivo.

Entretanto, apesar de seu potencial estratégico, a ACV enfrenta limitações importantes quando aplicada à construção civil brasileira (Nogueira, 2018). A autoria ainda evidencia que

o processo ainda é complexo, demanda tempo e enfrenta obstáculos decorrentes da falta de bancos de dados nacionais consolidados, o que limita a confiabilidade dos inventários e torna arriscada a adoção direta de dados estrangeiros, devido às diferenças tecnológicas, regionais e construtivas. Essa limitação torna-se ainda mais expressiva quando a ACV é associada ao BIM, pois softwares interoperáveis, como o Tally®, utilizam bases de dados internacionais, o que pode gerar discrepâncias. Nesse contexto, compreender os diferentes escopos de aplicação da ACV torna-se fundamental. Nickel (2025) descreve três abordagens principais:

- *Cradle to gate* (do berço ao portão): avalia os impactos apenas até a saída do produto da fábrica;
- *Cradle to grave* (do berço ao túmulo): considera todo o ciclo de vida até o descarte final;
- *Cradle to cradle* (do berço ao berço): incorpora processos de reciclagem e reinserção do material na cadeia produtiva, fechando o ciclo ambiental.

Essas distinções permitem que o pesquisador selecione o escopo mais adequado ao objetivo do estudo, especialmente quando há limitações de dados, como ocorre no Brasil.

## 3.2. BUILDING INFORMATION MODELING OU BIM

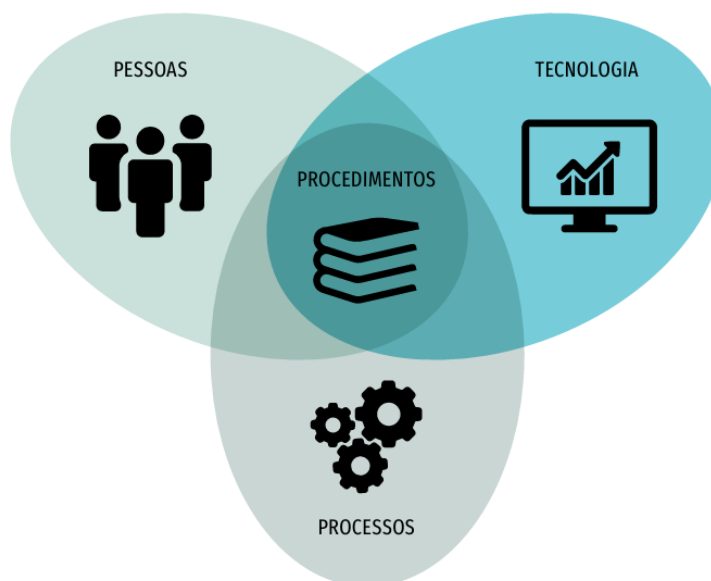
### 3.2.1. Conceito BIM

O *Building Information Modeling* (BIM), ou Modelagem da Informação da Construção, é uma metodologia que utiliza a tecnologia da informação para criar e gerenciar modelos virtuais tridimensionais dos projetos de edificações. (Fraporti, 2023; Leão et al., 2023). Nesse contexto, Fraporti (2023) destaca que, diferentemente do modelo *Computer Aided Design* (CAD), baseado em desenhos genéricos simples, ou seja, sem informações e características, o BIM permite representar cada elemento do projeto com dados específicos e interativos os quais são atualizados automaticamente ao sistema conforme as alterações realizadas no projeto, em todas as vistas e cortes, tornando-o processo mais eficiente e preciso. Segundo Cardoso (2022), a utilização do BIM favorece a elaboração dos projetos e o levantamento preciso de quantitativos, por meio da dimensão 4D, além de possibilitar o planejamento da obra com base no BIM 5D.

A metodologia BIM fundamenta-se em três pilares essenciais: tecnologias, processos e pessoas. A partir de sua aplicação, torna-se possível configurar o modelo tridimensional, visualizar a edificação em 3D com mais clareza, gerar automaticamente plantas, cortes, detalhes

e documentação técnica, além de permitir identificar falhas e inconsistências entre os vários projetos ainda na fase inicial de planejamento. Isso contribui para minimizar retrabalhos, otimizar prazos de execução, criar uma base de dados centralizada e obter estimativas mais precisas de quantidades e custos (Fraporti, 2023). A Figura 4 mostra de maneira simplificada esses três pilares fundamentais sobre os quais a metodologia BIM se estrutura.

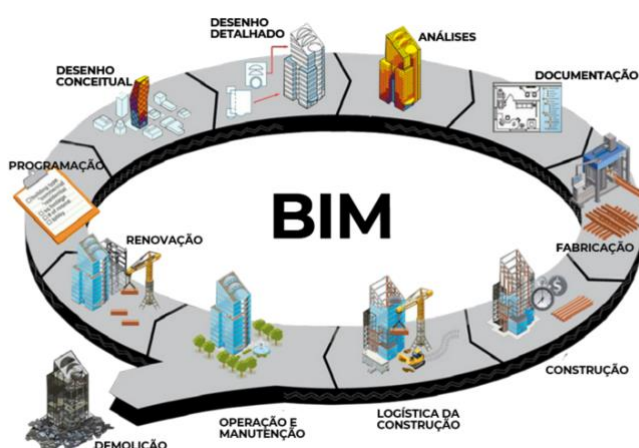
Figura 4 - Os fundamentos do BIM: pessoas, processos e tecnologia



Fonte: Agência brasileira de desenvolvimento industrial– ABDI, 2017.

A modelagem da informação da construção vai além de um modelo 3D parametrizado, configurando-se como uma ferramenta de coordenação de informações por meio de bancos de dados integrados. Dessa forma, o modelo não se limita à representação tridimensional, permitindo também a incorporação de informações relativas ao planejamento da obra (4D), estimativas de quantitativos e custos (5D), análises de sustentabilidade (6D) e manutenção do edifício (7D) (Cardoso, 2022). A Figura 5 ilustra as etapas do ciclo de vida de uma edificação, abrangendo desde a programação inicial até a fase de demolição, todas integradas pelo BIM.

Figura 5 - Ciclo de vida de um projeto com aplicação do BIM



Fonte: Crasa infraestrutura (2020)

A ampliação das dimensões do BIM e sua capacidade de integrar informações complexas ao modelo digital refletem diretamente o movimento de transformação digital que vem ocorrendo no setor da construção. Essa evolução está alinhada às tendências da Indústria 4.0, que incorpora tecnologias digitais avançadas para otimizar processos produtivos e promover maior eficiência. Nesse contexto, o BIM se apresenta como uma das ferramentas mais consolidadas dessa nova era tecnológica aplicada à Construção Civil (Santos, 2022). O autor ainda destaca que o BIM integra princípios fundamentais da Indústria 4.0 ao possibilitar a interoperabilidade entre plataformas, a automação de fluxos de informação e a criação de modelos digitais que conectam o ambiente físico e virtual.

### 3.2.2. Dimensões e níveis de desenvolvimento do BIM

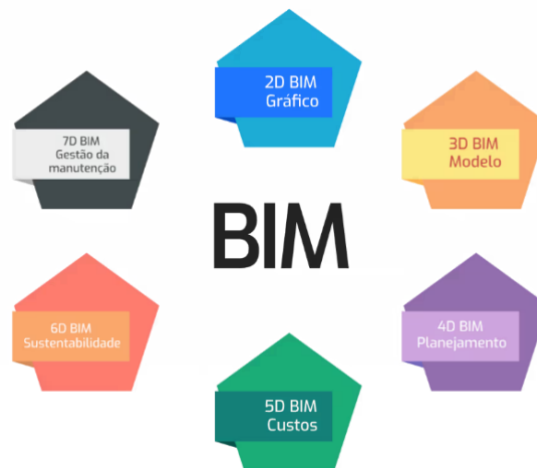
Segundo Lobo et al. (2023), a metodologia BIM não se limita à representação tridimensional do projeto, ao longo de sua evolução passou a incorporar outras dimensões que refletem diretamente em diferentes âmbitos do ciclo de vida da edificação. Nesse cenário os autores diferenciam as diferentes dimensões do BIM em:

- 3D: Corresponde à modelagem paramétrica tridimensional, com dados gráficos e não gráficos. Permite maior precisão e coesão entre os desenhos, já que alterações feitas em uma vista são automaticamente refletidas nas demais.
- 4D: Integra a variável tempo ao modelo, possibilitando o planejamento das etapas da obra, o controle de cronogramas e a antecipação de interferências logísticas.

- 5D: Adiciona a dimensão do custo, conectando as informações do modelo ao orçamento. Facilita estimativas mais precisas, controle financeiro e análise de impacto de alterações no prazo e nos insumos.
- 6D: Está relacionada à sustentabilidade, permitindo simulações de eficiência energética, conforto térmico, acústico e lumínico, além de análises de desempenho de materiais.
- 7D: Refere-se à fase de operação e manutenção da edificação. É essencial para empreendimentos de uso intensivo, pois centraliza informações para a gestão das instalações ao longo do tempo.

A Figura 6 ilustra as principais dimensões do BIM, evidenciando sua aplicação nas diferentes etapas do ciclo de vida de um empreendimento.

Figura 6 - Representação das dimensões do BIM



Fonte: Orçafâscio (2021)

Além das dimensões do BIM, os níveis de desenvolvimento do modelo, conhecidos como *Level of Development* (LOD), representam o grau de detalhamento e precisão das informações ao longo das fases do projeto (Lobo et al., 2023). Nesse cenário, os autores classificam os níveis da seguinte forma: o LOD 100 abrange a concepção inicial com informações gerais; o LOD 200 introduz elementos básicos com dados genéricos; o LOD 300 apresenta a geometria finalizada com dados técnicos suficientes para testes e visualização; o LOD 350 incluem detalhes adicionais para montagem e fabricação; o LOD 400 oferece todos os dados necessários para a execução da obra; e o LOD 500 representa o modelo final as built, voltado à operação e manutenção da edificação. Dessa forma, quanto maior o nível, maior será a definição dos elementos modelados (Nobre, 2021).

### **3.2.3. Interoperabilidade e recursos tecnológicos do BIM**

A compatibilização entre os vários projetos é essencial e indispensável para garantir a qualidade da obra e a eficiência na sua execução. Através do BIM, os projetos arquitetônico, estrutural, elétrico, hidráulico e demais disciplinas podem ser integrados em um único ambiente digital, o que permite a sobreposição das informações e ajuda a detectar possíveis interferências (Fraporti, 2023).

Nesse contexto, destaca-se o papel dos padrões de comunicação abertos, como o *Industry Foundation Classes* (IFC), o mais amplamente adotado no ambiente BIM. O IFC oferece uma representação geométrica 3D dos elementos do projeto, incluindo relações entre os objetos e dados técnicos padronizados, como materiais, funções e propriedades. Esse formato tem sido exigido por governos e grandes empresas em diferentes países, promovendo maior interoperabilidade entre softwares e assegurando a continuidade do fluxo de informações ao longo de todo o ciclo de vida do empreendimento (Nobre, 2021).

### **3.2.4. Benefícios e desafios da implementação do BIM**

A metodologia BIM apresenta diversas vantagens quando implementada da maneira correta, especialmente devido à sua modelagem paramétrica e à interoperabilidade entre softwares, que permitem a visualização precisa, a compatibilização entre disciplinas e o controle de dados do início ao fim da construção (Fraporti, 2023). Para Nobre (2021), o BIM se mostra eficiente na clareza e assertividade do planejamento, permitindo o acompanhamento mais preciso e maior controle das atividades em obra, tornando o processo mais relevante e interativo para as equipes envolvidas.

Apesar dessas vantagens, a implementação do BIM ainda enfrenta desafios significativos. Segundo Cardoso (2022), as principais barreiras estão relacionadas à resistência organizacional em abandonar a metodologia tradicional mais utilizada que é baseada no CAD 2D, além da necessidade de investimentos em softwares específicos, que apresentam custos elevados, e em equipamentos mais potentes. Junto a isso a escassez de profissionais qualificados e familiarizados com a metodologia dificulta sua aplicação e compromete os resultados esperados. O autor ainda observa que, embora o BIM contribua para a redução de inconsistências e retrabalho nos projetos, sua adoção plena requer tempo, adaptação de processos e reestruturação da cultura organizacional.

### **3.2.5. Softwares do sistema BIM**

#### **3.2.5.1. Revit®**

O Autodesk Revit® é um software BIM amplamente utilizado por arquitetos, engenheiros e profissionais da construção para modelagem de formas, estruturas e sistemas tridimensionais de forma precisa e paramétrica. Ele permite simplificar o gerenciamento de projetos ao atualizar automaticamente cortes, plantas, elevações e tabelas conforme o modelo é alterado. Além disso, oferece ferramentas para esboçar, agendar, visualizar e compartilhar modelos, o que facilita a colaboração entre equipes multidisciplinares tanto no escritório quanto no canteiro de obras. (Autodesk, 2025).

A plataforma também disponibiliza recursos como o Revit® *Cloud Worksharing* e o *BIM Collaborate Pro*, que dão suporte à colaboração remota e ao compartilhamento de um ambiente comum de dados. Com a integração de ferramentas de análise e compatibilidade com diversos formatos de arquivos, o Revit® proporciona segurança aos profissionais durante as etapas de concepção e desenvolvimento do projeto arquitetônico e estrutural (Autodesk, 2025).

#### **3.2.5.2. Tally®**

O Tally® é um aplicativo integrado ao Autodesk Revit® que permite a realização de Análise de Ciclo de Vida (ACV) diretamente no ambiente BIM. Ele possibilita que arquitetos e engenheiros quantifiquem os impactos ambientais dos materiais utilizados no projeto, tanto em avaliações completas do edifício quanto em análises comparativas de alternativas construtivas. A partir da associação de elementos modelados no Revit® com materiais presentes no banco de dados do Tally®, os usuários obtêm dados relevantes para decisões sustentáveis, sem a necessidade de técnicas avançadas de modelagem (Autodesk, 2017).

A principal vantagem do Tally® é fornecer resultados de ACV sob demanda, dentro do mesmo fluxo e tempo de desenvolvimento do projeto, oferecendo uma camada adicional de informação para a tomada de decisões desde as etapas iniciais de concepção (Autodesk, 2017).

### **3.3. TECNOLOGIA BIM NA CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL**

#### **3.3.1. Principais aplicações de BIM na sustentabilidade**

A tecnologia BIM apresenta um importante potencial para contribuir com estratégias de sustentabilidade na construção civil, uma vez que permite analisar os elementos utilizados no

processo projetual a partir das informações vinculadas a eles. Isso possibilita a escolha de soluções mais assertivas e compatíveis com objetivos sustentáveis, desde a fase de concepção do projeto até a sua conclusão (Ribeiro, 2024). O autor menciona que a escolha dos softwares BIM mais adequados depende dos objetivos das atividades a serem desenvolvidas, bem como da familiaridade do profissional de arquitetura, urbanismo ou engenharia com os softwares disponíveis no mercado.

Ribeiro (2024) destaca ainda que os efeitos das ações antrópicas sobre o meio ambiente requerem medidas eficazes para minimizar os impactos ambientais das edificações. Nesse contexto, a busca por construções que utilizem os recursos naturais de forma consciente e eficiente torna-se fundamental. A autora identifica quatro abordagens principais relacionadas à sustentabilidade em projetos arquitetônicos: eficiência energética; critérios e parâmetros de certificação ambiental; escolha de materiais com menor impacto ambiental; e reutilização e reaproveitamento de resíduos. Todas essas abordagens podem ser favorecidas com o uso adequado da modelagem BIM, que visa a junção de informações e a simulação de desempenho ambiental de maneira antecipada e integrada ao processo de projeto.

### **3.3.2. Exemplo do BIM na sustentabilidade**

Segundo o estudo proposto por Villaschi et al. (2021), a aplicação da tecnologia BIM em uma edificação residencial unifamiliar demonstrou grande potencial para apoiar decisões sustentáveis desde as etapas iniciais do projeto. Utilizando ferramentas como *FormIt*, Revit®, Insight® e Tally®, foi possível realizar análises de radiação solar, sombreamento, conforto térmico e eficiência energética, além da estimativa de impactos ambientais dos materiais. O *FormIt* contribuiu para a avaliação da envoltória da edificação ainda na fase de volumetria, enquanto o Insight® viabilizou simulações de desempenho energético com base em benchmarks reconhecidos por entidades como o *Design Explorer Online* (DEO) e o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS). Já o Tally® permitiu quantificar impactos ambientais dos materiais com base em dados europeus de ACV. Embora houvesse limitações nas versões de teste, como a falta de um banco de dados nacional e restrições na personalização dos elementos, o estudo mostrou que essas ferramentas são eficazes e podem ser usadas para análises de sustentabilidade em projetos similares. Isso reforça a viabilidade do BIM como instrumento estratégico em construções ambientalmente conscientes.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa foi classificada como aplicada, por buscar propor soluções práticas e funcionais para um problema real da construção civil, conforme a definição de Gil (2008), segundo a qual pesquisas aplicadas visam gerar conhecimentos direcionados à solução de problemas específicos. No caso deste estudo, trata-se da análise da sustentabilidade em projetos arquitetônicos por meio da metodologia BIM.

Em relação aos objetivos, a pesquisa apresentou natureza exploratória, alinhada ao que descreve Gil (2008), uma vez que busca aprofundar o conhecimento sobre a aplicação do BIM na sustentabilidade, tema ainda em processo de consolidação na prática profissional. Ao mesmo tempo, assumiu caráter explicativo, ao buscar compreender de que maneira a utilização do BIM contribuiu para a redução de impactos ambientais e a otimização do consumo de recursos (materiais, água e energia) nos componentes analisados.

A abordagem metodológica adotada foi técnica e comparativa, conforme definido por Gil (2008), uma vez que o estudo se estruturou na modelagem de dois cenários distintos (convencional e sustentável) para um componente específico (parede) dentro do ambiente BIM. Essa estrutura permitiu a análise dos resultados por meio da simulação de ACV, da avaliação energética e da estimativa de economia hídrica, além da extração automática de quantitativos e indicadores gerados pelos recursos digitais utilizados, como o plugin Tally®.

O desenvolvimento da pesquisa também se apoiou em revisão bibliográfica, que fundamentou a seleção dos aspectos de sustentabilidade considerados, bem como na análise dos dados extraídos diretamente dos modelos digitais, incluindo os materiais empregados na parede (ACV), a representação da infraestrutura para aproveitamento hídrico (captação pluvial) e o desempenho energético associado à implantação de sistemas fotovoltaicos.

### 4.1. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso será desenvolvido a partir da elaboração de dois projetos arquitetônicos modelados em ambiente BIM: um representando uma construção convencional e outro incorporando estratégias sustentáveis. Ambos os modelos se referem a uma residência unifamiliar de alto padrão construtivo<sup>1</sup>, localizada em um condomínio na cidade de Manaus/AM.

---

<sup>1</sup> Edificação situada em terreno amplo, totalmente isolada, com projeto arquitetônico exclusivo, ambientes bem distribuídos, materiais nobres e acabamentos personalizados, com atenção à estética e funcionalidade (SC Geomática, 2021, p. 9).

A edificação possui 160 m<sup>2</sup> de área construída, distribuída em uma planta que contempla dois dormitórios tipo suíte, um banheiro externo, sala de estar/jantar integrada à cozinha, área de serviço, despensa, espaço gourmet e garagem. A residência conta ainda com ampla área descoberta destinada ao paisagismo e ao lazer. O layout arquitetônico completo é apresentado no Anexo A.

O modelo convencional foi desenvolvido no Autodesk Revit® e serviu como referência para a análise. Sobre ele foram aplicadas as modificações sustentáveis, preservando a mesma configuração espacial, volumétrica e funcional do projeto base. A avaliação da sustentabilidade concentrou-se em três eixos principais:

- **Análise da Parede:** Comparação entre a solução convencional, composta por pintura acrílica externa (0,0010 m), reboco externo em argamassa (0,0150 m), bloco cerâmico de 9 cm como núcleo (0,1400 m), reboco interno em argamassa (0,0150 m) e pintura interna em tinta látex (0,0010 m), totalizando 0,3070 m de espessura; e a solução sustentável, formada por tinta à base d'água (0,0010 m), reboco externo em argamassa de cal (0,0200 m), núcleo de tijolo solo-cimento (0,1500 m), reboco interno de cal (0,0200 m) e pintura interna à base d'água (0,0010 m), resultando em 0,1920 m de espessura total. As diferenças de espessura entre os dois sistemas resultam das especificidades construtivas e dos materiais empregados em cada solução, influenciando diretamente a quantidade de insumos utilizada na composição das paredes. A ACV foi realizada com o plugin Tally®, permitindo estimar os impactos ambientais dos materiais considerando a composição e a espessura de cada camada.
- **Eficiência Energética:** Avaliação do desempenho da instalação de um sistema fotovoltaico sobre a cobertura existente. Embora o sistema não tenha sido dimensionado originalmente no projeto, sua inserção no modelo BIM permitiu estimar o potencial de redução da demanda elétrica convencional e quantificar o impacto econômico associado.
- **Aproveitamento e Gestão Hídrica:** A infraestrutura de água fria foi modelada para representar a alimentação da caixa d'água e a distribuição interna. A partir da planta e do consumo real obtido em fatura, foi estimada a economia potencial decorrente da substituição parcial do uso de água potável da concessionária por água pluvial para usos não potáveis (descargas sanitárias e irrigação), integrando a análise de desempenho hídrico ao contexto sustentável do estudo.

## 4.2. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

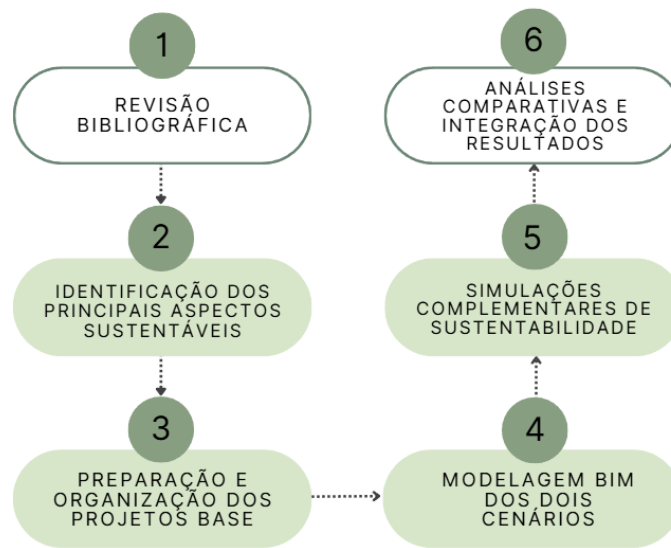
A pesquisa foi desenvolvida por meio de seis etapas principais. Inicialmente, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre sustentabilidade na construção civil e sobre a aplicação da metodologia BIM, utilizando bases de dados acadêmicas e palavras-chave específicas. Em seguida, foram identificados os principais aspectos sustentáveis aplicáveis ao estudo de caso, tais as alternativas de materiais ecológicos, a eficiência energética por meio de sistemas fotovoltaicos e a economia de água potável por meio do aproveitamento pluvial.

Na sequência, foram selecionados os softwares utilizados na aplicação da metodologia BIM, Revit®, para a modelagem do projeto, e Tally®, para a ACV e estruturado o projeto arquitetônico base, que serviu como referência para os dois cenários. Após essa etapa, procedeu-se à preparação do ambiente de trabalho no Revit®, com a configuração inicial do modelo. Em seguida, foi realizada a modelagem BIM do cenário convencional, preservando suas características originais, e posteriormente desenvolveu-se o cenário sustentável, incorporando os aspectos definidos na etapa anterior.

Com os dois modelos concluídos, foram extraídos os quantitativos de materiais necessários e demais informações construtivas, servindo de base para as análises comparativas. A ACV das paredes convencional e sustentável foi realizada por meio do plugin Tally®, enquanto a análise energética foi conduzida com base em dados reais de consumo, comparando o cenário convencional com o cenário de geração fotovoltaica. A estimativa de economia de água foi calculada com base no consumo mensal registrado na fatura real de uma residência com características semelhantes à residência-modelo, inserida no mesmo contexto urbano da área de estudo. Essa referência permitiu considerar um padrão de uso compatível com a realidade local, possibilitando avaliar o potencial de redução do consumo de água potável mediante o uso de água de chuva para fins não potáveis.

Por fim, procedeu-se à análise comparativa dos resultados, permitindo identificar as diferenças entre os cenários convencional e sustentável nos aspectos ambientais sob o contexto da ACV, energético e hídrico. A Figura 7 apresenta a representação esquemática das etapas metodológicas descritas, desde a revisão bibliográfica até a comparação final entre os modelos elaborados.

Figura 7 - Fluxograma das etapas metodológicas



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

### **Etapa 1: Revisão Bibliográfica**

A revisão bibliográfica foi realizada com o objetivo de embasar teoricamente a pesquisa, abordando temas como sustentabilidade na construção civil, impactos ambientais das edificações, construção sustentável e a metodologia BIM. A principal ferramenta utilizada para a busca dos materiais foi o Google Acadêmico, complementado por outras bases acadêmicas como Scielo e Periódicos CAPES.

Foram selecionados trabalhos publicados nos últimos cinco anos (2020 a 2025), assegurando a atualização e relevância das informações. A pesquisa bibliográfica foi de natureza fechada, restringindo-se a publicações acadêmicas e científicas. Os termos utilizados na busca incluíram palavras-chave como: “sustentabilidade”, “construção civil”, “impactos ambientais”, “construção sustentável” e “BIM na construção civil”, “Análise de Ciclo de Vida (ACV) e BIM”, “Captação de Água Pluvial e BIM” e “Energia Solar e BIM”

### **Etapa 2: Identificação dos principais aspectos sustentáveis**

Nesta etapa foram definidos os principais aspectos sustentáveis incorporados ao modelo arquitetônico da residência unifamiliar, fundamentados na revisão bibliográfica e em princípios técnicos aplicados à construção civil. A seleção desses aspectos considerou os três pilares da sustentabilidade: ambiental, social e econômico, conforme destacado por Monteiro (2022), que ressalta a necessidade de equilíbrio entre esses eixos para que as soluções adotadas sejam efetivas, viáveis e contextualizadas.

A escolha das estratégias sustentáveis foi orientada por bases normativas e por diretrizes de impacto ambiental, com destaque para:

- ABNT NBR 15575 – Desempenho de Edificações Habitacionais: utilizada como base para a escolha de materiais e sistemas que atendam aos requisitos mínimos de desempenho da edificação, como durabilidade, conforto e qualidade ambiental;
- ABNT NBR ISO 14040 e 14044 – Avaliação de Ciclo de Vida (ACV): servirão de referência para a análise ambiental dos materiais utilizados no modelo sustentável, a ser realizada com apoio do plugin Tally® no ambiente BIM.
- EN 15804 – Sustentabilidade das obras de construção: Declarações Ambientais de Produto (EPD): utilizada como referência para a estruturação dos módulos do ciclo de vida analisados (A1–A3, A4, B2–B5, C2–C4 e Módulo D), garantindo a conformidade metodológica da ACV aplicada aos materiais construtivos no plugin Tally®

A partir dessas diretrizes, foram incorporadas as seguintes estratégias sustentáveis ao estudo de caso: o uso de materiais de menor impacto ambiental (tijolo solo-cimento, reboco à base de cal, tinta à base d'água), a eficiência energética (pela implementação de sistema fotovoltaico representado no modelo BIM, associado à análise dos consumos reais de energia), a gestão hídrica (por meio da avaliação do potencial de aproveitamento de água pluvial para fins não potáveis, também representada e quantificada com apoio do BIM).

Essas estratégias de sustentabilidade foram alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU, contribuindo para:

- ODS 6 – Água Potável e Saneamento: pela possibilidade de reaproveitamento da água da chuva;
- ODS 7 – Energia Limpa e Acessível: devido à inclusão da geração fotovoltaica;
- ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis: ao promover soluções construtivas mais responsáveis e eficientes;
- ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis: pela seleção de materiais e pelo uso racional de recursos;
- ODS 13 – Ação contra a Mudança Global do Clima: ao reduzir os impactos ambientais associados à produção e operação da edificação.

A seguir, a Figura 8 apresenta os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) relacionados a esta pesquisa, conforme destacados anteriormente.

Figura 8 - Objetivos de Desenvolvimento (ODS) da Agenda 2030 da ONU



Fonte: Organização das Nações Unidas – Brasil - Imagem adaptada pela autora (2025).

A definição e aplicação desses critérios serviram de base para o desenvolvimento do modelo sustentável e para a análise comparativa com o modelo convencional, conforme detalhado nas etapas seguintes. Os critérios sustentáveis selecionados foram organizados por categoria, conforme apresentado na Figura 9, que demonstra a relação entre o critério sustentável adotado e sua aplicação prática no modelo arquitetônico a ser desenvolvido no ambiente BIM.

Figura 9 - Critérios sustentáveis aplicados ao modelo arquitetônico

CATEGORIA	CRITÉRIO SUSTENTÁVEL	APLICAÇÃO DO MODELO
Materiais	Uso de materiais ecológicos	Tijolos solo-cimento, reboco à base de cal, tinta à base d'água
Energia	Geração de energia renovável	Modelagem do sistema fotovoltaico e análise de desempenho energético
Água	Aproveitamento da água da chuva	Modelagem da cisterna e distribuição para uso não potável

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

### **Etapa 3: Preparação e Organização dos Projetos Base**

A etapa 3 consistiu na preparação e organização do projeto base diretamente no ambiente BIM, utilizando exclusivamente o *software* Autodesk Revit®. Diferentemente de estudos que partem de plantas em CAD ou modelos arquitetônicos completos, esta pesquisa focou exclusivamente na modelagem isolada da parede que foi objeto da Análise de Ciclo de Vida (ACV). Dessa forma, o ambiente foi configurado de maneira direcionada e simplificada, considerando apenas os elementos necessários para a construção dos dois cenários estudados: parede convencional e parede sustentável.

A definição do Revit® como plataforma principal se justificou pela capacidade do software de permitir a modelagem paramétrica dos elementos construtivos e, principalmente, por sua compatibilidade com o plugin Tally®, utilizado na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A seleção desse plugin foi feita por possibilitar a associação direta dos materiais modelados a um banco de dados específico para ACV, permitindo a quantificação precisa dos impactos ambientais a partir da própria modelagem BIM.

Para viabilizar a modelagem das paredes, o ambiente BIM foi estruturado com a criação de vistas específicas, definição de níveis de referência e configuração de unidades e padrões gráficos. Essa organização prévia assegurou que os elementos modelados atendessem aos requisitos mínimos de consistência geométrica e paramétrica necessários ao processamento no Tally®.

Também foi realizada a instalação e configuração do plugin Tally®, que passou a operar integrado ao Revit®, permitindo vincular materiais do banco de dados do software aos componentes modelados. Essa preparação foi essencial para garantir a extração correta dos quantitativos e a geração dos impactos ambientais associados às duas alternativas de parede.

A adequada preparação do ambiente de trabalho possibilitou que as etapas seguintes, modelagem das paredes e execução da ACV, fossem realizadas com precisão e consistência, mantendo a confiabilidade das informações e a integridade dos dados ao longo de toda a pesquisa.

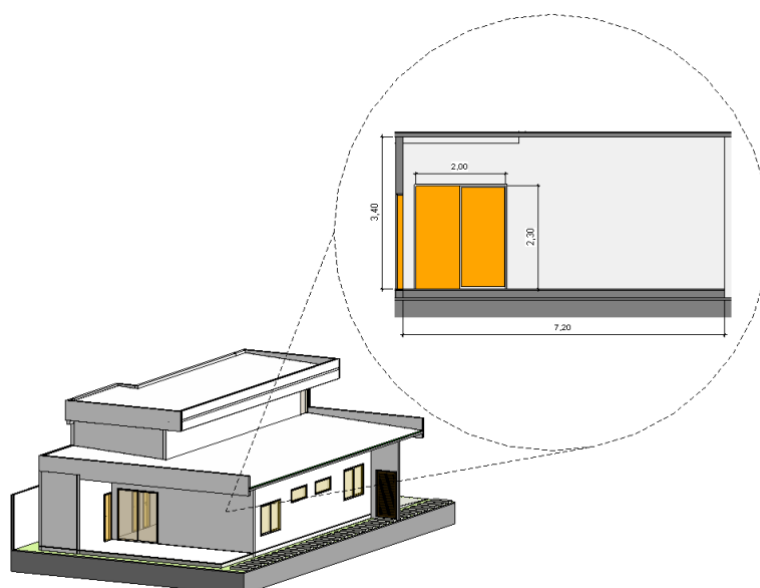
### **Etapa 4: Modelagem BIM dos Cenários Convencional e Sustentável**

A parede selecionada para a análise comparativa está localizada na parte de trás da edificação, constituindo-se em uma das maiores paredes externas da edificação. Trata-se de uma parede plana, com 7,20 m de comprimento e 3,40 m de altura, totalizando uma superfície ampla e representativa do sistema construtivo adotado. No lado esquerdo da parede está

instalada uma porta de correr, com 2,00 m de largura e 2,30 m de altura, caracterizando uma abertura significativa e que integra a área social interna ao espaço externo.

A Figura 10 ilustra a localização e as dimensões da parede no modelo BIM, destacando tanto o trecho de alvenaria quanto a esquadria. O conjunto representa uma parede externa com esquadria, composta por parede contínua de alvenaria e uma porta de correr de grande porte, o que permite avaliar de forma mais precisa o comportamento das soluções convencionais e sustentáveis. Por integrar tanto elementos opacos quanto um fechamento transparente, essa parede ofereceu condições adequadas para comparar materiais, camadas e impactos ambientais em ambos os cenários.

Figura 10 - Localização e dimensões da parede analisada no modelo BIM



Fonte: Elaborada pela autora (2025)

A escolha dessa parede foi determinada por sua representatividade bem o sistema de vedação externa da casa e possui uma área suficiente para comparar os dois cenários do estudo. Por ser uma das maiores paredes externas do projeto, ela permitiu uma observação mais clara das diferenças de materiais e de composição entre a solução convencional e a sustentável, facilitando a leitura e o contraste dos resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Outro motivo importante é o fato de essa parede apresentar uma porta de correr de grande porte, o que incluiu o uso de esquadria no processo de análise. Essa inclusão foi relevante porque materiais como vidro e alumínio também impactam os resultados ambientais e são considerados nas categorias avaliadas pelo *puglin* Tally®. Além disso, o fato de ser uma parede simples, sem interferências estruturais ou recortes, ela facilita a modelagem, a extração

de quantitativos e a associação das camadas às opções de materiais disponíveis na biblioteca do Tally®, assegurou uma comparação mais uniforme entre os dois modelos

Nesta etapa, foram desenvolvidos dois modelos distintos: um modelo convencional e um modelo sustentável, ambos representando a mesma parede selecionada para o estudo de caso.

- Modelagem BIM do Cenário Convencional

A modelagem da parede convencional foi realizada no Revit® seguindo os materiais e as soluções construtivas amplamente utilizadas no contexto brasileiro e regional, especialmente o sistema convencional em alvenaria cerâmica, predominante em edificações residenciais na região Norte. A parede foi representada com todas as suas camadas reais: bloco cerâmico de vedação, argamassa de reboco e pintura acrílica, além da porta de correr em vidro temperado.

Foram definidas espessuras e propriedades correspondentes a cada camada, garantindo que o elemento representasse com fidelidade o sistema convencional adotado na construção civil. Após a modelagem, a parede foi isolada em um *workset* específico, permitindo que somente ela fosse reconhecida pelo Tally® durante o processamento.

Em seguida, todos os materiais da parede e da esquadria foram associados aos itens disponíveis na biblioteca do Tally®, obedecendo às categorias *Walls* (paredes) e *Doors* (portas). Os materiais correspondentes foram selecionados com base no sistema americano do plugin, utilizando equivalências técnicas para reboco, bloco cerâmico e pintura. Esse cenário serviu como base comparativa para a ACV, constituindo o “padrão convencional” adotado na pesquisa.

- Modelagem BIM do Cenário Sustentável

A modelagem da parede sustentável foi desenvolvida a partir do mesmo elemento geométrico utilizado no cenário convencional, mantendo dimensões e tipologias idênticas, condição essencial para uma comparação justa dos impactos ambientais.

Neste cenário, o sistema de vedação foi modificado no Revit® para representar materiais de menor impacto ambiental, como tijolo solo-cimento, reboco sustentável e tinta à base de água. A porta foi mantida com vidro para garantir equivalência, mas sem componentes metálicos pesados.

Assim como no modelo anterior, o elemento foi isolado em um *workset* próprio e preparado para análise no Tally®. Contudo, devido às limitações da biblioteca do plugin, construída com base em materiais típicos do mercado norte-americano, não foi possível selecionar diretamente materiais sustentáveis brasileiros e regionais. Assim, alguns materiais

tiveram de ser representados pelos mesmos equivalentes utilizados no cenário convencional, o que reduziu parcialmente a sensibilidade da comparação.

Essa limitação é reconhecida neste trabalho, mas ainda assim a modelagem paramétrica permitiu representar adequadamente o comportamento relativo dos sistemas e avaliar diferenças reais nos materiais que puderam ser substituídos, como a tinta à base de água. Com isso, ambos os cenários foram analisados de forma equivalente no Tally®, garantindo uniformidade metodológica.

### **Etapa 5: Simulações complementares de sustentabilidade**

A quinta etapa consistiu na realização das simulações e análises complementares de sustentabilidade, com o objetivo de ampliar a avaliação do desempenho ambiental da residência-modelo para além da materialidade da parede. Nesse estágio, foram conduzidas três frentes analíticas distintas, ambiental, energética e hídrica, permitindo uma visão integrada dos impactos gerados ao longo do ciclo de vida da edificação.

A primeira análise correspondeu à Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da parede convencional e da parede sustentável, conduzida por meio do plugin Tally®, previamente associado aos modelos BIM desenvolvidos no Revit®. Essa simulação permitiu quantificar os impactos ambientais relacionados à etapa de produção dos materiais (módulos A1–A3), com base nos parâmetros das normas ISO 14040/14044 e da EN 15804, possibilitando a comparação entre as duas soluções construtivas.

Na segunda frente, foi realizada uma análise energética comparativa, baseada em dados reais provenientes de faturas da concessionária Amazonas Energia. A avaliação considerou a demanda mensal estimada da residência-modelo e comparou dois cenários operacionais: o consumo integral de energia da rede (cenário convencional) e o consumo compensado por geração fotovoltaica (cenário sustentável). Embora não tenha sido utilizada simulação energética em ambiente BIM, os resultados foram integrados ao estudo por meio da quantificação dos ganhos operacionais ao longo da vida útil.

Por fim, desenvolveu-se a estimativa de economia hídrica, utilizando a planta arquitetônica como base para calcular a área potencial de captação do telhado. A análise foi complementada com dados reais da fatura de abastecimento de água e informações tarifárias da Águas de Manaus, permitindo estimar o potencial de redução de consumo de água potável caso fosse implantado um sistema de aproveitamento de águas pluviais para fins não potáveis, como irrigação e vasos sanitários.

A integração dessas três análises possibilitou uma avaliação ampliada da sustentabilidade da residência, relacionando as escolhas de projeto (BIM 5D) ao desempenho operacional da edificação (6D), reforçando a contribuição do BIM como ferramenta de apoio à tomada de decisão sustentável.

### **Etapa 6: Análises comparativas e integração dos resultados**

A etapa final da pesquisa consistiu na análise comparativa entre o cenário arquitetônico convencional e o cenário sustentável, com base nas simulações e dados obtidos nas etapas anteriores. Essa comparação foi estruturada em três categorias principais, materiais, energia e água, definidas previamente como os eixos fundamentais de avaliação da sustentabilidade no estudo de caso.

- **Materiais**

Nesta categoria, avaliou-se o impacto ambiental da substituição dos materiais convencionais pelos materiais sustentáveis empregados na parede-modelo. A avaliação foi realizada por meio da Análise de Ciclo de Vida (ACV) utilizando o *plugin* Tally®, que permitiu quantificar indicadores como energia incorporada, potencial de aquecimento global (GWP), acidificação, eutrofização e demanda de energia não renovável. Os resultados possibilitaram comparar numericamente os impactos associados a cada solução e identificar reduções obtidas pelo uso de materiais sustentáveis.

- **Energia**

A análise energética refere-se à avaliação da fase de operação (dimensão 6D da sustentabilidade), optou-se por uma abordagem financeiro-econômica, fundamentada em dados reais de consumo energético.

Essa análise utilizou como fonte primária as faturas de energia elétrica fornecidas pela concessionária local. Foram comparados dois cenários com o mesmo perfil de uso residencial:

- Cenário Convencional: sem geração fotovoltaica;
- Cenário Sustentável: com sistema fotovoltaico instalado e ativo.

Para garantir a comparabilidade entre os cenários, utilizou-se o mesmo perfil de consumo mensal da residência de referência, conforme registrado em fatura real.

Com base nisso:

- Custo Total Sustentável: R\$ 77,17 (valor residual pago incluindo encargos e taxa mínima);
- Custo Total Convencional estimado: R\$ 419,08 (simulando o pagamento integral dos 452 kWh sem geração solar).

A diferença entre os valores representa economia mensal aproximada de R\$ 341,91, evidenciando a relevância da energia solar como estratégia de redução de custos operacionais.

Embora a análise econômica não tenha sido executada por meio de simulação energética BIM, o modelo tridimensional foi fundamental para visualizar, posicionar e verificar a compatibilidade dos painéis fotovoltaicos na cobertura, garantindo a integração das informações do projeto na dimensão 6D.

- Água

No eixo da água, avaliou-se o impacto da implementação do sistema de captação e uso da água da chuva sobre o consumo potável da residência. A análise utilizou como base: tarifação oficial da Águas de Manaus (2025), fatura real de abastecimento analisada.

O volume de referência adotado para os cálculos foi o consumo mensal de 31 m<sup>3</sup>/mês, obtido a partir da fatura real de uma residência com características semelhantes à residência-modelo.

Com esse valor, foram comparados dois cenários:

- Cenário 1: Convencional (sem aproveitamento pluvial): Custo mensal total: R\$ 383,03
- Cenário 2: Sustentável (com sistema pluvial para fins não potáveis): Custo mensal total estimado: R\$ 185,12

Assim, a economia mensal estimada foi de R\$ 197,91, demonstrando que o uso de água pluvial pode reduzir substancialmente o consumo de água potável da rede pública, principalmente para atividades como irrigação, lavagem de áreas externas e descargas sanitárias. Ressalta-se que essa estimativa considera apenas a redução do consumo mensal, não incluindo custos de implantação, operação ou manutenção do sistema de captação de água pluvial.

A integração das análises realizadas permitiu compreender de forma ampla os benefícios da aplicação dos critérios sustentáveis ao modelo arquitetônico. Os resultados preliminares evidenciaram reduções significativas nos impactos ambientais associados aos materiais (ACV), ganhos expressivos no consumo de energia elétrica durante a operação da edificação e uma diminuição relevante no uso de água potável por meio do aproveitamento pluvial. Em conjunto, esses achados reforçaram o papel central do BIM como ferramenta estruturante para decisões sustentáveis, ao possibilitar a organização integrada das informações do projeto, a extração precisa de quantitativos, a utilização de tecnologias complementares como o Tally® e a visualização das soluções propostas dentro do modelo digital.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

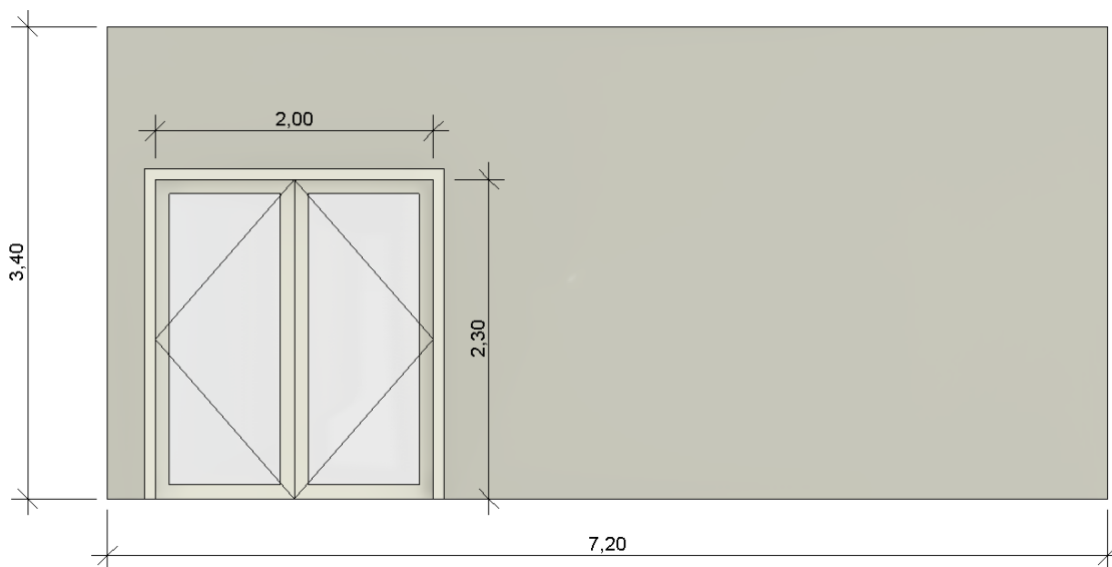
### 5.1. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) – PAREDE CONVENCIONAL

#### 5.1.1. Modelagem da Parede Convencional

Essa fase consistiu em modelar a parede escolhida de forma isolada no Revit®, mantendo apenas o trecho selecionado para o estudo. Essa separação foi feita para facilitar a visualização e permitir que a análise fosse realizada somente sobre esse elemento, evitando que outras paredes do projeto interferissem nos quantitativos e no processamento da ACV.

A parede foi inserida com as dimensões reais do projeto, totalizando 7,20 m de comprimento e 3,40 m de altura, incluindo a porta de correr com 2,00 m de largura e 2,30 m de altura. Trabalhar com o elemento isolado torna mais fácil observar cada parte da composição e garante maior precisão nas etapas seguintes, principalmente na definição dos materiais e na associação ao Tally. A Figura 11 apresenta a parede convencional modelada no Revit® para fins de análise.

Figura 11 - Parede Convencional modelada isolamento no Revit®



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

#### 5.1.2. Camadas da Parede Convencional

A parede foi configurada no Revit® com as camadas utilizadas no sistema construtivo convencional adotado no projeto-base. Seguiu-se o padrão mais comum aplicado em paredes externas no Brasil, composto por bloco cerâmico de vedação, argamassa de reboco e acabamento com pintura. Cada camada foi definida com sua espessura correspondente no *software*, o que assegurou que a modelagem representasse corretamente o sistema convencional da obra.

A Tabela 1 apresenta a composição da parede, organizada em ordem de aplicação, contemplando as espessuras reais utilizadas na modelagem.

Tabela 1 - Composição das camadas da parede convencional

<b>Camada</b>	<b>Material</b>	<b>Espessura (m)</b>
Pintura externa	Tinta acrílica	0,0010
Reboco externo	Argamassa	0,0150
Núcleo	Bloco Cerâmico 9 cm	0,1400
Reboco interno	Argamassa	0,0150
Pintura interna	Tinta látex cinza	0,0010
<b>Espessura total</b>	--	<b>0,3070</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

No caso das camadas de pintura, adotou-se a espessura correspondente à aplicação de duas demãos, procedimento usual em obras residenciais e coerente com as especificações de rendimento dos fabricantes. Essa definição foi incorporada às espessuras totais apresentadas, assegurando que o Tally® processasse corretamente a quantidade de material prevista para a composição da parede convencional.

A Figura 12 mostra a montagem das camadas no Revit®, evidenciando a configuração da parede conforme o sistema construtivo convencional adotado no Brasil.

Figura 12 - Montagem das camadas da parede convencional no Revit®

Editar montagem

Família: Parede básica  
 Tipo: Parede Convencional  
 Espessura total: 0,3070 (Padrão)      Altura da amostra: 5,0000  
 Resistência (R): 0,1577 (m<sup>2</sup>·K)/W  
 Massa térmica: 249,33 kJ/(m<sup>2</sup>·K)

Camadas

LADO EXTERNO

	Função	Material	Espessura	Coberturas	Material estrutural	Variável
1	Estrutura [1]	Pintura Externa	0,0010	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Estrutura [1]	Reboco	0,0150	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Limite do núcleo	Camadas acima d	0,0000			
4	Estrutura [1]	BL_ALV_09CM	0,1400	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Limite do núcleo	Camadas abaixo d	0,0000			
6	Estrutura [1]	Reboco	0,1500	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Estrutura [1]	PI_LATEX_CINZ	0,0010	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

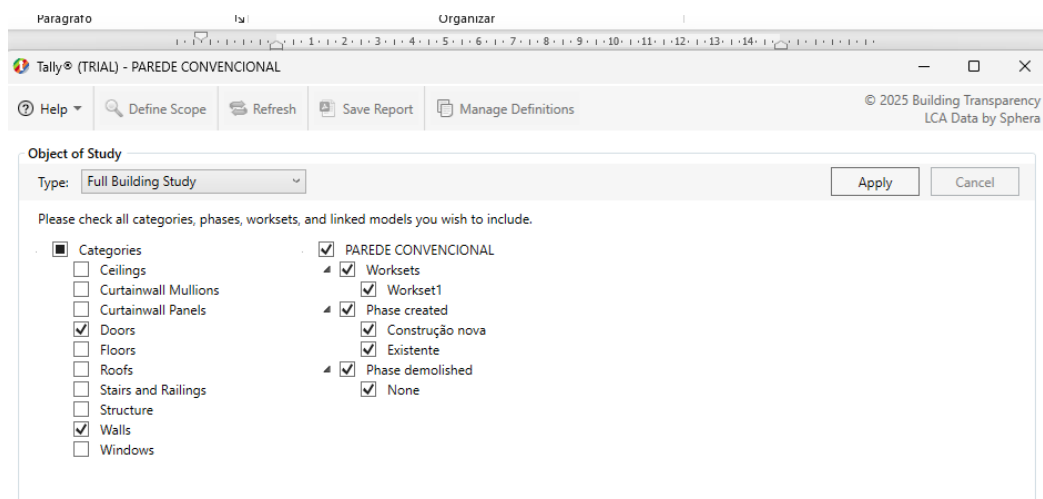
### 5.1.3. Associação dos Materiais no Tally®

Após a modelagem da parede convencional no Revit®, a etapa seguinte consistiu em vincular cada camada do modelo a um material correspondente da biblioteca do Tally®, permitindo que o *software* identificasse e quantificasse corretamente os impactos ambientais associados a cada componente construtivo. Essa quantificação é realizada a partir dos inventários de Avaliação do Ciclo de Vida incorporados ao Tally®, que convertem os materiais selecionados no Revit® em indicadores ambientais padronizados, como Potencial de Aquecimento Global, Eutrofização e Demanda de Energia Não Renovável.

Primeiramente, foi realizada a seleção do objeto de estudo dentro do plugin, restringindo a análise apenas ao *workset* (conjunto de trabalho) onde a parede estava inserida. Nessa etapa, foram marcadas apenas as categorias necessárias para o cálculo da ACV, que para esse caso eram *Walls* (paredes) e *Doors* (portas), já que a parede escolhida possuía uma esquadria de correr integrada ao painel. Dessa forma, garantiu-se que somente o elemento desejado, a parede convencional e sua respectiva porta, fosse considerado no processamento da Avaliação do Ciclo de Vida.

A Figura 13 apresenta a tela inicial do Tally®, mostrando a seleção das categorias paredes e portas, bem como a escolha da fase Construção nova (*New Construction*), correspondente ao escopo definido para esta análise.

Figura 13 - Tela inicial do Tally ® (Convencional)

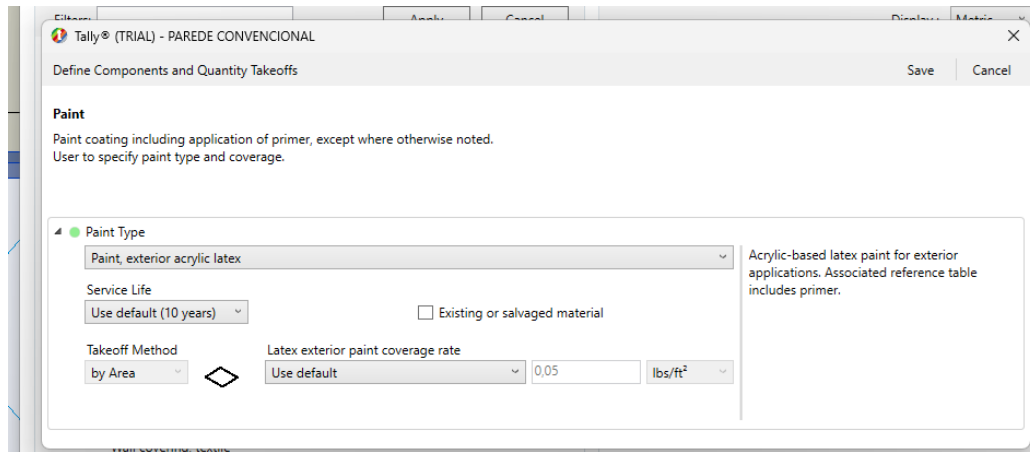


Fonte: Elaborada pela autora (2025)

Em seguida, cada material da parede foi associado a um item da base de dados do Tally®. Esse processo foi realizado camada por camada, selecionando na aba de fazer a escolha do material modelado e vinculando-o ao mais equivalente disponível no banco internacional da ferramenta. Essa etapa exigiu atenção adicional, pois o Tally® não possui materiais específicos do mercado brasileiro, menos ainda regional (Amazônia), o que demanda a escolha de itens que se aproximem tecnicamente das soluções adotadas no país. Assim, buscou-se sempre selecionar materiais compatíveis em composição e finalidade, garantindo coerência na representação do sistema convencional.

Como exemplo, a Figura 5 ilustra a tela de definição da pintura externa, onde foi atribuída a categoria *Paint, exterior acrylic látex* (tinta acrílica externa à base de látex), representando a tinta acrílica utilizada sobre o reboco.

Figura 14 - Associação do material no Tally® (Convencional)

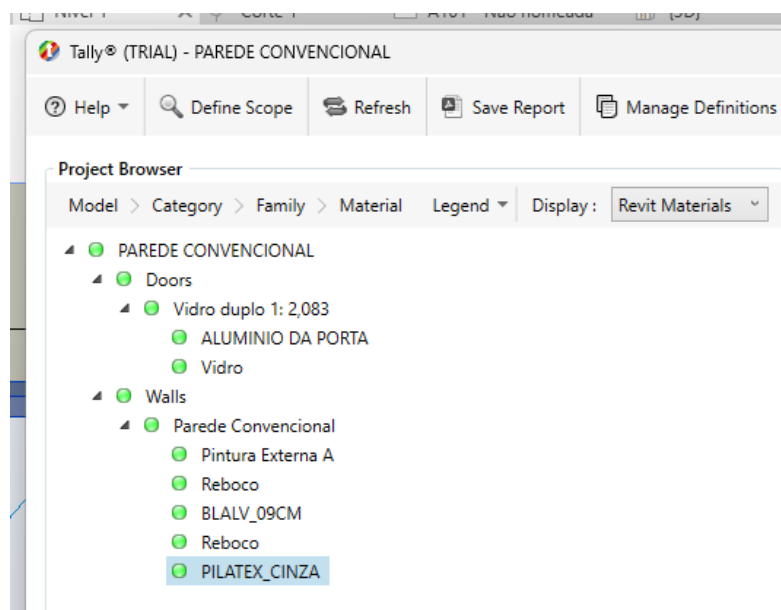


Fonte: Elaborada pela autora (2025)

O mesmo procedimento foi repetido para todas as camadas da parede: pintura externa, reboco externo, alvenaria cerâmica, reboco interno, pintura interna, além dos componentes da porta de correr, como esquadria de alumínio e vidro monolítico temperado. Todos os materiais foram definidos utilizando como critério a similaridade técnica com produtos mais empregados no Brasil, respeitando as limitações da base internacional do Tally®, que não dispõe de referências nacionais.

Ao final do processo, todos os componentes da parede ficaram identificados por indicadores verdes, significando que cada elemento estava devidamente vinculado a um material elegível para análise no Tally®. A Figura 15 mostra o resultado da associação, com todas as camadas prontas para a geração do relatório da ACV.

Figura 15 - Estrutura final após a associação de materiais (Convencional)



Fonte: Elaborada pela autora (2025)

#### 5.1.4. Processamento da ACV e Conceitos

Após a associação dos materiais da parede convencional no Tally®, o software processou automaticamente os impactos ambientais e gerou dois arquivos principais: um relatório em PDF, contendo gráficos, tabelas e quadros-resumo, e uma planilha Excel, com a decomposição detalhada dos dados. Esses documentos apresentaram não apenas os valores numéricos de cada impacto, mas também definições e descrições conceituais fornecidas pelo próprio Tally®, fundamentais para a correta interpretação dos resultados.

Além dos dados quantitativos, o relatório incluiu explicações sobre os termos técnicos, categorias de impacto e caracterizações do método TRACI 2.1, que são essenciais para compreender como cada indicador é calculado e qual sua relevância ambiental. Por esse motivo, os conceitos apresentados nos documentos gerados pelo software foram incorporados nesta etapa, de forma adaptada e fundamentada, garantindo que a interpretação dos resultados, a ser tratada na próxima seção seja realizada de maneira precisa, coerente e alinhada à metodologia adotada.

A seguir serão apresentados esses conceitos para melhor interpretação.

- Metodologia de Caracterização (TRACI 2.1)

O Tally® utiliza o método TRACI 2.1 (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts*), traduzido como Ferramenta para Redução e Avaliação de Impactos Ambientais Químicos e Outros, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA), para quantificar o impacto ambiental associado às emissões e ao uso de recursos.

Segundo a documentação oficial do software, “um esquema de caracterização traduz todas as emissões e o uso de combustíveis do fluxo de referência em quantidades categorizadas de impacto ambiental”. Isso significa que cada substância emitida ou recurso natural consumido é convertido em um potencial de impacto, considerando seu comportamento no ambiente e seus efeitos sobre ecossistemas e saúde humana.

O TRACI é amplamente utilizado na América do Norte e constitui um modelo consolidado para ACVs de materiais de construção. Embora sua base de dados seja norte-americana, o que indica uma limitação para aplicações no contexto brasileiro e regional, mas ele continua sendo uma das ferramentas mais completas integradas ao ambiente BIM.

- Estágios do Ciclo de Vida Considerados (EN 15804/ Tally®)

A metodologia de ACV adotada pelo Tally® segue a estrutura da norma EN 15804, que divide o ciclo de vida dos materiais em módulos. Cada módulo representa uma etapa diferente da trajetória do produto, desde a extração das matérias-primas até possíveis benefícios pós-reciclagem. Os módulos são distribuídos conforme a seguir:

- Módulo A — Produto e Construção

- A1 – Extração de matérias-primas
- A2 – Transporte até a fábrica
- A3 – Processos industriais de fabricação
- A4 – Transporte até a obra
- A5 – Instalação no canteiro

- Módulo B — Uso

Engloba atividades relacionadas ao desempenho ao longo da vida útil da edificação, incluindo manutenção, reparos, substituições e intervenções necessárias ao funcionamento do material.

- Módulo C — Fim de vida

Compreende os processos de demolição, transporte de resíduos, processamento e disposição final.

- Módulo D — Benefícios além dos limites do sistema

Considera créditos ambientais decorrentes de reciclagem, reaproveitamento ou recuperação energética dos materiais ao final da sua vida útil.

No presente estudo, foram considerados apenas os módulos A1–A3, que correspondem à fase de produção dos materiais (*cradle-to-gate* – do berço ao portão). Essa limitação metodológica é adequada para comparações entre sistemas construtivos, pois exclui variáveis relacionadas às etapas de uso, manutenção e descarte, que envolvem processos posteriores, como reparos, substituições ou eventual demolição, e que não interferem diretamente na tomada de decisão entre as alternativas de parede avaliadas

- Limitação das Bases de Dados do Tally®

O Tally® utiliza bases de dados norte-americanas o que significa que energia, matérias-primas, emissões e processos industriais refletem a realidade dos Estados Unidos. Essa limitação é reconhecida no presente estudo e foi mencionada na interpretação dos resultados, todavia não comprometeu a comparação entre os dois sistemas construtivos, uma vez que ambos foram avaliados sob as mesmas condições e banco de dados.

- Categoria de Impacto Ambiental consideradas

A seguir apresentam-se as categorias de impacto que foram interpretadas nos resultados, com base nas definições fornecidas pelo próprio Tally®.

- *Global Warming Potential* – GWP (Potencial de Aquecimento Global)

Representa a emissão de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono e metano, que contribuem para o aquecimento global por aumentarem a retenção de radiação na atmosfera. Esse impacto afeta diretamente o clima e, conseqüentemente, os ecossistemas e a saúde humana. A unidade de medida é: kgCO<sub>2</sub>eq.

- *Acidification Potential* – AP (Potencial de Acidificação)

Mede as emissões que aumentam a acidez de ambientes terrestres e aquáticos. Pode causar a morte de peixes, degradação de solos, queda de produtividade florestal e corrosão de materiais de construção. A unidade de medida é: kgSO<sub>2</sub>eq.

- *Eutrophication Potential* – EP (Potencial de Eutrofização)

Avalia a contribuição excessiva de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, que promovem crescimento exagerado de biomassa e redução de oxigênio, afetando rios, lagos e ecossistemas costeiros. A unidade de medida é kgNeq.

- *Smog Formation Potential* – SFP (Potencial de Formação de Smog Fotoquímico)

Refere-se à formação de ozônio troposférico a partir de  $\text{NO}_x$  e compostos orgânicos voláteis (VOCs). Os efeitos incluem agravamento de bronquite, asma, enfisema e danos à vegetação e cultivos agrícolas. A unidade de medida é:  $\text{kg O}_3\text{eq}$

- *Ozone Depletion Potential* – ODP (Potencial de Depleção da Camada de Ozônio)

Mede emissões que afetam a camada de ozônio estratosférico, aumentando a incidência de radiação UVB. Embora os valores sejam geralmente baixos, apresentam maior incerteza nas estimativas. A unidade de medida é:  $\text{kgCFC-11eq}$ .

- *Primary Energy Demand* – PED (Demanda de Energia Primária Total)

Quantifica a energia total extraída da natureza, considerando recursos renováveis e não renováveis. Não mede impacto ambiental direto, mas sim o consumo de recursos energéticos. A unidade de medida é: MJ

- *Non-Renewable Energy Demand* (Demanda de Energia Não Renovável)

Mede apenas a energia proveniente de fontes como petróleo, gás natural e carvão, recursos que não se renovam no curto prazo. A unidade de medida é: MJ

- *Renewable Energy Demand* (Demanda de Energia Renovável)

Considera energia oriunda de fontes como solar, eólica e hidrelétrica, contabilizando a extração de recursos energéticos renováveis. A unidade de medida é: MJ

### **5.1.5. Resultados da ACV da Parede Convencional**

Com os resultados obtidos pelo Tally®, e a partir dos materiais previamente caracterizados, analisaram-se todos os gráficos gerados automaticamente pelo *software*. Entre eles, foram selecionados apenas aqueles que apresentaram maior relevância para o objetivo deste estudo, permitindo compreender de forma clara a contribuição dos diferentes estágios do ciclo de vida, das categorias de impacto e dos materiais que compõem a parede convencional.

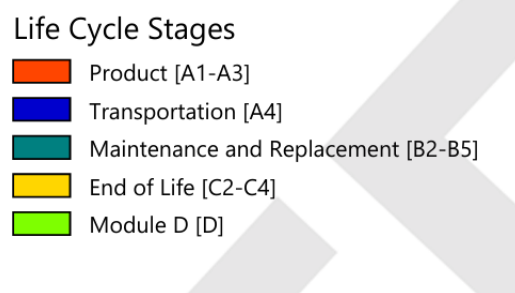
Esses gráficos sintetizam os principais indicadores ambientais calculados pelo Tally®, possibilitando identificar quais fases apresentam maior carga ambiental, quais componentes da parede se destacam em termos de impacto e como cada categoria ambiental se comporta dentro do escopo *cradle-to-gate*. A interpretação desses resultados é essencial para compreender o desempenho ambiental da solução convencional e, posteriormente, estabelecer a comparação com a alternativa sustentável.

A seguir, são apresentados e discutidos os gráficos selecionados, com destaque para os padrões observados e suas implicações no contexto do sistema construtivo avaliado.

### 5.1.5.1. Distribuição dos Impactos por estágio do Ciclo de Vida

A Figura 17 apresenta os Resultados por Estágio do Ciclo de Vida (*Results per Life Cycle Stage*), evidenciando como cada módulo da ACV contribuiu para os impactos ambientais da parede convencional.

Figura 16 - Legenda dos Estágios (Convencional)



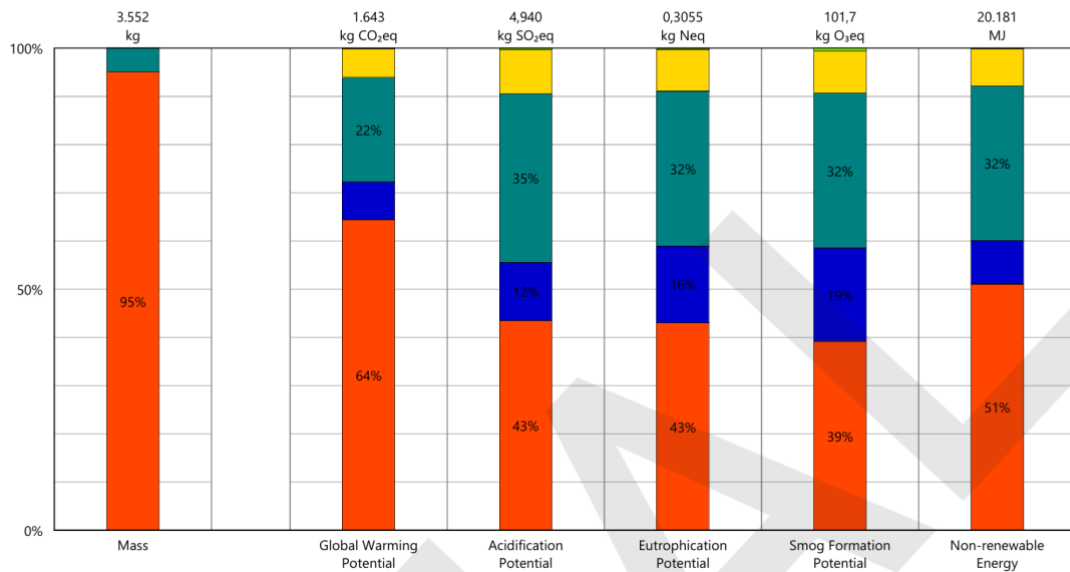
Fonte: Tally ® (2025)

O gráfico agrupou os resultados nos seguintes estágios (Figura 16), de acordo com a nomenclatura da norma EN 15804:

- Produto (A1–A3) – *Product*
- Transporte (A4) – *Transportation*
- Manutenção e substituição (B2–B5) – *Maintenance and Replacement*
- Fim de vida (C2–C4) – *End of Life*
- Benefícios além do sistema (Módulo D) – *Module D*

Figura 17 - Resultados por Estágio do Ciclo de Vida (Convencional)

## Results per Life Cycle Stage



Fonte: Elaborado pela autora no Tally ® (2025)

Esse primeiro gráfico demonstrou que o estágio A1–A3 (Produto) foi o principal responsável por todas as categorias a serem avaliadas, representando:

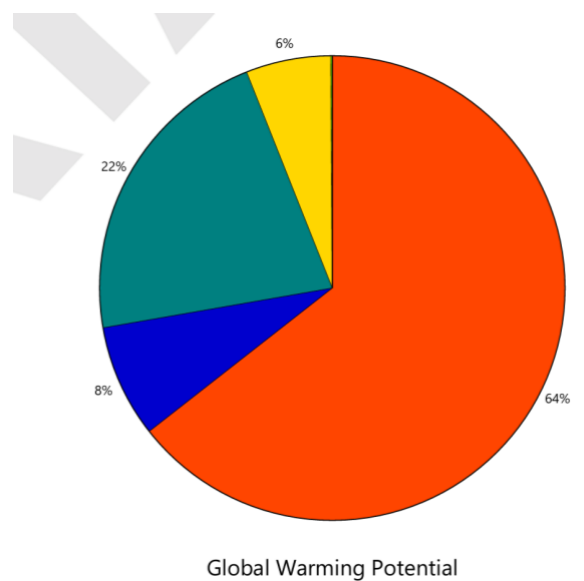
- 95% da massa total;
- 64% do Potencial de Aquecimento Global (GWP);
- 43% dos potenciais de Acidificação e Eutrofização;
- 39% do Potencial de Formação de Smog;
- 51% do consumo de energia não renovável.

Esse comportamento indicou que os impactos ambientais da parede convencional se concentraram em maior proporção na fase de produção dos materiais, o que é característico de sistemas construtivos que utilizam materiais industriais intensivos, como: blocos cerâmicos, argamassas de assentamento e revestimento, tintas e acabamentos.

Tais materiais passam por processos que exigem extração mineral, beneficiamento, queima em fornos, trituração, moagem e reações químicas de alta energia, etapas que demandam: uso intensivo de combustíveis, altas temperaturas, consumo de eletricidade, emissões atmosféricas diretas e indiretas.

Como consequência, o gráfico (Figura 17) evidenciou que a produção dos materiais foi o principal determinante do desempenho ambiental da parede, superando amplamente os impactos associados ao transporte (A4), manutenção (B2–B5) ou descarte final (C2–C4), que tiveram contribuição significativamente menor.

Figura 18 - Resultados por Estágio do Ciclo de Vida (Convencional)



Fonte: Elaborado pela autora no Tally ® (2025)

A distribuição percentual do Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential – GWP*) foi reforçada pela representação gráfica em formato de setores apresentada na Figura 18. Esse gráfico destacou visualmente a predominância do estágio Produto (A1–A3), que concentrou 64% das emissões de gases de efeito estufa, confirmando que o processo produtivo dos materiais foi o principal responsável pelo impacto da parede convencional.

Os demais módulos apresentaram participação significativamente inferior, 22% corresponderam à Manutenção e Substituição (B2–B5), associada à necessidade de renovação de camadas de acabamento ao longo da vida útil; 8% foram atribuídos ao Transporte (A4) dos materiais até o canteiro; 6% ao Fim de Vida (C2–C4), que envolveu demolição, transporte e disposição final dos resíduos.

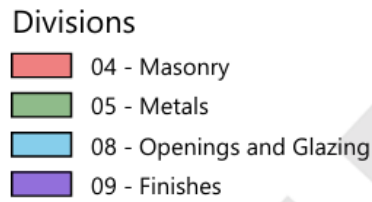
Essa representação confirmou que, mesmo quando analisado isoladamente o impacto climático, a fase de produção continuou sendo o fator determinante do desempenho ambiental da parede, reforçando a necessidade de considerar alternativas materiais de menor energia incorporada e menores emissões no contexto de projetos construtivos sustentáveis.

#### 5.1.5.2. Resultados por divisão

A Figura 20 apresenta os Resultados por Divisão (*Results per Division*), permitindo identificar quais grupos de materiais do sistema construtivo convencional foram os principais responsáveis pelos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida.

Figura 19 - Legenda da organização dos materiais (Conveccional)

## Legend



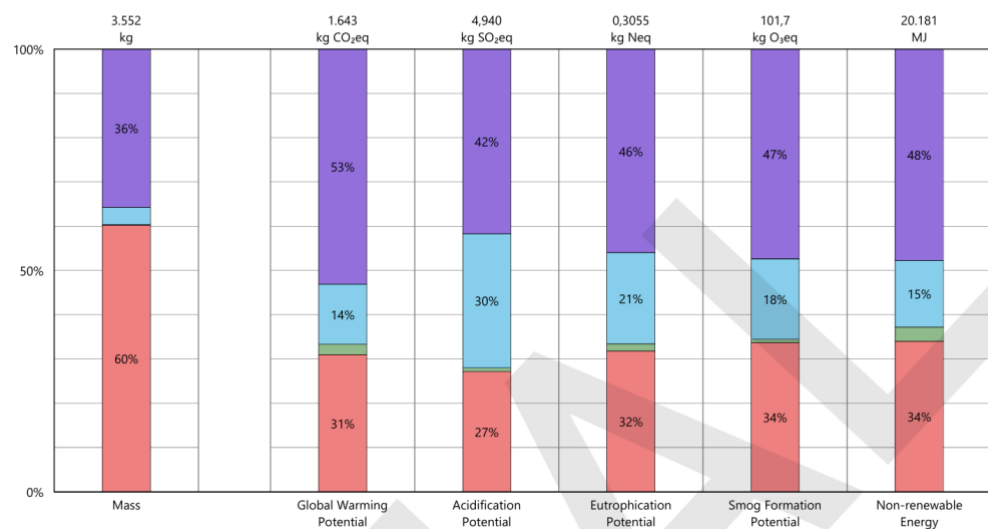
Fonte: Tally ® (2025)

As divisões seguiram a estrutura comum utilizada em bases de dados internacionais sendo classificadas da seguinte forma:

- 04 – *Masonry* (Alvenaria)
- 05 – *Metals* (Metais)
- 08 – *Openings and Glazing* (Esquadrias e Vidros)
- 09 – *Finishes* (Acabamentos)
- 

Figura 20 - Resultados por Divisão (Conveccional)

### Results per Division



Fonte: Elaborado pela autora no Tally ® (2025)

A partir dos resultados apresentados, observa-se que a maior contribuição ambiental esteve associada à Divisão 09 – *Finishes* (Acabamentos), que concentrou entre 36% e 53% dos

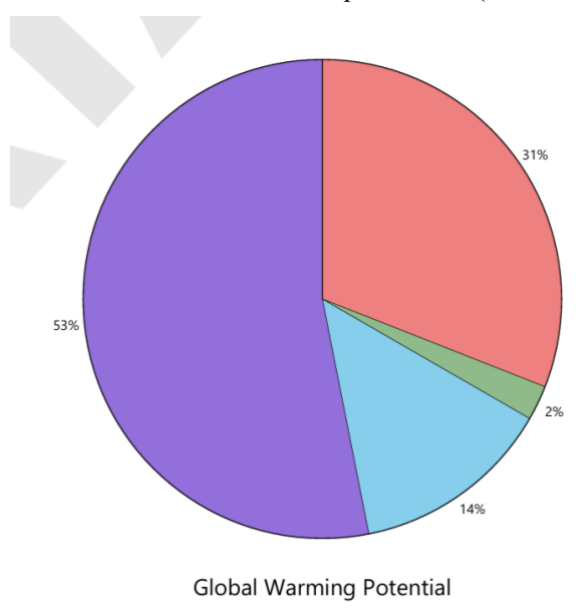
impactos nas categorias analisadas. Este grupo incluiu principalmente elementos como tintas, rebocos e revestimentos, que apresentaram elevada participação devido aos processos industriais envolvidos em sua fabricação, especialmente a produção de tintas acrílicas e reboco cimentício.

Em seguida, destacou-se a Divisão 04 – *Masonry* (Alvenaria), que contribuiu com valores entre 27% e 34% dos impactos. O desempenho ambiental desse grupo foi influenciado sobretudo pelo bloco cerâmico, cuja produção envolve queima em altas temperaturas, consumo de combustíveis e emissões significativas de CO<sub>2</sub>, além da argamassa de assentamento.

A Divisão 08 – *Openings and Glazing* (Esquadrias e Vidros) apresentou participação intermediária, variando de 10% a 21%, o que indicou a presença do vidro temperado e do alumínio da esquadria. Embora a quantidade desses materiais seja pequena em massa se comparada à alvenaria, seus processos industriais são intensivos em energia, elevando seu peso relativo em algumas categorias.

Por fim, a Divisão 05 – *Metals* (Metais) representou a menor participação entre os grupos, variando apenas entre 1% e 3%. Este comportamento decorreu da reduzida quantidade de componentes metálicos presentes na parede analisada, restringindo seu impacto no conjunto.

Figura 21 - Gráfico Pizza da Revisão por Divisão (Convencional)



Fonte: Elaborado pela autora no Tally ® (2025)

A Figura 21 reforça a interpretação do detalhe especificamente do Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential*) por divisão. Observou-se que os acabamentos (Divisão 09) foram responsáveis por 53% das emissões totais de CO<sub>2</sub> equivalente,

seguidos pela alvenaria (31%), esquadrias e vidros (14%), e um percentual reduzido de metais (2%).

Esse resultado evidenciou de forma clara que, embora nem sempre percebidos como elementos críticos, os revestimentos e acabamentos foram os principais determinantes do impacto climático na parede convencional. Os materiais estruturais, como blocos cerâmicos e argamassas, também apresentaram contribuição relevante, porém em menor magnitude. Dessa forma, os gráficos demonstram que grande parte do impacto ambiental está associada aos processos industriais envolvidos na fabricação de tintas, rebocos e blocos cerâmicos, reforçando a importância da seleção de materiais de acabamento mais sustentáveis em projetos que buscam reduzir emissões e impactos ambientais.

#### 5.1.5.3. Resultados por Divisão discriminados por Material

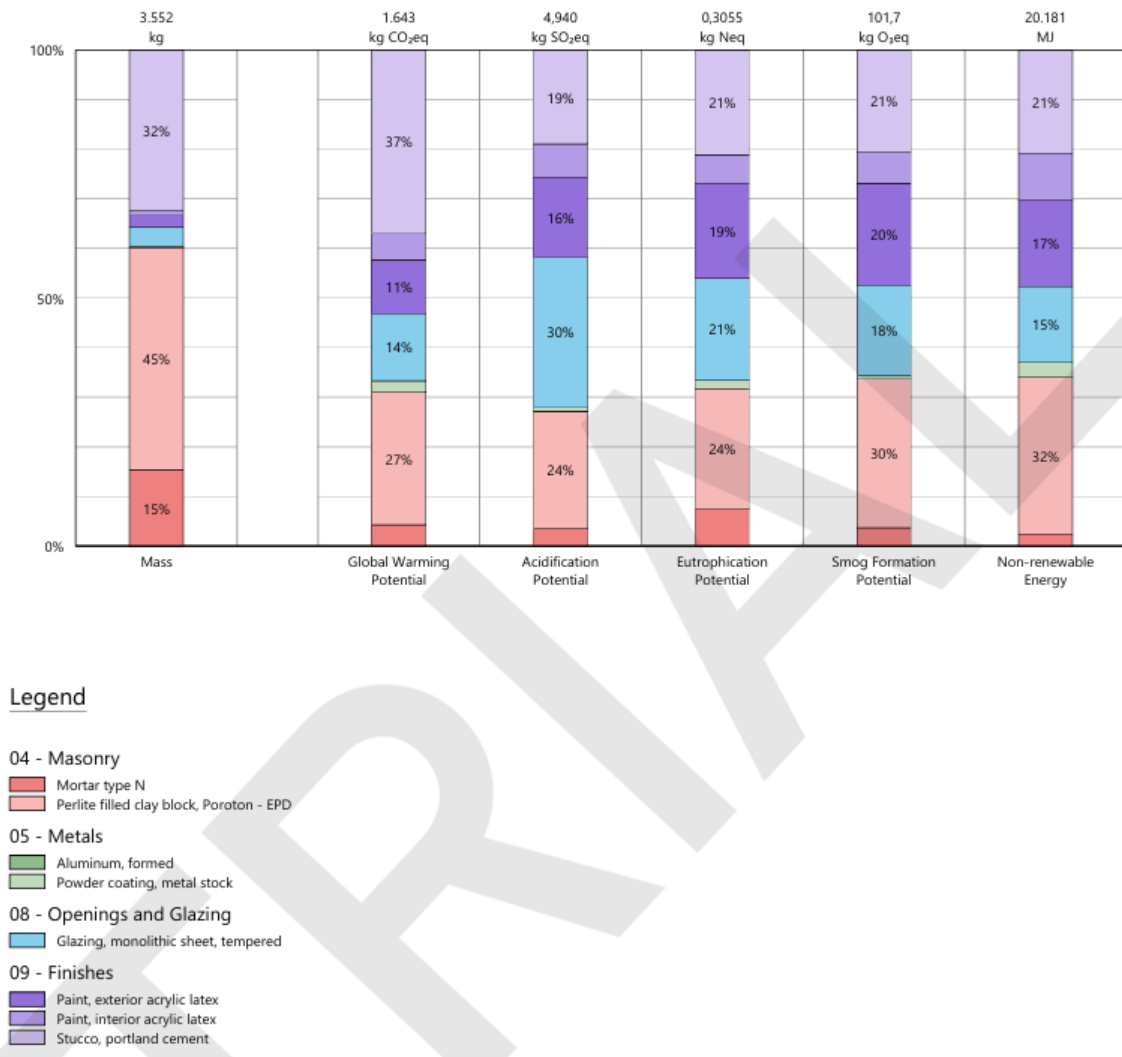
A Figura 22 exibe os Resultados por Material (*Results per Division, itemized by material*), detalhando a contribuição individual de cada componente da parede convencional para as categorias de impacto avaliadas. Diferentemente da figura anterior, que agrupou os resultados apenas por divisão (alvenaria, metais, esquadrias e acabamentos), este gráfico especificou quais materiais dentro de cada grupo foram efetivamente os responsáveis pelos impactos.

Os materiais considerados incluíram:

- 04 – *Masonry* (Alvenaria)
  - Argamassa Tipo N
  - Bloco cerâmico Poroton (EPD)
- 05 – *Metals* (Metais)
  - Alumínio formado
  - Revestimento metálico (*powder coating*)
- 08 – *Openings and Glazing* (Esquadrias e Vidros)
  - Vidro monolítico temperado
- 09 – *Finishes* (Acabamentos)
  - Tinta acrílica externa
  - Tinta acrílica interna
  - Argamassa de revestimento (*stucco*, cimento Portland)

Figura 22 - Resultados por Divisão discriminados por Material (Convecional)

## Results per Division, itemized by Material



Fonte: Elaborado pela autora no Tally ® (2025)

Os resultados da análise por material demonstraram que a Divisão 04 – *Masonry* (Alvenaria) foi a que mais contribuiu para os impactos ambientais na maior parte das categorias avaliadas. Na figura, observou-se que os blocos cerâmicos Poroton e a argamassa de assentamento representam entre 24% e 32% dos impactos nas categorias de Acidificação, Eutrofização, Formação de Smog e Energia Não Renovável, além de concentrarem 60% da massa total da parede. Esse comportamento é característico de materiais que exigem processos industriais de alta temperatura, como fornos para queima, que dependem de combustíveis fósseis e emitem grandes quantidades de poluentes atmosféricos.

A Divisão 09 – *Finishes* (Revestimentos e Acabamentos) possuiu impacto especialmente relevante no Potencial de Aquecimento Global (GWP), no qual respondeu por 37% das emissões totais. Isso ocorreu devido à elevada intensidade energética associada à produção de tintas acrílicas e revestimentos cimentícios (*stucco*), que envolvem processos químicos e térmicos com alto consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub>.

A Divisão 08 – *Openings and Glazing* (Esquadrias e Vidros) também apresentou contribuição significativa em categorias relacionadas a emissões atmosféricas. O vidro temperado, em particular, alcançou 30% no Potencial de Acidificação e 21% no Potencial de Formação de Smog, devido ao processo de fusão do vidro, realizado em fornos que operam acima de 1.400 °C, com elevado consumo energético.

Já os materiais da Divisão 05 – *Metals* (Metais), como o alumínio formado, apresentaram contribuições menores, embora ainda expressivas. O alumínio respondeu por 14% do GWP e 18% de *Smog Formation*, valores relacionados ao seu processo de produção eletrointensivo, que demanda grande quantidade de energia elétrica, principalmente em etapas como eletrólise e fundição.

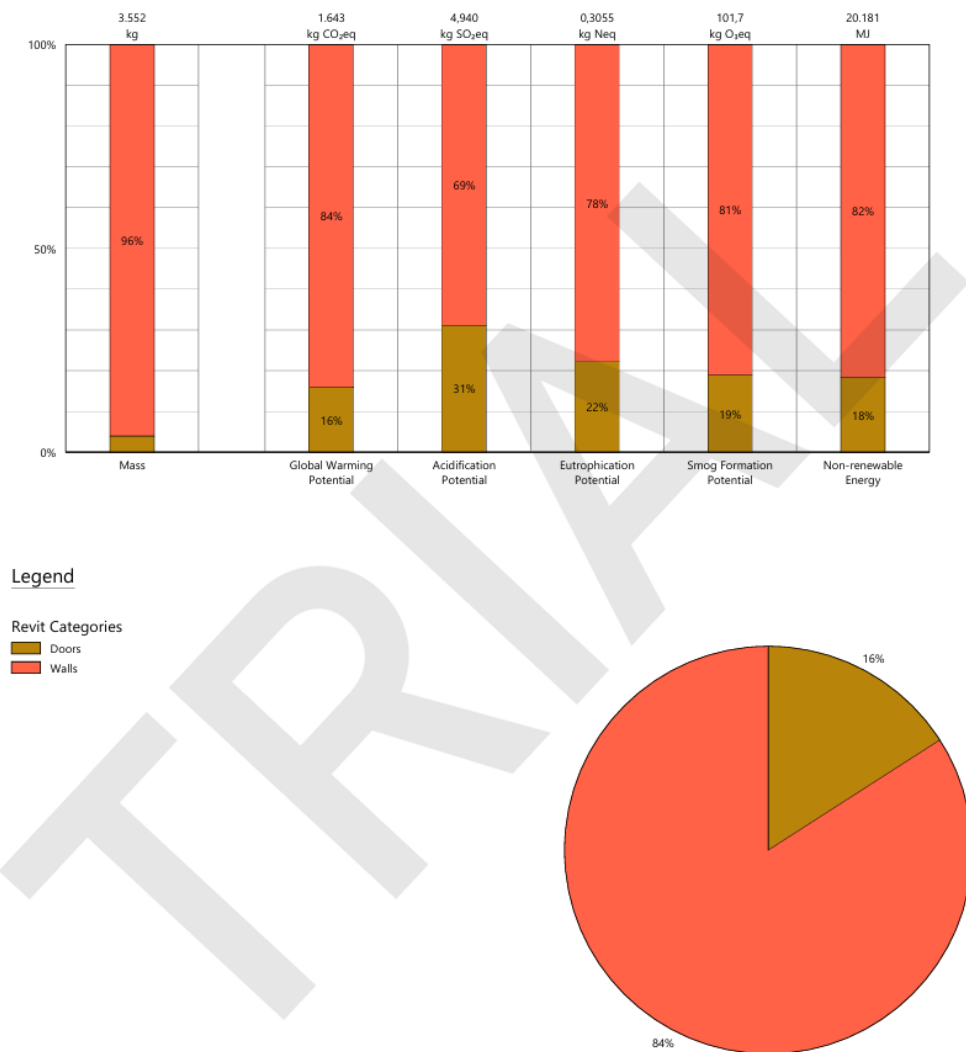
Assim, a análise evidenciou que o desempenho ambiental da parede convencional foi fortemente influenciado pela combinação entre blocos cerâmicos, revestimentos e vidro temperado, tornando esses materiais os principais candidatos a estratégias de redução de impacto ou substituição em cenários construtivos mais sustentáveis.

#### 5.1.5.4. Resultados por Categoria do Revit®

A Figura 23 mostrou os Resultados por Categoria do Revit (*Results per Revit Category*), comparando o desempenho ambiental das categorias *Walls* (Paredes) e *Doors* (Portas). Os resultados apresentaram que a categoria *Walls* concentrou praticamente todos os impactos ambientais da parede convencional, respondendo por mais de 80% em todas as categorias avaliadas e chegando a 96% da massa total e 84% do Potencial de Aquecimento Global (GWP). Essa predominância era esperada, uma vez que os materiais da parede possuem maior massa e processos produtivos mais intensivos.

Figura 23 - Resultados por Categoria do Revit® (Convencional)

## Results per Revit Category



Fonte: Elaborado pela autora no Tally ® (2025)

A categoria Doors, composta apenas por uma porta com vidro duplo, apresentou contribuição reduzida, variando entre 16% e 18% nas categorias de impacto mais sensíveis à produção de vidro, como Acidificação e Energia Não Renovável. O gráfico de pizza dos Resultados por categoria reforça essa relação, evidenciando que a parede foi o principal elemento responsável pelos impactos da análise, enquanto a porta exerceu menor influência.

Assim, a análise por categoria confirmou que os impactos ambientais do sistema foram determinados essencialmente pelos materiais da parede, e que a presença de portas não alterou de forma significativa os resultados da ACV.

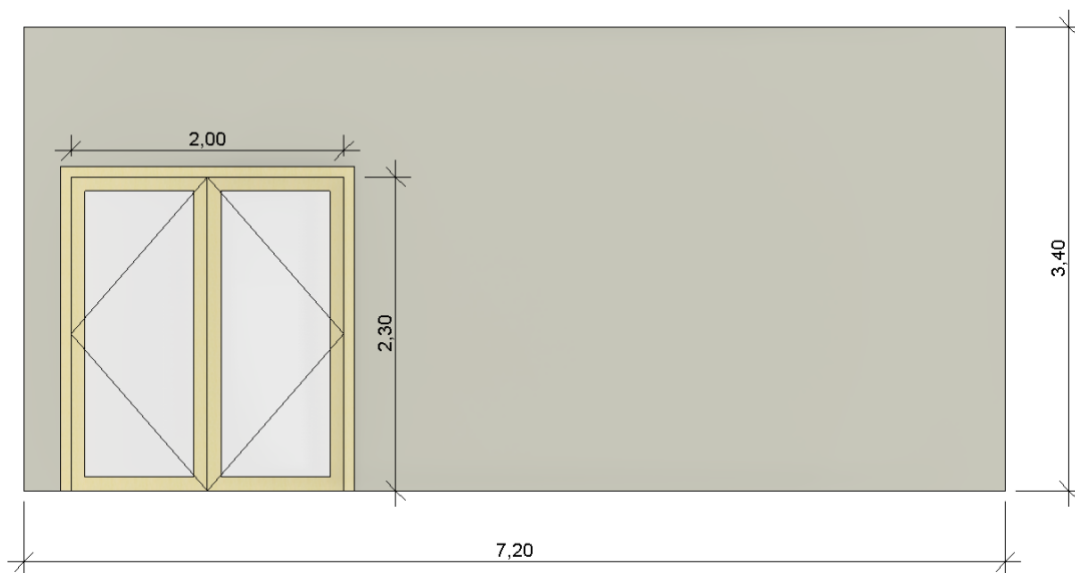
## 5.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) – PAREDE SUSTENTÁVEL

### 5.2.1. Modelagem da Parede Sustentável

Assim como realizado anteriormente na modelagem da parede convencional, a primeira etapa da análise da parede sustentável consistiu em isolar o elemento no Revit®, mantendo apenas o trecho selecionado para estudo.

A parede sustentável (Figura 24) foi modelada com as mesmas dimensões reais utilizadas no cenário convencional, apresentando 7,20 m de comprimento e 3,40 m de altura, além da porta de correr de 2,00 m x 2,30 m, garantindo condições equivalentes para a comparação dos dois sistemas construtivos.

Figura 24 - Parede Sustentável modelada isolamento no Revit®



Fonte: Elaborada pela autora (2025)

### 5.2.2. Camadas da Parede Sustentável

Posteriormente foi realizada a configuração no Revit® da composição da parede sustentável, substituindo os materiais convencionais por alternativas de menor impacto ambiental. As camadas foram definidas com suas respectivas espessuras reais, mantendo o arranjo funcional da parede convencional, porém utilizando materiais com menor pegada de carbono e maior desempenho ambiental.

A Tabela 2 apresenta a composição da parede sustentável, organizada em ordem de aplicação.

Tabela 2 - Composição das camadas da parede sustentável

<b>Camada</b>	<b>Material</b>	<b>Espessura (m)</b>
Pintura externa	Tinta à base d'água	0,0010
Reboco externo	Reboco de Cal	0,0200
Núcleo	Tijolo solo-cimento	0,1500
Reboco interno	Reboco de Cal	0,0200
Pintura interna	Tinta à base d'água	0,0010
<b>Espessura total</b>	--	<b>0,1920</b>

Fonte: Elaborada pela autora (2025)

No caso da parede sustentável, a espessura das camadas de pintura corresponde igualmente à aplicação de duas demãos de tinta à base d'água, conforme prática usual em obras residenciais. Para o reboco de cal, adotaram-se as espessuras médias recomendadas para revestimentos internos e externos, garantindo uma representação fiel da solução construtiva no modelo BIM. Assim como no cenário convencional, essas definições foram incorporadas ao cálculo da espessura total da parede, assegurando que o Tally® processasse adequadamente a quantidade de materiais prevista para o sistema sustentável.

A Figura 25 mostra a montagem das camadas no Revit®, detalhando a substituição dos materiais convencionais por alternativas ecológicas

Figura 25 - Montagem das camadas da parede sustentável no Revit ®

Camadas						
LADO EXTERNO						
	Função	Material	Espessura	Coberturas	Material estrutural	Variável
1	Estrutura [1]	Tinta Mineral Ec	0,0010	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Estrutura [1]	Reboco de Cal	0,0200	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Limite do núcleo	Camadas acima d	0,0000			
4	Estrutura [1]	Tijolo Solo-Cim	0,1500	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Limite do núcleo	Camadas abaixo d	0,0000			
6	Estrutura [1]	Reboco de Cal	0,0200	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Estrutura [1]	Tinta Mineral Ec	0,0010	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fonte: Elaborada pela autora (2025)

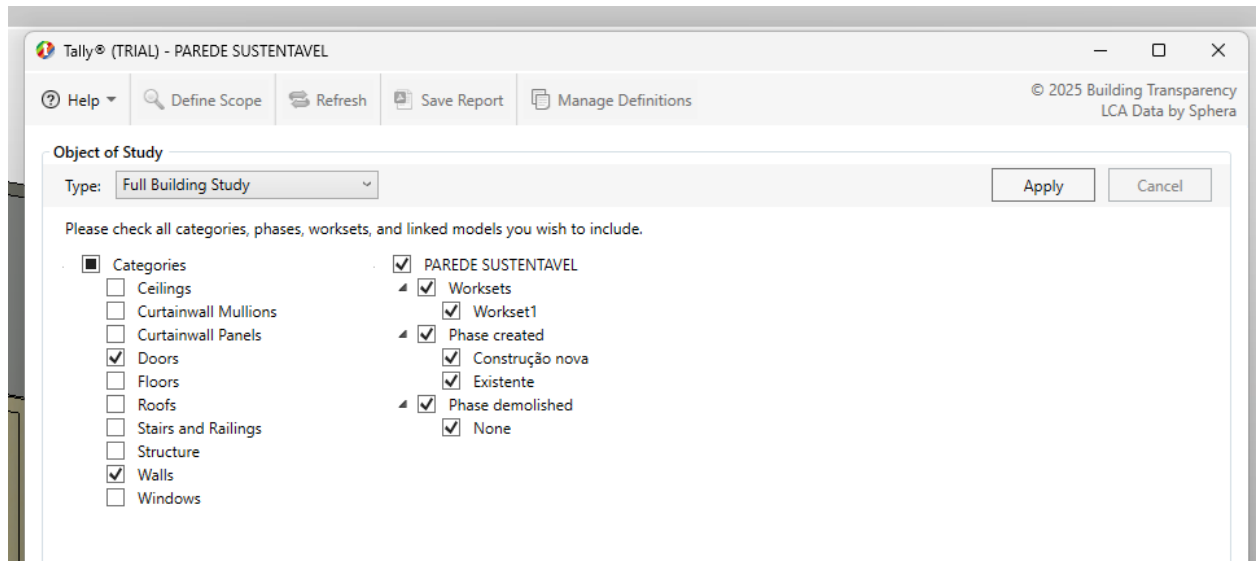
### 5.2.3. Associação dos Materiais no Tally ®

Assim como realizado na etapa correspondente da parede convencional, a parede sustentável também foi preparada no Tally® por meio da seleção dos elementos relevantes e da associação de cada camada a um material equivalente disponível na biblioteca do *software*.

Primeiramente, a seleção do objeto de estudo foi novamente restringida às categorias *Walls* (paredes) e *Doors* (portas), garantindo que apenas os componentes presentes na parede modelada fossem incluídos no processamento da ACV. Esse procedimento padronizou a comparação entre os dois sistemas e assegurou que ambos fossem avaliados igualmente.

No entanto, diferentemente da parede convencional, a associação dos materiais sustentáveis exigiu maior atenção devido à limitação da biblioteca do Tally®, que não possui equivalentes diretos para diversos materiais de baixo impacto ambiental utilizados no Brasil, como reboco de cal, tinta mineral ecológica ou tijolo solo-cimento. Por esse motivo, algumas camadas precisaram ser associadas a materiais internacionais aproximados, escolhidos com base na similaridade funcional e na coerência técnica, reforçando o desafio de utilizar ferramentas de ACV baseadas em bancos de dados estrangeiros. A Figura 26 mostra a tela inicial do Tally®, já configurada para o estudo da parede sustentável, com o *workset* isolado e as categorias correspondentes ativadas.

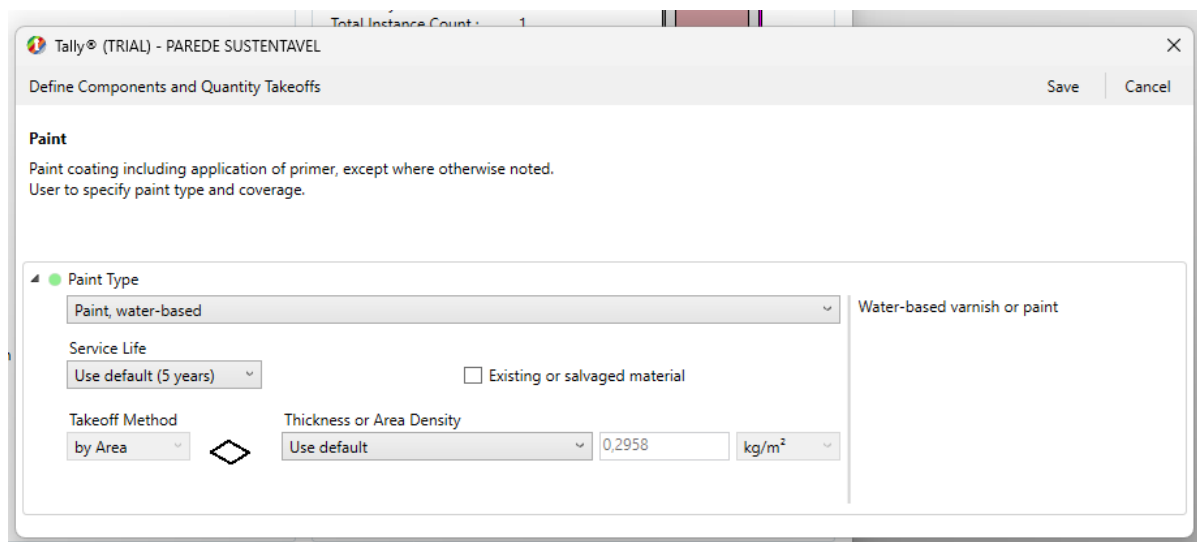
Figura 26 - Tela inicial do Tally® (Sustentável)



Fonte: Elaborada pela autora (2025)

Já a Figura 27 apresenta a tela de associação dos materiais, onde se destacou, entre as principais adaptações, a substituição da tinta acrílica convencional por *Paint, water-based* (Tinta à base d'água) uma opção mais alinhada ao conceito de sustentabilidade presente no modelo. Cabe ressaltar que essa analogia não se restringiu ao revestimento, outros materiais também foram equiparados a alternativas disponíveis na biblioteca do Tally®, devido à limitação de categorias compatíveis com a realidade brasileira. Assim, as associações adotadas seguiram o critério de equivalência técnica, garantindo coerência na análise dos impactos ambientais.

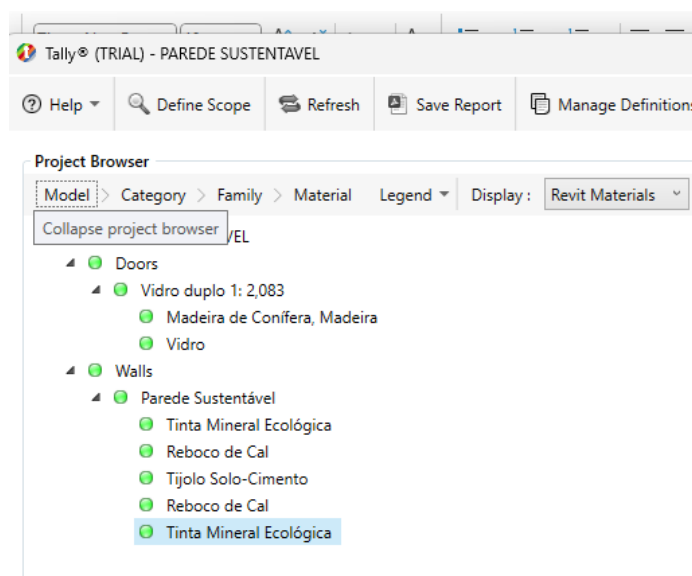
Figura 27 - Associação do material no Tally® (Sustentável)



Fonte: Elaborada pela autora (2025)

Todo o processo de associação foi realizado da mesma forma que na parede convencional, garantindo consistência metodológica entre os dois cenários. Ao final, todos os materiais foram associados e representados pelos indicadores verdes no navegador do Tally®, como é possível visualizar na Figura 28, confirmando que cada camada estava pronta para integrar o cálculo da Avaliação do Ciclo de Vida.

Figura 28 - Estrutura final após a associação dos materiais (Sustentável)



Fonte: Elaborada pela autora (2025)

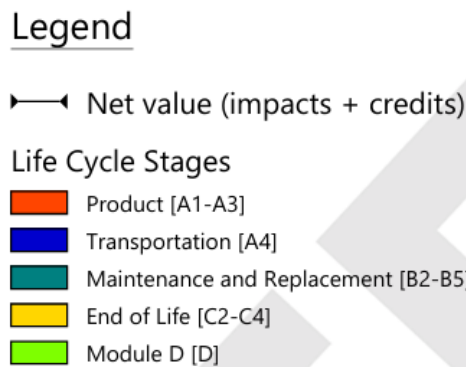
#### 5.2.4. Resultados da ACV da Parede Sustentável

Após a finalização das associações de materiais no Tally®, o software processou automaticamente os impactos ambientais da parede sustentável e gerou gráficos e tabelas correspondentes. Nesta etapa, foram apresentados e analisados os resultados obtidos, permitindo entender como se comportou o sistema sustentável e preparando a base para realizar o comparativo direto com o cenário convencional.

##### 5.2.4.1. Distribuição dos Impactos por estágio do Ciclo de Vida

A Figura 30 apresenta os resultados da parede sustentável organizados por estágio (Figura 20) do ciclo de vida (*Life Cycle Stage*), permitindo identificar como cada módulo contribuiu para os impactos ambientais do sistema modelado.

Figura 29 - Legenda dos Estágios (Sustentável)

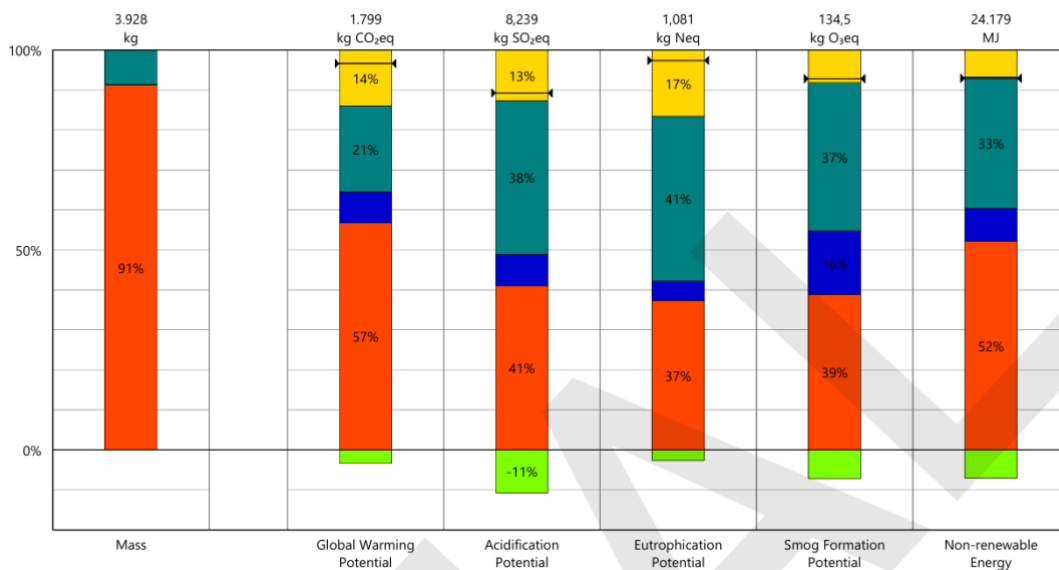


Fonte: Tally ®

Assim como observado no cenário convencional, o módulo A1–A3 (Produto) permaneceu como o principal responsável pelos impactos totais, reflexo direto do processo industrial necessário para fabricar os componentes da parede.

Figura 30 - Resultados por Estágio do Ciclo de Vida (Sustentável)

## Results per Life Cycle Stage



Fonte: Elaborado pela autora no Tally ® (2025)

No caso da solução sustentável, os resultados indicaram que o estágio A1–A3 representou:

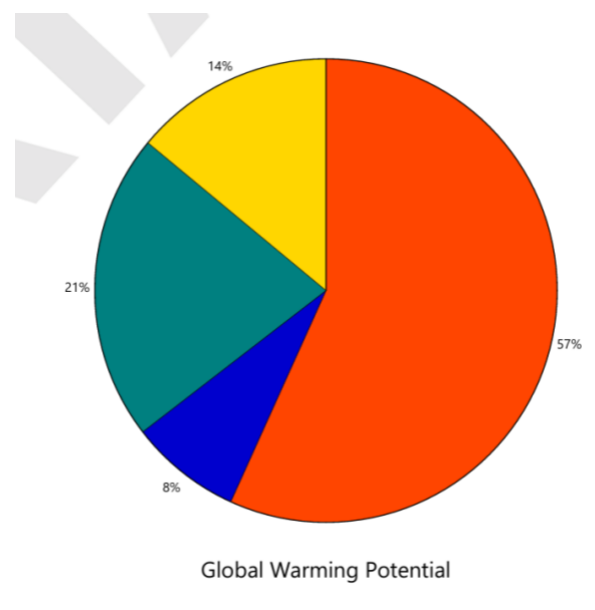
- 91% da massa total do sistema;
- 57% do Potencial de Aquecimento Global (GWP);
- 41% do Potencial de Acidificação;

- 37% do Potencial de Eutrofização;
- 39% do Potencial de Formação de Smog;
- 52% do consumo de energia não renovável.

A Figura 30 evidencia que, embora o módulo de produção ainda seja predominante, observou-se que algumas categorias exibiram participações mais distribuídas entre os demais módulos quando comparadas ao sistema convencional. Essa diferença esteve relacionada principalmente às alterações de composição entre os dois cenários: redução da espessura total da parede, adoção de reboco de cal e tinta mineral ecológica no modelo BIM, representados no Tally® por revestimento do tipo *stucco* (reboco cimentício) e por tinta à base de água, além da substituição da esquadria metálica por esquadria de madeira. Mesmo utilizando, na ferramenta, o mesmo bloco cerâmico Poroton e o mesmo revestimento cimentício, as variações de espessura, massa total e tipo de acabamento (especialmente a tinta à base de água) modificaram a distribuição relativa dos impactos entre os módulos do ciclo de vida quando comparadas à parede convencional.

Outro aspecto relevante foi a presença de valores negativos no Módulo D (créditos), que apareceram em categorias específicas, esses valores refletiram os potenciais de reciclagem, recuperação ou reaproveitamento previstos pelos materiais equivalentes adotados no Tally®, e representaram créditos ambientais atribuídos ao sistema na fase pós-uso, conforme o princípio estabelecido na EN 15804, que considera o benefício líquido gerado quando materiais recicláveis evitam impactos futuros de produção de novos insumos.

Figura 31 - Gráfico pizza dos Resultados por Estágio do Ciclo de Vida (Sustentável)



Fonte: Elaborado pela autora no Tally® (2025)

A Figura 31, reforçou visualmente o predomínio do módulo de produto (A1-A3) sobre as demais etapas, seguido pelos módulos de manutenção (B2-B5), fim de vida (C2-C4) e transporte (A4).

No geral, mesmo com a configuração alternativa composta por materiais equivalentes selecionados no Tally®, a parede apresentou maior concentração de impactos na fase de produção dos componentes, que representou 57% do total para o Potencial de Aquecimento Global. Entretanto, observou-se uma distribuição mais equilibrada entre os demais módulos, com contribuições de 21% e 8% em etapas posteriores, além de uma maior presença de créditos no módulo D (14%). Esse comportamento indicou um desempenho ambiental relativamente mais favorável em comparação à parede convencional, especialmente no contexto das equivalências adotadas para o modelo sustentável.

#### 5.2.4.2. Resultado por Divisão

Antes da análise, destaca-se que a Figura 32 apresenta a legenda correspondente à organização dos materiais utilizada pelo Tally®, servindo de base para a interpretação dos resultados. A Figura 33 mostra os resultados da parede sustentável distribuídos por Divisão (*Results per Division*), demonstrando a participação de cada grupo de materiais no desempenho ambiental do sistema.

Figura 32 - Legenda da organização dos materiais (Sustentável)



Fonte: Tally®

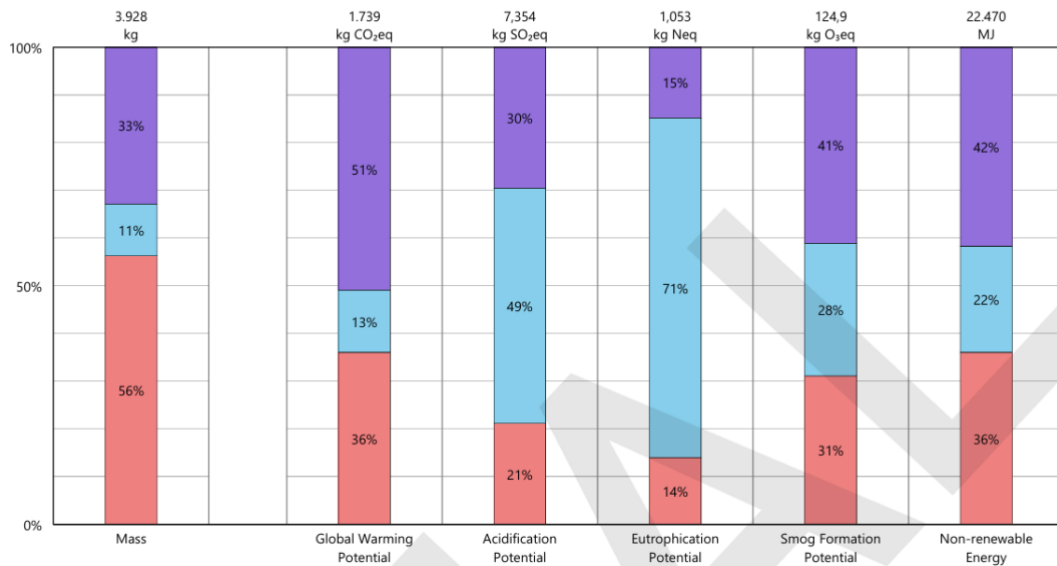
A classificação seguiu a organização de materiais (Figura 33) adotada pelo Tally®:

- 04 – *Masonry* (Alvenaria)

- 08 – *Openings and Glazing* (Esquadrias e Vidros)
- 09 – *Finishes* (Acabamentos)

Figura 33 - Resultados por Divisão (Sustentável)

## Results per Division



Fonte: Elaborado pela autora no Tally® (2025)

Ao analisar o gráfico da Figura 33, notou-se que os acabamentos (Divisão 09) foram os elementos que mais influenciaram o impacto total da parede sustentável, respondendo por aproximadamente 30% a 51% das categorias analisadas. Esse resultado esteve relacionado principalmente às tintas à base de água e ao revestimento equivalente ao reboco, cujos processos de formulação industrial ainda representam uma parcela relevante de energia e emissões, mesmo sendo alternativas mais amigáveis quando comparadas às soluções convencionais de acabamento.

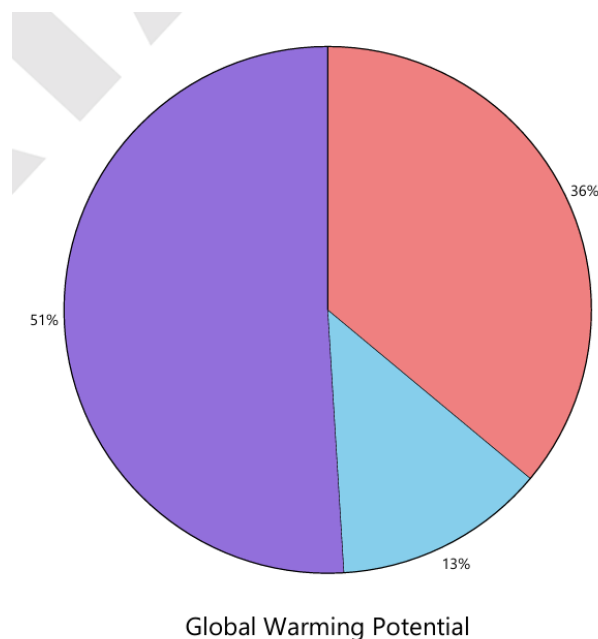
A Divisão 04 – *Masonry*, por sua vez, apresentou um peso expressivo em várias categorias, variando de 21% a 36%. Esse comportamento deveu-se principalmente pela presença do bloco Poroton, o material mais próximo do tijolo ecológico disponível na biblioteca do Tally®.

Já a Divisão 08 – *Openings and Glazing*, que incluiu a esquadria de madeira com vidro, mostrou contribuições mais elevadas em algumas categorias específicas, chegando a 71% no Potencial de Eutrofização. Isso ocorreu porque a produção do vidro temperado, apesar de estar em menor quantidade na parede, está associada a processos que demandam altas temperaturas,

influenciando de forma marcante categorias atmosféricas como acidificação e formação de ozônio troposférico.

Diferentemente do cenário convencional, não houve contribuição da Divisão 05 – *Metals*, já que a solução sustentável não utilizou alumínio ou componentes metálicos na esquadria. Essa ausência refletiu uma vantagem ambiental importante, eliminando uma categoria que, embora pequena no convencional, ainda representava impacto.

Figura 34 - Gráficos Pizza da Revisão por Divisão (Sustentável)



Fonte: Elaborado pela autora no Tally® (2025)

O gráfico setorial da Figura 34, focado no Potencial de Aquecimento Global, reforçou a predominância dos acabamentos (51%), seguido pela alvenaria (36%) e pelo conjunto vidro/esquadria (13%). Essa distribuição mostrou que a parede sustentável apresentou um comportamento mais equilibrado entre as divisões, com redução de impactos em materiais tipicamente mais críticos, e evidenciou que a escolha de componentes de menor intensidade energética, ainda que representados por equivalentes no Tally®, contribuiu para um desempenho ambiental mais favorável.

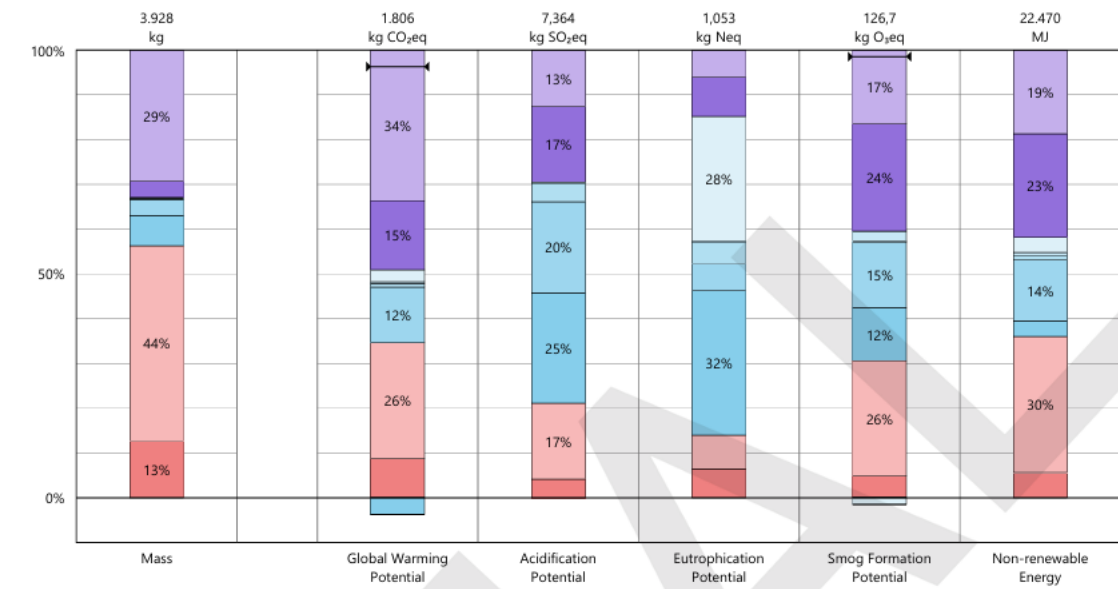
#### 5.2.4.3. Resultados por Divisão discriminados por Material

A Figura 35 apresenta os resultados da parede sustentável classificados por divisão e detalhados por material (*Results per Division, itemized by material*). Assim como no cenário convencional, as divisões seguiram a estrutura internacional do Tally®:

- 04 – *Masonry*
- 08 – *Openings and Glazing*
- 09 – *Finishes*

Figura 35 - Resultados por Divisão discriminados por Material (Sustentável)

### Results per Division, itemized by Material



### Legend

Net value (impacts + credits)

#### 04 - Masonry

- Lime mortar (Mortar type K)
- Perlite filled clay block, Poroton - EPD

#### 08 - Openings and Glazing

- Door, interior, wood, stile and rail
- Glazing, monolithic sheet, tempered
- Hardware, stainless steel
- Polyurethane top coat, water-based, for wood
- Stainless steel door hinge

#### 09 - Finishes

- Paint, water-based
- Stucco, portland cement

Fonte: Elaborado pela autora no Tally® (2025)

Os resultados mostraram que a Divisão 09 – *Finishes* (Acabamentos) permaneceu como a principal responsável pelos impactos, concentrando entre 29% e 34% das categorias avaliadas. Esse domínio aconteceu pelo uso de tinta à base de água e do reboco tipo *stucco*, materiais equivalentes utilizados no Tally® devido à limitação da biblioteca, que ainda representam processos industriais com emissões relevantes.

Em seguida, a Divisão 04 – *Masonry* (Alvenaria) apareceu como o segundo maior grupo de impacto, variando entre 13% e 30%, influenciada sobretudo pelo bloco cerâmico Poroton e pela argamassa equivalente disponibilizada pelo *software*. Embora o modelo sustentável utilize tijolo solo-cimento no Revit®, a ausência desse material no Tally® exige o uso do bloco Poroton, o que explica a permanência de impactos significativos nessa divisão.

Já a Divisão 08 – *Openings and Glazing* (Esquadrias e Vidros) apresentou participações relevantes, chegando a 32% no potencial de eutrofização e 25% no potencial de acidificação, devido aos processos de fabricação da porta de madeira e do vidro temperado, ambos intensivos em energia.

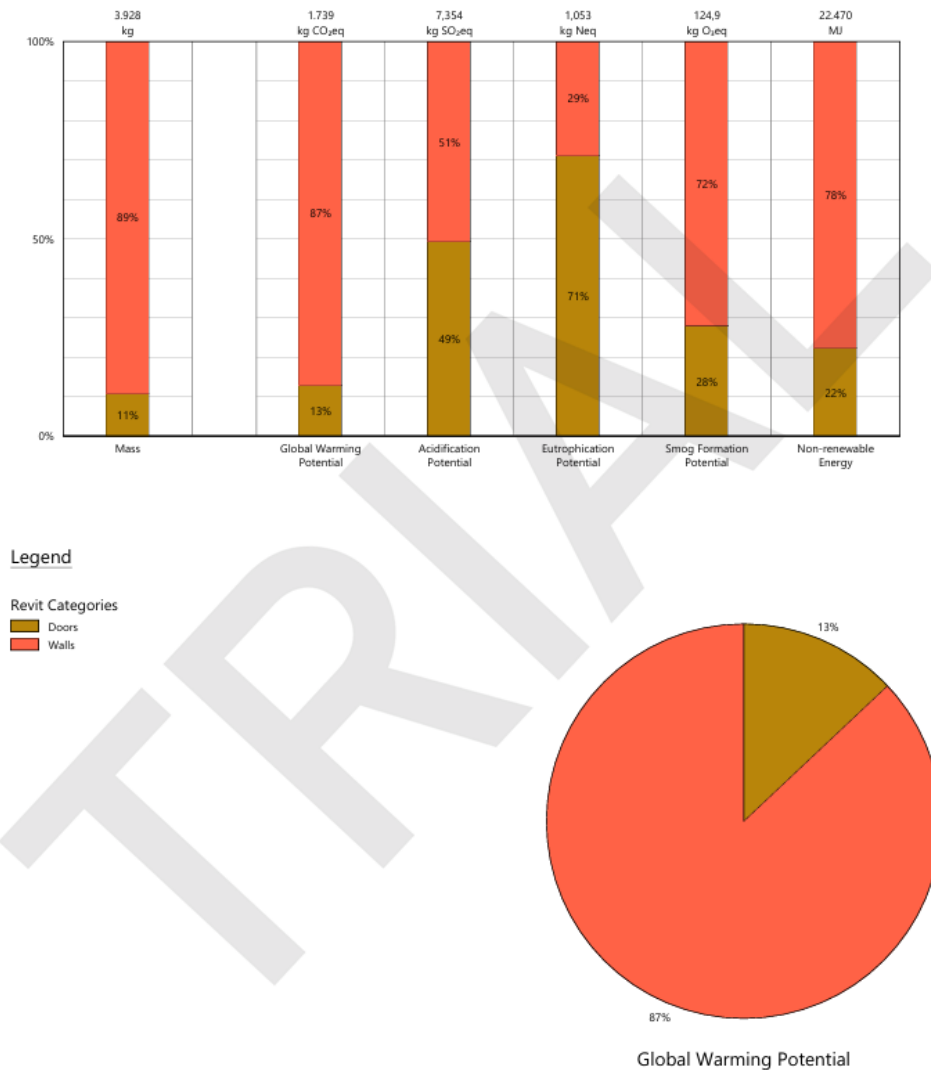
De maneira geral, embora tenha havido substituição de materiais no modelo sustentável, a limitação da biblioteca do Tally® reduziu a capacidade de refletir integralmente os ganhos ambientais esperados. Ainda assim, observou-se uma leve redistribuição dos impactos entre as divisões, sugerindo melhor desempenho relativo em relação ao sistema convencional.

#### 5.2.4.4. Resultados por Categoria do Revit®

A Figura 36 apresenta os Resultados por Categoria do Revit (*Results per Revit Category*) para a parede sustentável, permitindo identificar a contribuição relativa das categorias *Walls* (Paredes) e *Doors* (Portas) nos impactos ambientais do sistema. Assim como no modelo convencional, observou-se que a categoria *Walls* permaneceu como o elemento predominante, concentrando a maior parte dos impactos em todas as categorias avaliadas. Isso ocorreu porque a parede reúne o maior volume de materiais, incluindo o tijolo solo-cimento, o reboco de cal e as camadas de tinta mineral ecológica, que juntos representaram 89% da massa total do sistema e 87% do Potencial de Aquecimento Global (GWP).

Figura 36 - Resultados por Categoria do Revit® (Sustentável)

## Results per Revit Category



Fonte: Elaborado pela autora no Tally® (2025)

Embora a parede continue sendo o principal componente responsável pelos impactos, a categoria Doors apresentou participação mais expressiva no cenário sustentável do que no convencional. A porta exerceu influência maior em categorias associadas a emissões atmosféricas e ao uso de energia, como Acidificação, Eutrofização e Formação de Smog. Em algumas dessas categorias, a porta chegou a representar quase metade ou até a maior parte do impacto, como é o caso da Eutrofização, onde atingiu 71% da contribuição total. Isso deveu-se principalmente ao vidro temperado, cujo processo de produção envolve fusão em altas temperaturas e consumo significativo de energia, ampliando sua participação relativa mesmo com menor massa.

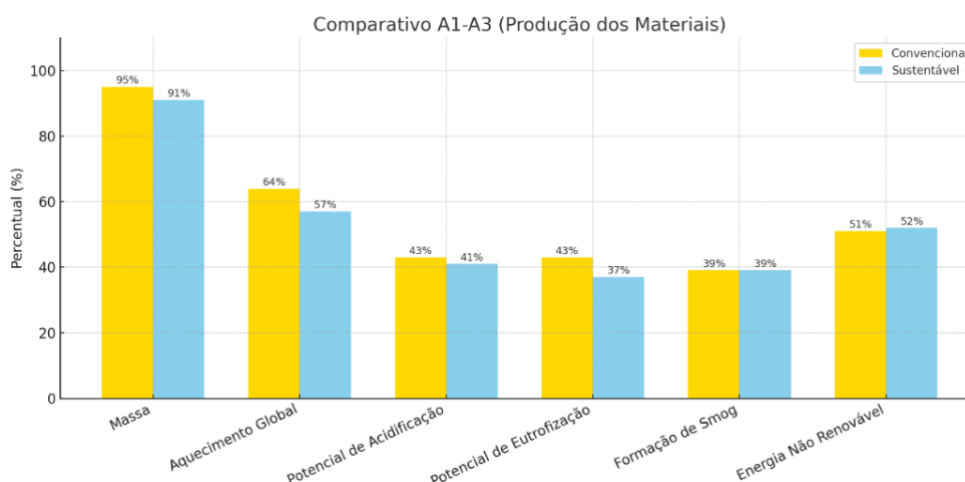
O gráfico setorial (Figura 36) que acompanhou a análise reforça esse comportamento, mostrando visualmente o contraste entre ambas as categorias no Potencial de Aquecimento Global. Apesar de a parede ainda ser o elemento dominante no conjunto dos impactos, a porta ainda influenciou de forma perceptível determinadas categorias em que seus materiais apresentaram maior intensidade energética.

### 5.3. COMPARAÇÃO ENTRE PAREDE CONVENCIONAL E SUSTENTÁVEL (ACV)

Após a obtenção dos resultados no Tally® para os dois cenários, parede convencional e parede sustentável, foi possível comparar os impactos de cada sistema ao longo dos diferentes módulos da Avaliação do Ciclo de Vida (A1–A3, A4, B2–B5 e C2–C4). O objetivo desta etapa foi analisar como cada solução se comporta nas principais categorias de impacto ambiental, observando diferenças, padrões e variações entre elas. Essa comparação também permitiu identificar em quais etapas do ciclo de vida os materiais mais influenciam o desempenho ambiental da parede.

É importante destacar que a biblioteca de materiais do Tally® é limitada ao contexto internacional, o que exige o uso de materiais equivalentes e leva, em alguns casos, à necessidade de repetir no cenário sustentável os mesmos materiais usados no convencional. Isso reduz a diferença absoluta entre os resultados, mas ainda permite visualizar diferenças significativas. Assim, os gráficos comparativos apresentados a seguir, juntamente com os demais resultados fornecidos pelo software (por divisão, por material e por categoria do Revit®), oferecem uma visão geral do comportamento ambiental de cada sistema construtivo. A Figura 37 apresenta o comparativo do módulo A1–A3 (Produção dos Materiais) entre os dois cenários.

Figura 37 - Comparativo A1-A3 (Produção dos Materiais)

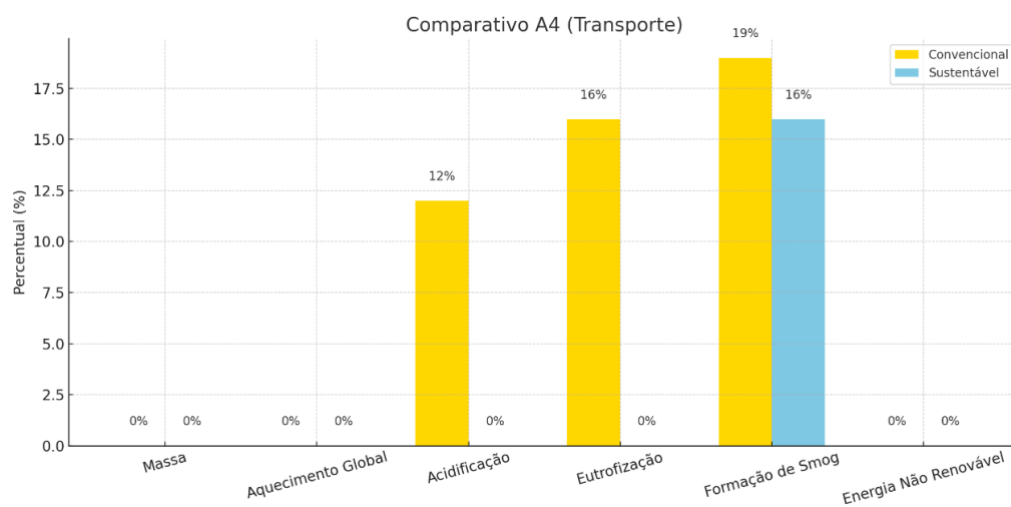


Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Como indicado na Figura 37, nota-se que a parede sustentável apresenta desempenho ambiental superior em diversas categorias. Os impactos relacionados ao Potencial de Aquecimento Global reduzem de 64% para 57%, e os valores de Eutrofização diminuem de 43% para 37%, refletindo a menor intensidade energética dos materiais alternativos utilizados. Embora a Formação de Smog permaneça equivalente entre os sistemas (39% em ambos), e a massa total apresente pequena variação, 95% na parede convencional contra 91% na sustentável, a única categoria em que o sistema sustentável apresenta valor ligeiramente superior é a Energia Não Renovável, comportamento associado às características do banco de dados internacional do Tally®, no qual alguns materiais alternativos possuem energia incorporada maior que os equivalentes convencionais. O conjunto dos resultados apresentados na Figura 37 evidencia que, já na fase de extração e fabricação, a adoção de materiais sustentáveis contribui para uma queda consistente dos impactos ambientais, reforçando o seu potencial de melhoria no ciclo de vida.

Na sequência, a Figura 38 apresenta o comparativo do módulo A4 (Transporte), permitindo avaliar a influência da logística no desempenho ambiental de cada sistema.

Figura 38 - Comparativo A4 (Transporte)



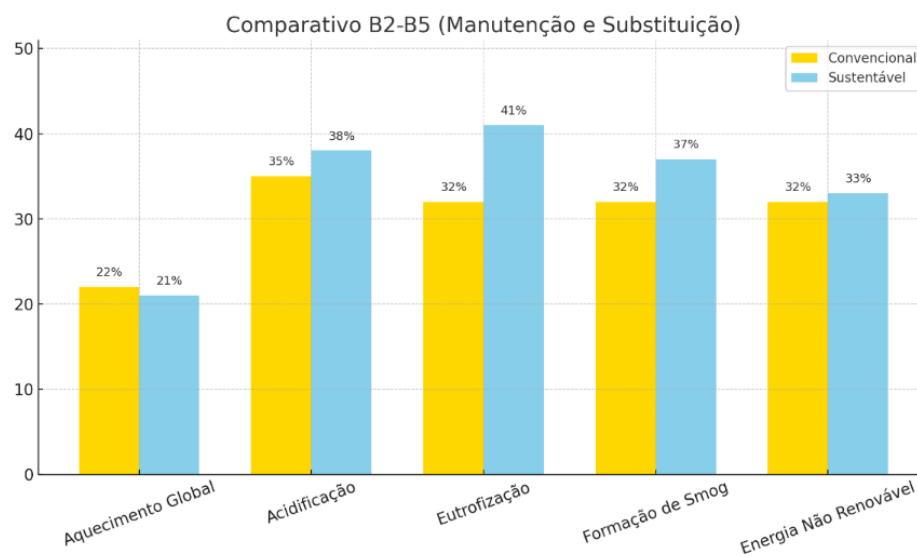
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A Figura 38, evidencia que os impactos ambientais associados ao transporte praticamente não se alteram entre os dois sistemas, já que a parede sustentável não apresentou valores significativos em nenhuma categoria, enquanto a parede convencional mostrou pequenas contribuições, especialmente em Acidificação (12%), Eutrofização (16%) e Formação de Smog (19%). A única categoria em que ambos apresentam participação é a Formação de Smog, onde a solução sustentável registra 16%, ligeiramente inferior ao valor do

sistema convencional. Esses resultados demonstram que o transporte não é um fator determinante para diferenciar os dois cenários, reforçando que as principais vantagens ambientais da parede sustentável não se devem à logística, mas sim aos materiais empregados nas etapas iniciais do ciclo de vida.

A Figura 39 apresenta o comparativo do módulo B2-B5, relacionando às etapas de manutenção e substituição dos componentes ao longo do ciclo de vida.

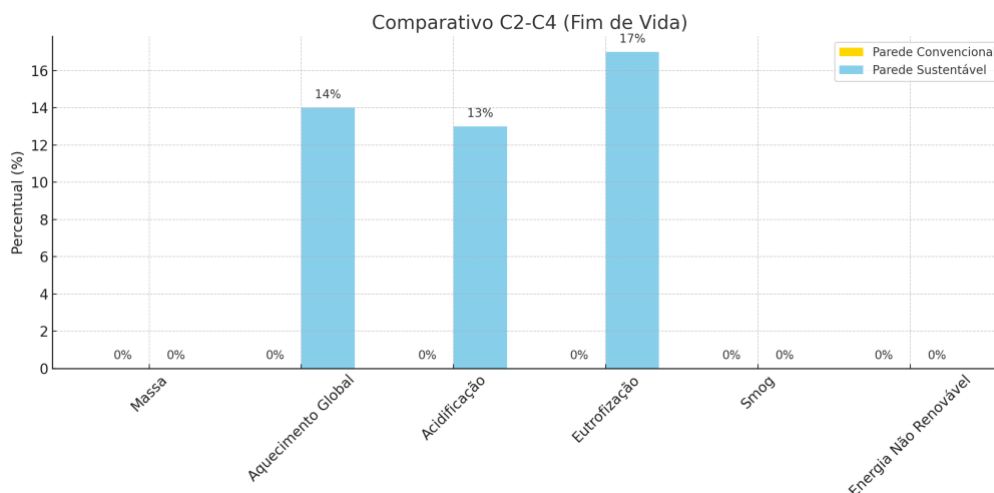
Figura 39 - Comparativo B2-B5 (Manutenção e Substituição)



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Observa-se a partir da Figura 39 que diferentemente dos módulos anteriores, o comportamento entre as duas paredes é mais equilibrado, com o sistema sustentável apresentando valores maiores em algumas categorias. Enquanto a parede convencional registra 35% em Acidificação, 32% em Eutrofização e 32% em Formação de Smog, a parede sustentável alcança 38%, 41% e 37%, respectivamente. Essa diferença ocorre porque, no Tally®, alguns materiais equivalentes utilizados para representar as alternativas sustentáveis possuem maiores frequências de manutenção ou substituição padrão em seu banco de dados, elevando o impacto proporcional nesses módulos. Ainda assim, as variações permanecem moderadas, indicando que a manutenção ao longo do ciclo de vida tem influência menos determinante quando comparada aos estágios de produção dos materiais. Por fim, a Figura 40 apresenta o comparativo do módulo C2-C4, referente ao fim de vida dos componentes, permitindo avaliar os impactos associados às etapas de remoção, transporte e destinação final da parede.

Figura 40 - Comparativo C2-C4 (Fim de Vida)



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A Figura 40 evidencia uma diferença marcante entre os dois sistemas construtivos. Enquanto a parede convencional não apresenta contribuição significativa em nenhuma das categorias avaliadas, a parede sustentável registra impactos distribuídos principalmente no Potencial de Aquecimento Global (14%), Acidificação (13%) e Eutrofização (17%). Esse comportamento ocorre porque, no Tally®, os materiais equivalentes utilizados para representar as camadas sustentáveis possuem modelos de descarte mais detalhados, que incluem etapas adicionais de processamento, transporte e tratamento no fim de vida. Isso faz com que o sistema sustentável apresente maior visibilidade nessa fase, não necessariamente por ter maior impacto real, mas pela forma como esses materiais são parametrizados na base de dados. Ainda assim, os valores permanecem relativamente baixos quando comparados à fase de produção dos materiais (A1–A3), mantendo o fim de vida como um módulo de menor influência no ciclo global da parede.

De modo geral, ao comparar os dois cenários fica evidente que embora a parede sustentável apresente melhorias consistentes em algumas categorias ambientais, a hierarquia das fontes de impacto permanece semelhante. Em ambos os sistemas, os materiais de acabamento continuam como os maiores contribuintes para a maioria das categorias analisadas. No entanto, no cenário sustentável observa-se uma leve redistribuição: os acabamentos mantêm alta participação, mas a divisão de alvenaria passa a assumir mais relevância em categorias específicas.

Quando a análise é detalhada por material, nota-se que a parede sustentável apresenta uma fragmentação maior dos impactos entre os componentes, ao contrário da parede

convencional, em que poucos materiais concentram a maior parte das emissões. Esse comportamento é influenciado pela utilização de alternativas de menor carga ambiental, como a tinta à base de água, que não eliminam por completo os impactos da produção, mas introduzem um equilíbrio mais favorável entre massa, energia e emissões. Além disso, apenas a solução sustentável registra pequenos créditos ambientais em algumas categorias, decorrentes do potencial de recuperação ou reciclagem atribuído aos materiais equivalentes utilizados na modelagem, o que contribui para reduzir ligeiramente o impacto líquido final.

Por fim, a análise por categorias do Revit® confirma a predominância da categoria *Walls* nos dois modelos, mas com uma redução proporcional dessa participação no cenário sustentável. Enquanto as portas permanecem com influência menor no impacto total, elas assumem um peso relativo um pouco maior na solução sustentável devido ao reequilíbrio geral provocado pelos novos materiais. Assim, ao reunir todos os resultados, percebe-se que a parede sustentável não apenas reduz valores absolutos em várias categorias, mas também altera a distribuição dos impactos ao longo do ciclo de vida, reforçando uma tendência de comportamento ambiental mais equilibrado e alinhado às práticas construtivas sustentáveis.

#### 5.4. ANÁLISE COMPARATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO RESIDENCIAL

A fim de complementar a análise ambiental e econômica, esta etapa investigou o impacto da geração de energia fotovoltaica na fase de operação da edificação (Módulo B6) mantendo um consumo de referência único para ambos os cenários. A residência-modelo foi considerada com uma demanda de 452 kWh/mês, valor obtido a partir da fatura real de uma residência com características semelhantes à edificação estudada e adotada como perfil de consumo de referência para o cenário com sistema fotovoltaico.

A avaliação foi desenvolvida confrontando o custo total que seria pago à concessionária (Cenário Convencional) com o custo real pago após a compensação da energia solar (Cenário Sustentável), utilizando o período de 30 dias de consumo observado na fatura (Figura 41).

Figura 41 - Fatura real da Concessionária (Energia)

CONTA MÊS	VENCIMENTO	CONSUMO (KWH)	TOTAL A PAGAR (R\$)		
OUTUBRO/2025	10/11/2025		77,17		
R: 89 001 87 18 008020					
DADOS DA UNIDADE CONSUMIDORA					
Grupo/Subgr	Classe/Subclasse	Ligação	Número Medidor	Faturamento	Modalidade
B	RESIDENCIAL	BIFASICA	11764871	NORMAL	CONVENCIONAL
DATAS DA LEITURA					
Atual:	15/10/2025	Dias de consumo:	30	Emissão:	21/10/2025
Anterior:	15/09/2025	Próxima leitura:	14/11/2025	Apresentação:	22/10/2025
DADOS DA LEITURA (KWH)					
	kWh INJETADO TOT/PTA	kWh INJETADO F/PONTA	kWh INJETADO F/PONTA INTERMED.	kWh INJETADO INTERMED.	kWh INJETADO RESERVADO
Leit. Atual		15117			
Leit. Anterior		14665			
Constante		1,000			
Resíduo		0			
Medido		0			
Faturado:		0			
DESCRIÇÃO DA CONTA					
CONSUMO 50 KWH A 0 803602					45,17
CONSUMO 402 KWH A 0 843040					338,90
CREDITO DE GERACAO F/PONTA					338,90-
RESIDUO EN REVERSA F/PON 402					
EN REVERSA ACUM. F/PONTA 444					
CONTR. ILUMINACAO PUB. (COSIP)					32,00
ADICIONAL BANDEIRA VERMELHA (INFO):				1,18	
ADIC. BAND. VERMELHA PATAMAR 2 (INFO):				1,83	

Fonte: Adaptado pela autora (2025)

#### 5.4.1. Cenário 1: Residência Convencional (Sem Geração Fotovoltaica)

Neste cenário, a demanda total de 452 kWh seria integralmente comprada da concessionária. Analisando a composição do custo por meio da fatura, estima-se o valor total a ser pago:

- Custo da Energia (452 kWh): R\$ 384,07 (soma dos valores da energia faturada e compensada), considerando o consumo mensal registrado na fatura real de uma residência com características semelhantes à residência-modelo, adotado como referência para representar o perfil de uso energético da edificação estudada.
- Encargos Adicionais (COSIP e Bandeiras): R\$ 35,01 (R\$ 32,00 de COSIP + R\$ 1,18 e R\$ 1,83 de Adicional Bandeira Vermelha).

$$\text{Custo Total Convencional} = 384,07 + 35,01 = \text{R\$ } 419,08$$

Portanto, para uma demanda de 452 kWh em um mês, o custo total estimado no cenário convencional seria de aproximadamente R\$ 419,08.

### 5.4.2. Cenário 2: Residência Sustentável (Com Geração Fotovoltaica)

Agora considerando a mesma residência equipada com sistema de energia solar fotovoltaico. Apesar do consumo real de 452 kWh, a maior parte dessa energia foi compensada pela geração própria (402 kWh). Como resultado, o custo total a pagar reduziu-se para o valor residual de R\$ 77,17, correspondente ao valor efetivamente cobrado na fatura real após a compensação energética prevista pelo sistema fotovoltaico.

### 5.4.3. Análise Comparativa da Economia

Ao isolar o consumo de 452 kWh como base, a comparação demonstra claramente o ganho financeiro proporcionado pela tecnologia fotovoltaica, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Comparação entre os sistemas de energia (Base 452 kWh)

Comparativo de Custos (Base 452 kWh)	Custo Mensal (R\$)
Cenário 1: Convencional (sem solar)	R\$ 419,08
Cenário 2: Sustentável (com solar)	R\$ 77,17
Economia Mensal Estimada	R\$ 341,91

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

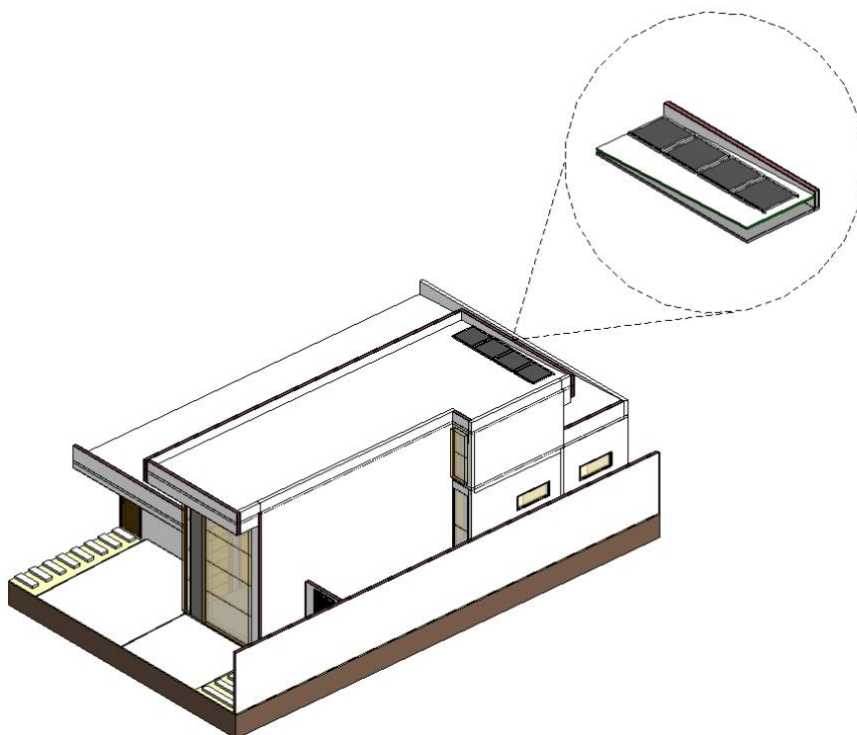
A adoção da energia solar reduziria o gasto da residência em aproximadamente 81,6% para este nível de consumo. Em termos anuais, essa economia alcançaria cerca de R\$ 4.102,92. Essa estimativa foi calculada com base no custo do kWh registrado na fatura real da residência de referência, já incorporado nos valores utilizados. Ressalta-se que o cálculo considera apenas a redução mensal obtida pela compensação energética, não incluindo o investimento inicial, operação ou manutenção do sistema fotovoltaico, o que pode alterar o retorno financeiro em uma análise mais abrangente.

Dessa forma a modelagem BIM permitiu a modelagem correta implantação e visualização do sistema fotovoltaico na cobertura, garantindo sua compatibilidade arquitetônica e reforçando o papel da tecnologia como suporte para a tomada de decisão sustentável.

Para demonstrar de forma integrada como a sustentabilidade pode ser incorporada ao projeto, a Figura 42 apresenta a modelagem BIM da residência com a inserção dos painéis solares fotovoltaicos na cobertura. A utilização do BIM permitiu visualizar a implantação do

sistema, analisar a área disponível na laje e garantir sua compatibilidade com o conjunto arquitetônico já desenvolvido. Essa representação reforça a abordagem adotada neste trabalho, na qual o BIM é compreendido como uma metodologia integradora, capaz de reunir informações, simulações e análises em um mesmo ambiente digital, oferecendo suporte à tomada de decisão sustentável.

Figura 42 - Modelo 3D com a inserção dos painéis solares



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Além do impacto financeiro expressivo, a adoção de energia fotovoltaica também contribui para a redução dos impactos ambientais associados à fase de operação da edificação, diminuindo a demanda por energia proveniente de fontes fósseis e complementando, assim, os resultados obtidos anteriormente na ACV dos materiais construtivos. Dessa forma, a incorporação de placas solares na residência representa uma estratégia integrada de sustentabilidade, combinando economia financeira e benefícios ambientais ao longo de toda a vida útil da edificação.

Dessa forma, o conjunto de análises realizado no presente trabalho, abrangendo o estudo de ACV dos materiais (dimensão 5D) e a avaliação de desempenho energético-econômico (dimensão 6D), demonstrou de maneira integrada os benefícios ambientais e financeiros associados à incorporação de tecnologias sustentáveis na edificação.

Os resultados demonstram que a sustentabilidade deve ser abordada em duas frentes complementares:

- Ganhos na Fase de Produção (ACV)

A análise comparativa entre a parede convencional e a sustentável demonstrou uma redução significativa de impactos ambientais, como a diminuição no Potencial de Aquecimento Global (GWP) e na Demanda de Energia Primária. Essa melhoria foi alcançada por meio da substituição de materiais de alta energia incorporada, como o bloco cerâmico e o alumínio, por alternativas de menor impacto, como o tijolo solo-cimento e a madeira.

- Ganhos na Fase de Operação (Energia e Economia)

A análise do consumo de energia validou a eficácia da adoção de sistemas fotovoltaicos. Utilizando uma demanda base de 452 kWh/mês, constatou-se uma economia superior a 81% no custo mensal da fatura, evidenciando o alto retorno econômico da tecnologia para o contexto local, conforme destacado nos estudos sobre benefícios da energia solar em residências (Campos, 2021).

#### **5.4.4. O papel Integrador do BIM**

A integração e a coordenação dessas duas frentes de análise (materiais e operação) foram viabilizadas pela utilização do Building Information Modeling (BIM) (Ribeiro, 2024).

- O BIM serviu como a plataforma central que permitiu a quantificação de materiais para a ACV (5D), fornecendo dados precisos para o Tally®.
- A metodologia possibilitou a visualização e a correta implantação do sistema fotovoltaico na cobertura, facilitando a tomada de decisões eficientes e sustentáveis (Silva et al., 2019).

Em síntese, os resultados confirmam que a tecnologia BIM representa um suporte indispensável para a Engenharia e Arquitetura ao promover a integração das etapas, favorecer a redução de impactos e valorizar a produção sustentável que combina a otimização de materiais com a eficiência energética operacional (Silva et al., 2019). A sua aplicação em projetos arquitetônicos sustentáveis demonstra ser um método eficaz para gerar soluções mais conscientes e economicamente viáveis (Ribeiro, 2024).

## 5.5. ANÁLISE ECONÔMICA DO CONSUMO DE ÁGUA E POTENCIAL DE REDUÇÃO

Com o objetivo de complementar a análise de desempenho ambiental e econômico apresentada na ACV e na avaliação do consumo energético, esta subseção examinou o consumo de água da residência-modelo e estimou o potencial de redução de custos a partir da adoção de um sistema de captação de água da chuva. Essa abordagem buscou evidenciar os benefícios operacionais que podem ser alcançados ao longo da vida útil da edificação (Módulo B7), incorporando estratégias sustentáveis compatíveis com o contexto climático de Manaus, que apresenta elevados índices de precipitação anual.

Figura 43 - Fatura real da Concessionária (Água)

FATURA DE SANEAMENTO  
**ÁGUAS DE MANAUS**  
 ÁGUAS DE MANAUS S/A  
 RUA DO BOMBAMENTO, 01, COMPENSA  
 MANAUS/AM - CEP: 69029-160  
 CNPJ: 03.264.927/0001-27  
 INSCRIÇÃO ESTADUAL: 04141.925-5

MATRÍCULA: 4981898-8

FATURA N.: 164827721  
 DATA DE EMISSÃO: 27/10/2025  
 VENCIMENTO: 08/11/2025

ANTERIOR: 220555189  
 ATUAL: 24/09/2025  
 SITUAÇÃO DE LIGAÇÃO: 544  
 R. DE ECONOMIAS: 27/10/2025

REFERÊNCIA	CONSUMO MEDIDO		CONSUMO FATURADO		DIAS CONSUMO	CONSUMO (M <sup>3</sup> )				CONSUMO FATURADO (M <sup>3</sup> )
	ÁGUA	ESGOTO	ÁGUA	ESGOTO		ÁGUA	ESGOTO	RESERVA	ESGOTO	
09/2025	19	15	19	15	33	0	0	0	0	31
08/2025	19	13	19	13		0	0	0	0	
07/2025	20	20	20	20		0	0	0	0	
06/2025	22	22	22	22		0	0	0	0	
05/2025	24	24	24	24		0	0	0	0	
04/2025	26	26	26	26		0	0	0	0	
03/2025	26	26	26	26		0	0	0	0	
02/2025	19	19	19	19		0	0	0	0	
01/2025	25	25	25	25		0	0	0	0	
12/2024	22	22	22	22	0	0	0	0		
11/2024	27	27	27	27	0	0	0	0		
10/2024	22	22	22	22	0	0	0	0		

FAIXA DE CONSUMO:

FAIXA DE CONSUMO	CONSUMO FATURADO (M <sup>3</sup> )	TAXA DE ÁGUA (R\$)	TAXA DE ESGOTO (R\$)
0 - 10	10	0,40	0,00
10 - 20	10	1,10	0,00
20 - 30	10	1,70	0,00
30 - 40	1	2,40	0,00

DISCRIMINAÇÃO DO FATURAMENTO:

ESPECIFICAÇÃO DO SERVIÇO	VALOR FATURADO (R\$)
VALOR DE ÁGUA	363,03

TOTAL A PAGAR (R\$): 383,03

ALÍQUOTA: 1,00%  
 DOPNS: 7,00%  
 IBS: 0,00%  
 RETENÇÃO DE TRIBUTOS (R\$):

Fonte: Adaptado pela autora (2025)

Para esta análise, adotou-se como referência a fatura real de abastecimento de água fornecida pela concessionária local referente a um ciclo de 33 dias de consumo (Figura 43), que registrou 31 m<sup>3</sup>. Ressalta-se que esse valor não corresponde a uma média mensal ou anual de

consumo, mas a um registro pontual utilizado como base comparativa. A fatura refere-se a uma residência unifamiliar com padrão construtivo semelhante ao da edificação estudada, sendo considerado o consumo total do imóvel, e não um valor per capita, o que se mostrou adequado para a estimativa preliminar de economia entre o cenário convencional e o cenário com aproveitamento pluvial.

### **5.5.1. Cenário 1: Residência Convencional (Sem sistema de captação da água pluvial)**

Com base na estrutura tarifária residencial vigente (2025), o consumo de 31 m<sup>3</sup> enquadra-se nas seguintes faixas:

- 10 m<sup>3</sup> → R\$ 6,0800/m<sup>3</sup>
- 11–20 m<sup>3</sup> → R\$ 11,7830/m<sup>3</sup>
- 21–30 m<sup>3</sup> → R\$ 17,9900/m<sup>3</sup>

Aplicando as tarifas:

a) Sem considerar impostos

$$\text{Custo Água (0 – 10 m}^3) = 10 \times 6,08 = R\$60,80$$

$$\text{Custo Água (11 – 20 m}^3) = 10 \times 11,783 = R\$117,83$$

$$\text{Custo Água (21 – 30 m}^3) = 10 \times 17,99 = R\$179,90$$

$$\text{Custo Água (31 m}^3) = 1 \times 24,505 = R\$24,51$$

$$\text{Subtotal Água} = 60,80 + 117,83 + 179,90 + 24,51 = R\$383,04$$

Este valor corresponde ao valor registrado na fatura (R\$ 383,03), validando a precisão dos cálculos tarifários.

### **5.5.2. Cenário 2: Residência Sustentável (Com sistema de captação da água pluvial)**

Para residências unifamiliares, o uso da água pluvial costuma atender entre 30% e 60% da demanda total destinada a usos não potáveis, como descargas sanitárias, irrigação e limpeza externa (Tomaz, 2010). Para este estudo, adotou-se um valor intermediário, com economia média de 40% de redução do consumo pago.

$$\text{Redução estimada} = 31 \text{ m}^3 \times 0,40 = 12,4 \text{ m}^3$$

$$\text{Novo consumo pago} = 31 - 12,4 = 18,6 \text{ m}^3$$

Com a redução, a residência enquadra-se em um novo perfil tarifário, pagando apenas pelo 18,6 m consumidos da rede pública:

Aplicando as tarifas:

$$\text{Custo Água (0 – 10 m}^3\text{)} = 10 \times 6,08 = \text{R}\$60,80$$

$$\text{Custo Água (11 – 18,6 m}^3\text{)} = 8,6 \times 11,783 = \text{R}\$101,34$$

$$\text{Subtotal} = 60,80 + 101,34 = \text{R}\$162,14$$

Aplicando-se os tributos (PIS 1,65%, COFINS 7,60% e ISS 5%):

$$\text{PIS} + \text{COFINS} + \text{ISS} = 14,25\%$$

$$\text{Total estimado} = 162,14 \times 1,1425 = \text{R}\$185,12$$

### 5.5.3. Análise Comparativa da Economia

Ao considerar o consumo de referência de 31 m<sup>3</sup>/mês como base, a comparação demonstra a economia financeira proporcionada pelo sistema de captação da água pluvial, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação entre os sistemas de água (Base 31 m<sup>3</sup>/mês)

Comparativo de Custos (Base 31 m <sup>3</sup> /mês)	Custo Mensal (R\$)
Cenário 1: Convencional (sem água pluvial)	R\$ 383,03
Cenário 2: Sustentável (com sistema pluvial)	R\$ 185,12
Economia Mensal Estimada	R\$ 197,91
Economia Percentual	51,6%

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

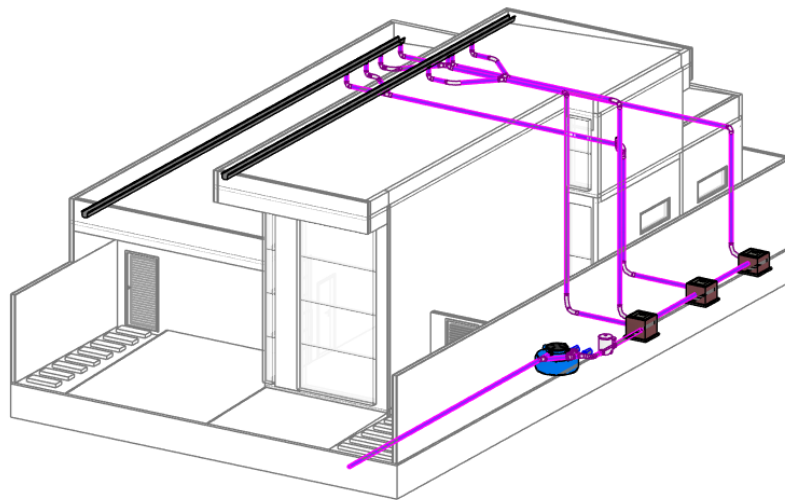
A Tabela 4 mostra a diferença entre os dois cenários representa uma economia mensal estimada de R\$ 197,91, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 51,67% no valor da fatura de água. Em termos anuais, essa economia alcançaria cerca de R\$ 2.374,92 por ano, considerando a repetição desse padrão ao longo de 12 meses. Ainda que se trate de uma estimativa, baseada em um cenário simplificado de substituição parcial da água potável por água pluvial, os resultados indicam que a adoção de um sistema de aproveitamento de água da chuva pode gerar um impacto financeiro significativo para edificações residenciais com características semelhantes à residência-modelo.

Além do benefício econômico, a redução do volume de água tratada demandado da rede pública contribui para a diminuição da pressão sobre os mananciais e para a redução do consumo de energia associado aos processos de captação, tratamento e distribuição. Dessa forma, a estratégia de uso de água pluvial se alinha às diretrizes de sustentabilidade discutidas na ACV dos materiais e na análise energética, reforçando a importância de soluções integradas que considerem tanto a fase de produção quanto a fase de operação da edificação.

A modelagem BIM também desempenhou um papel essencial na concepção e organização do sistema de aproveitamento de água pluvial. Por meio do software, foi possível representar de forma integrada todo o percurso da água captada, desde a cobertura até sua chegada à cisterna e posterior redistribuição para os pontos de uso não potável da residência.

A Figura 44 apresenta o modelo 3D do sistema de captação de água pluvial, ilustrando o trajeto da água desde as coberturas até os reservatórios e pontos de uso não potável da residência.

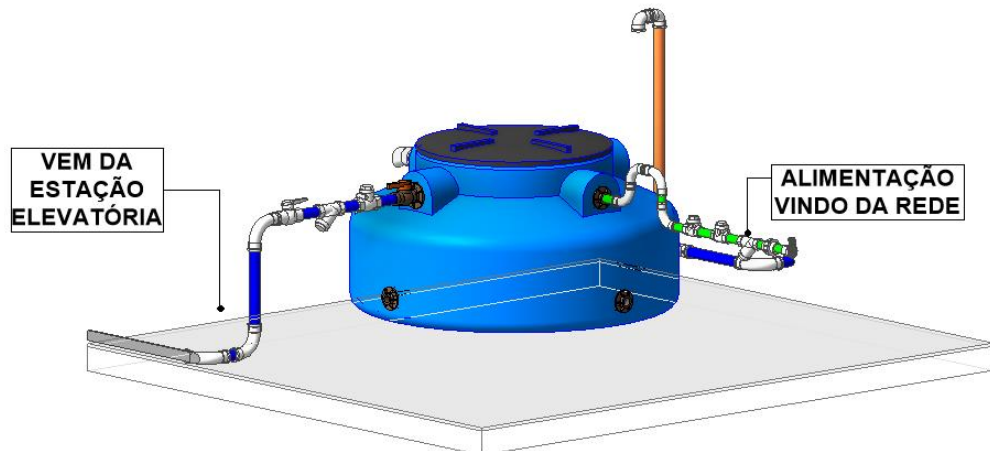
Figura 44 - Modelo 3D do Sistema de captação de água pluvial



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

. Essa representação tridimensional permitiu avaliar interferências, verificar a viabilidade de implantação e garantir a compatibilidade com os demais sistemas prediais.

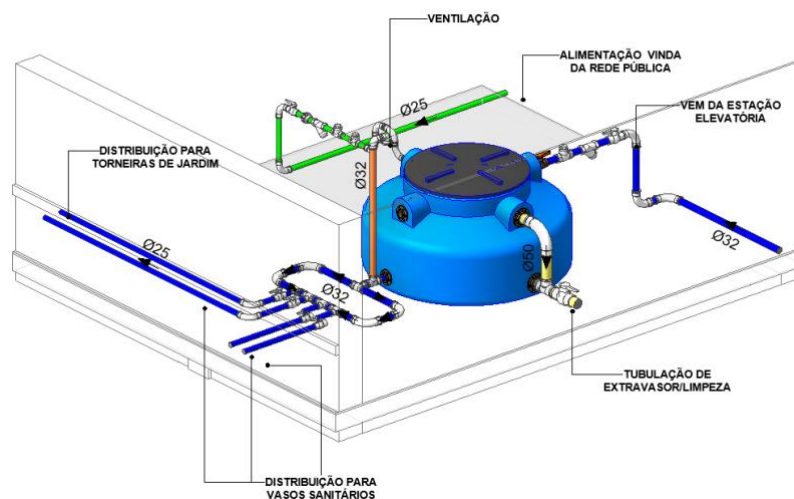
Figura 45 - Reservatório Superior



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Na Figura 45, apresenta-se um detalhamento do reservatório, destacando as conexões e dispositivos de entrada da água da rede pública e alimentação proveniente da estação elevatória. A modelagem permitiu visualizar a disposição real das tubulações, válvulas, conexões e pontos de inspeção, facilitando a conferência técnica do sistema e assegurando que a instalação atenda às exigências normativas e de manutenção.

Figura 46 - Reservatório setorizado



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Por fim, a Figura 46 mostra o sistema completo de distribuição da água pluvial para os pontos de consumo destinados a usos não potáveis, como vasos sanitários e torneiras de jardim. Por meio do BIM, foi possível simular o trajeto das tubulações, identificar eventuais conflitos com elementos estruturais e otimizar o posicionamento das redes, garantindo uma instalação eficiente e integrada ao conjunto arquitetônico.

Assim como no caso do sistema fotovoltaico, o uso do BIM reforça sua função como ferramenta de apoio à tomada de decisão sustentável, permitindo que soluções de economia hídrica sejam projetadas com precisão, eficiência e total integração com o restante da edificação.

A adoção do sistema de aproveitamento de água pluvial, além de reduzir de forma relevante o consumo de água tratada, contribui diretamente para a mitigação dos impactos ambientais associados à exploração e ao tratamento dos recursos hídricos.

Ao diminuir a dependência da rede pública, a edificação passa a demandar menor volume de água potável, contribuindo para a manutenção dos mananciais e reduzindo o consumo energético envolvido nos processos de captação e distribuição. Essa estratégia amplia os benefícios já observados na análise ambiental dos materiais, reforçando o papel das soluções sustentáveis na melhoria do desempenho global da edificação. Assim, a incorporação do sistema pluvial integra eficiência econômica, responsabilidade ambiental e otimização operacional ao longo de toda a vida útil do empreendimento.

## 6. CONCLUSÃO

A pesquisa aplicou a metodologia *Building Information Modeling* (BIM) como suporte à análise da sustentabilidade em edificações, articulando Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), desempenho energético na fase de operação e estratégias complementares de conservação de recursos. A partir do modelo arquitetônico desenvolvido no Revit®, foi possível integrar dados, compatibilizar informações e gerar subsídios quantitativos para uma avaliação ambiental mais precisa, demonstrando que o BIM não se restringe à representação gráfica, mas constitui uma metodologia estruturante para apoiar a tomada de decisões sustentáveis.

A análise comparativa entre a parede convencional e a parede sustentável, realizada por meio do Tally®, demonstrou reduções expressivas em categorias como Potencial de Aquecimento Global (GWP), Potencial de Acidificação e Demanda de Energia Não Renovável. Embora a diferença numérica entre os cenários não tenha sido tão acentuada quanto o esperado, essa limitação decorre principalmente da própria biblioteca do Tally®, baseada majoritariamente em dados norte-americanos e sem representação específica para materiais amplamente utilizados no contexto brasileiro e regional. Ainda assim, os resultados obtidos evidenciam uma tendência clara de melhoria ambiental quando se adotam materiais de menor impacto. Essa etapa reforça a relevância do BIM 5D para a quantificação de impactos e, simultaneamente, do BIM 6D como suporte à análise integrada de sustentabilidade, demonstrando que, mesmo diante de restrições de base de dados, o uso de ferramentas digitais permite compreender de forma consistente como escolhas construtivas influenciam o desempenho ambiental do edifício.

Na fase de operação da edificação, a avaliação do consumo energético validou o potencial de economia proporcionado pela adoção do sistema fotovoltaico. Utilizando como base o consumo real de 452 kWh/mês, verificou-se uma redução superior a 80% no valor da fatura mensal, demonstrando não apenas viabilidade financeira, mas também contribuição direta para a mitigação de impactos associados à geração elétrica por fontes fósseis. A incorporação dos painéis solares, integrada ao modelo BIM, teve caráter representativo, servindo para verificar compatibilidades, orientar o posicionamento dos componentes e permitir a visualização da solução no projeto. Não se tratou de um dimensionamento completo do sistema fotovoltaico, mas de uma modelagem conceitual destinada a apoiar a análise de desempenho energético e a integração das informações no ambiente BIM.

De forma complementar, a simulação do aproveitamento de água pluvial indicou que a adoção do sistema reduziria o consumo de água tratada nas atividades restritas a usos não

potáveis, como irrigação, limpeza externa e descargas sanitárias. A projeção apontou uma redução aproximada de 51,67% na fatura mensal de água, equivalente a uma economia de R\$ 197,91 por mês, ou cerca de R\$ 2.374,92 ao ano, considerando a repetição do padrão ao longo de doze meses. Tais resultados reforçam que soluções simples podem gerar benefícios relevantes tanto no custo operacional da residência quanto na redução da pressão sobre os recursos hídricos. Essa estratégia amplia a compreensão de sustentabilidade, ao contemplar não apenas energia e materiais, mas também a gestão consciente da água, recurso essencial e cada vez mais crítico no contexto urbano brasileiro.

Os resultados obtidos demonstram que a integração entre BIM, ACV e estratégias de eficiência na operação permite consolidar uma abordagem abrangente para o projeto sustentável. A metodologia adotada neste trabalho evidenciou que decisões tomadas ainda na fase de projeto têm impactos diretos e mensuráveis sobre o desempenho ambiental e econômico da edificação ao longo de toda sua vida útil. Assim, reforça-se que projetar com foco na sustentabilidade não é um custo adicional, mas um investimento capaz de gerar benefícios cumulativos ao longo dos anos, tanto para o usuário quanto para o meio ambiente.

O conjunto das análises desenvolvidas neste trabalho demonstra alinhamento às ODS 6, 7, 11, 12 e 13, ao promover o uso eficiente da água, a adoção de energia limpa, a redução de impactos ambientais dos materiais, o incentivo a edificações mais sustentáveis e a contribuição para a mitigação das mudanças climáticas. Dessa forma, o projeto reforça sua integração com as principais diretrizes globais de sustentabilidade.

Por fim, conclui-se que o uso do BIM associado a ferramentas de avaliação ambiental e sistemas sustentáveis de operação representa um caminho promissor e coerente com as demandas contemporâneas da construção civil. A aplicação integrada dessas tecnologias possibilita projetos mais eficientes, transparentes e alinhados aos princípios de responsabilidade socioambiental, contribuindo para a evolução do setor e para a consolidação de práticas construtivas mais conscientes e resilientes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Guia 06A: Implantação de Processos BIM**. Brasília, DF: ABDI, 2017. Disponível em: [https://api.abdi.com.br/file-manager/upload/files/GUIA\\_BIM\\_06\\_20171123\\_WEB.pdf](https://api.abdi.com.br/file-manager/upload/files/GUIA_BIM_06_20171123_WEB.pdf). Acesso em: 10 jun. 2025.

ARAÚJO, Carlos Henrique de; GUIMARÃES, Irce Fernandes Gomes; NASCIMENTO, Alessandra Bruna Silva; ANDRADE, Pedro Artur Fernandes Lino. **Lean construction: perspectivas no âmbito da construção civil brasileira**. Revista Gestão e Secretariado (GeSec), São Paulo, v. 14, n. 2, p. 2545=2564, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10844:1989 – Instalações prediais de águas pluviais – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15527:2007 – Água de chuva – Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2007.

AUTODESK. **Insight: análise de desempenho de edifícios no Revit®**. Disponível em: [https://www.autodesk.com/products/insight/overview?us\\_oa=dotcom-us&us\\_si=87487edc-1ee6-4319-aa0d-b1bba4d7436a&us\\_st=INSIGHT&us\\_pt=INS360](https://www.autodesk.com/products/insight/overview?us_oa=dotcom-us&us_si=87487edc-1ee6-4319-aa0d-b1bba4d7436a&us_st=INSIGHT&us_pt=INS360). Acesso em: 18 jun. 2025.

AUTODESK. **Revit®: software de modelagem de informação da construção (BIM)**. Disponível em: [https://www.autodesk.com/products/Revit®/overview?us\\_oa=dotcom-us&us\\_si=7a30e477-89f5-4960-b0bf-17827484ba42&us\\_st=Revit®&us\\_pt=RVT](https://www.autodesk.com/products/Revit®/overview?us_oa=dotcom-us&us_si=7a30e477-89f5-4960-b0bf-17827484ba42&us_st=Revit®&us_pt=RVT). Acesso em: 18 jun. 2025.

AUTODESK. **Tally®: análise de ciclo de vida para Autodesk Revit®**. Disponível em: <https://apps.autodesk.com/RVT/en/Detail/Index?appLang=en&id=3841858388457011756&os=Win64>. Acesso em: 18 jun. 2025.

BARBOSA, Aline Costa; PEDREIRO, Marcos Souza. **A busca por soluções sustentáveis na construção civil: avanços tecnológicos e qualidade de vida.** Revista Científica da Faculdade de Tecnologia e Ciências, v. 16, n. 1, p. 98–112, 2024.

BARBOSA, Larissa Duarte Alves. **Sustentabilidade na construção civil: reuso da água.** Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, São Paulo, v. 7, n. 7, p. 296–301, jul. 2021. ISSN 2675-3375.

BRANCO, Kethlem de Holanda. **Estudo de projeto residencial com utilização de contêiner.** 2022. 95 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2022.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986. **Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para o relatório de impacto ambiental (RIMA).** Normas Brasil, 1986. Disponível em: [https://www.normasbrasil.com.br/norma/resolucao-1-1986\\_94898.html](https://www.normasbrasil.com.br/norma/resolucao-1-1986_94898.html). Acesso em: 10 jun. 2025.

CAMPOS, Kamilly Martins. **Benefícios da implantação de tecnologias sustentáveis em residências existentes.** 2021. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021.

CARDOSO, H. A. **Metodologia BIM aplicada a um projeto residencial unifamiliar.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

CHICOMBO, Ricardo Francisco. **Sustentabilidade ambiental na construção civil: uma análise crítica sobre o consumo de recursos e geração de resíduos.** *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, v. 3, n. 5, p. 174–190, 2023.

CONCEIÇÃO, A. A. P.; SANTOS, F. S. **Construção sustentável.** Revista Multidisciplinar da UESPI – INTERFACE, Teresina, v. 4, n. 1, p. 109–119, 2020.

CRASA INFRAESTRUTURA. **Entendendo a modelagem de informação da construção (BIM)**. 2023. Disponível em: <https://www.crasainfra.com/post/entendendo-a-modelagem-de-informa%C3%A7%C3%A3o-da-constru%C3%A7%C3%A3o-bim>. Acesso em: 10 jun. 2025.

CRUZ, Danylla Nunes da. **Sistema construtivo convencional e sistema construtivo sustentável para edificação de uso misto: uma análise de viabilidade econômica**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Barra do Garças, 2021.

DAYAN, Peterson. **Construção Civil – Processos Construtivos**. Apresentação. Centro Universitário IESB, Curso de Engenharia Civil, 2017.

DIAS, Leonardo de Souza et al. **Técnicas construtivas alternativas: a prática do solo cimento e as fases de uma construção voltadas ao assentamento Santa Cecília**. Revista Científica Semana Acadêmica, Fortaleza-CE, edição 182, v. 1, 2019.

ELKINGTON, John. **Canibais com garfo e faca: o tripé da sustentabilidade**. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 2001.

FERREIRA, T. C. et al. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: o impacto de grandes representantes da construção brasileira**. Ambiente & Sociedade, São Paulo, v. 26, 2023.

FRAPORTI, B. S. **Metodologia BIM e compatibilização com projetos estruturais: um estudo na literatura**. 2023. Monografia (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2023.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2023.

GOMES, Ana Carolina; COSTA, Mariana Alves; FERREIRA, João Paulo. **Impactos ambientais da construção civil e a importância da gestão de resíduos**. Revista Interdisciplinar de Engenharia Civil, v. 8, n. 2, p. 45–60, 2021.

GONÇALVES, Thiago Henrique; SANTOS, Lara Azevedo; MEDEIROS, Bruno Costa. **BIM: a arma do reaproveitamento sustentável – uso do BIM na redução de geração de resíduos e na promoção da sustentabilidade.** Revista Faculdade de Tecnologia (Revista FT), 2025. Disponível em: <https://revistaft.com.br/bim-a-arma-do-reaproveitamento-sustaveluso-do-bim-na-reducao-de-geracao-de-residuos-e-na-promocao-da-sustentabilidade/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

JULIANO, André Santos Leite. **Sistema monolítico: uma alternativa à construção civil brasileira.** Bauru: Centro Universitário Sagrado Coração – UNISAGRADO, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil.

LOBO, A. V. R.; LOBO, F. H. R.; BOTELHO, M. A. R. L. **O multiverso do BIM aplicado ao mercado da construção civil: o recorte no BIM 5D.** Revista On-line IDD, Curitiba, v. 1, n. 1, p. 32–39, 1º trim. 2023.

LOPES, Diogo Plachi et al. **Sustentabilidade na construção civil.** São Paulo: Editora Arche, 2022.

LOPES, Max Milian Taraborelli. **Métodos construtivos na construção civil.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário, 2022.

MACHADO, Felipe Olivera; SOUZA, Carla Mendes. **Uso da tecnologia BIM como ferramenta de otimização da sustentabilidade na construção civil.** Revista Faculdade de Tecnologia (Revista FT), 2024. Disponível em: <https://revistaft.com.br/uso-da-tecnologia-bim-como-ferramenta-de-otimizacao-da-sustentabilidade-na-construcao-civil/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

MARQUES, Mauricio Dias; SIMÕES, Rebeca Delatore; BRAGA JUNIOR, Sérgio Silva. **Sustentabilidade na construção civil: possibilidades e dificuldades.** Revista Aracê, São José dos Pinhais, v. 7, n. 3, p. 11087–11111, 2025.

MENDES, Gabriela. **Índice global de impacto ambiental de sistemas construtivos aplicados à habitação unifamiliar de interesse social.** 2021.

MIRANDA, Caio Vitor et al. **Estudo comparativo entre o sistema Light Steel Framing e o sistema construtivo convencional.** In: ARQUITETURA E ENGENHARIA: Ensaios Multidisciplinares. São Paulo: Atena Editora, 2022. v. 2, cap. 4, p. 53–63.

MONTEIRO, C. C. **Proposta de implementação do conceito de construções sustentáveis nas edificações do IFAM.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Construção de Edifícios) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Campus Manaus-Centro, Manaus, 2022.

NASCIMENTO, Emilli Rodrigues do; MORAIS, Denilson Pedro Ferreira de; LOPES, Shara Carvalho. **Sustentabilidade na construção civil no Brasil: uma revisão da literatura.** Research, Society and Development, v. 11, n. 14, e524111436611, 2022. ISSN 2525-3409.

NICKEL, Lena. **Do Berço ao Túmulo na LCA: O que é e como funciona?** Ecochain, 11 mar. 2025. Disponível em: <https://ecochain.com/blog/cradle-to-grave-in-lca/>. Acesso em: 18 nov. 2025.

NOBRE, P. L. **Análise de algumas contribuições do BIM para o planejamento e controle de obras.** 2021. 38 f. Monografia (Especialização em Construção Civil – Ênfase em Gestão e Tecnologia na Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2021.

PAIVA, K. S.; RAVACHE, R. L. **A aplicação da arquitetura sustentável para a minimização dos impactos ambientais.** Connectionline, v. 24, p. 75–79, 2021.

PETRUNGARO, G. et al. **Métodos construtivos sustentáveis: reutilização de containers na construção civil.** TEC-USU, v. 3, n. 3, p. 1–15, 2020.

RIBEIRO, Luciana Mendes. **Sustentabilidade em projetos arquitetônicos com a utilização da tecnologia BIM.** 2024. 195 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

RECICLAR SOCIAL. **Os pilares da sustentabilidade.** Disponível em: <https://reciclar-social.com.br/os-pilares-da-sustentabilidade/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

REGINATTO, Luana; SCHMITZ, Fabrício. **Comparativo entre o sistema wood frame e sistema convencional em concreto armado para uma residência.** In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS – CONECIM, 2022, [S. l.]. Anais [...]. [S. l.]: Editora Realize, 2022.

RIBEIRO, D. R. **Diretrizes para projetos de arquitetura sustentáveis com base na NBR 15575 e na utilização do BIM.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo e Design, Uberlândia, 2024.

SANTOS, R. M. **Técnicas construtivas e a resistência à inovação na construção civil brasileira.** Revista Brasileira de Construção Sustentável, v. 12, n. 2, p. 101–114, 2022.

SC GEOMÁTICA. **Tipologia Construtiva: Anexo 04.** São Roque do Canaã: Prefeitura Municipal, 2021.

SILVEIRA, Valéria et al. **Estudo comparativo entre o sistema construtivo convencional e o sistema monolítico.** In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA – CONAPESCEN, 2022, [S. l.]. Anais [...]. [S. l.]: Editora Realize, 2022.

SILVA, L. P. P. da; SANTOS, T. F. dos; GANDINI, J. M. D. **Aplicação do sistema BIM em projetos sustentáveis: estudo de caso do projeto acadêmico do condomínio sustentável Parque da Mata.** In: ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO – ENSUS, 7., 2019, Florianópolis. Anais

SIMÃO, João Henrique; JÚNIOR, Francisco Mendes. **Utilização de sistemas construtivos alternativos na construção civil brasileira e seus impactos ambientais.** Labor e Engenho, Campinas, v. 17, n. 00, p. 1–17, 2023.

SOUSA, Luiz Eduardo. **Aproveitamento passivo dos recursos naturais**. Prezi, 27 maio 2014. Disponível em: <https://prezi.com/nn3wuo3tymto/aproveitamento-passivo-dos-recursos-naturais/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

OLIVEIRA, Halyson Augusto. **Uma abordagem conceitual sobre os três pilares da sustentabilidade: social, econômico e ambiental**. Artigo acadêmico. [S.l.]: [s.n.], 2022.

ONU BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**. [S.l.]: Nações Unidas no Brasil, 2025. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 18 jun. 2025

ORÇAFÁSCIO. **Conheça as 7 dimensões do BIM e suas vantagens**. 14 jun. 2021. Disponível em: <https://www.orcafascio.com/papodeengenheiro/dimensoes-do-bim>. Acesso em: 10 jun. 2025.

VIANA, A. B.; WOELFFEL, M. **Desenvolvimento de aplicativo para certificações ambientais na construção civil**. Revista de Tecnologia Aplicada, v. 7, n. 1, 2024.

VILLASCHI, F. S.; CARVALHO, J. P.; BRAGANÇA, L. **Utilização do BIM para projetos mais sustentáveis**. In: ENCONTRO LATINO-EUROPEU PARA A SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES – EURO ELECS, 4., 2021, Vila Velha. Anais [...]. Vila Velha: IV EURO ELECS, 2021. Sessão 4: Edificações Sustentáveis: Qualidade, Ciclo de Vida e Projeto, p. 661–673.

WAHRLICH, J.; ALVARENGA, R. A. F. de; HENKES, J. A.; ROSSATO, I. de F.; SIMIONI, F. J. **Avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida: uma revisão**. R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 9, n. 2, p. 183-201, abr./jun. 2020.

ANEXO A – PLANTA BAIXA DO TÉRREO

