

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Igor de Freitas Barletta

**SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA EDIFICAÇÕES - PROPOSTA DE MÉTODO
DE ESCOLHA BASEADO NOS QUESITOS CO₂ EMBUTIDO E CUSTO**

Juiz de Fora
2022

Igor de Freitas Barletta

**SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA EDIFICAÇÕES - PROPOSTA DE MÉTODO
DE ESCOLHA BASEADO NOS QUESITOS CO₂ EMBUTIDO E CUSTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Kopschitz Xavier Bastos

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Abrahão Cury

Juiz de Fora
2022

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Barletta, Igor de Freitas.

Soluções Construtivas para Edificações - Proposta de Método de Escolha Baseado nos Quesitos CO2 Embutido e Custo / Igor de Freitas Barletta. -- 2022.

99 f. : il.

Orientador: Pedro Kopschitz Xavier Bastos

Coorientador: Alexandre Abrahão Cury

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.

1. Materiais de construção. 2. Construção sustentável. 3. CO2 embutido. 4. Custos de edificações. I. Bastos, Pedro Kopschitz Xavier, orient. II. Cury, Alexandre Abrahão, coorient. III. Título.

Igor de Freitas Barletta

SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA EDIFICAÇÕES - PROPOSTA DE MÉTODO DE ESCOLHA BASEADO NOS QUESITOS CO₂ EMBUTIDO E CUSTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em 06 de abril de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Kopschitz Xavier Bastos - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Alexandre Abrahão Cury - Coorientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Afonso Celso de Castro Lemonge

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Angelo Just da Costa e Silva

Universidade de Pernambuco

Juiz de Fora, 14/03/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Kopschitz Xavier Bastos, Professor(a)**, em 07/04/2022, às 13:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Abrahao Cury, Professor(a)**, em 07/04/2022, às 14:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Documento assinado eletronicamente por **Afonso Celso de Castro Lemonge, Professor(a)**, em 07/04/2022, às 14:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do



[Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.](#)



Documento assinado eletronicamente por **Angelo Just da Costa e Silva, Usuário Externo**, em 10/05/2022, às 15:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.](#)



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **0709488** e o código CRC **98102042**.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em primeiro lugar a Deus pela proteção durante esse caminho.

À minha mãe Rita e ao meu pai William pelos conselhos, torcida e suporte incondicional.

Ao meu irmão Victor, que me motivou a iniciar o curso de engenharia e o mestrado, pela paciência, apoio, conselhos e parceria na vida acadêmica e profissional.

À minha avó Nice, que mesmo não se encontrando mais presente, permanece sempre presente em memória.

Aos companheiros de trabalho e amigos Cleiton, Eder e Ana, da AVEC Engenharia | Arquitetura, pelos momentos de descontração e risadas, além do apoio.

À minha namorada Nivalda por todo o suporte e motivação, sempre me incentivando e acreditando no meu potencial.

Ao meu orientador, professor Pedro Kopschitz, e ao meu coorientador, professor Alexandre Cury, pela oportunidade de trabalharmos juntos, disponibilidade, paciência, orientação e sugestões, possibilitando a execução deste trabalho.

RESUMO

As emissões de gases do efeito estufa (GEE) causadas por fatores antropogênicos vêm aumentando desde a época da Revolução Industrial, causando impactos ambientais notáveis e prejudiciais ao meio ambiente. Inserida nesse contexto de degradação ambiental, a indústria da construção civil caracteriza-se por utilizar métodos tradicionais e é responsável pelo consumo excessivo de matérias-primas, recursos energéticos não renováveis e produção de resíduos, fazendo com que o setor seja responsável por uma parcela considerável deste problema global contemporâneo. O setor de construção civil possui relevância na economia brasileira e merece atenção quanto ao potencial de melhorias no campo da sustentabilidade. A etapa de projeto dos empreendimentos é aquela que agrega maiores chances de se tomar decisões corretas que afetam toda a vida útil dos edifícios. Diferentes soluções construtivas se apresentam para uma mesma etapa de obra, com pegada ambiental e custo distintos. O presente trabalho apresenta uma metodologia para auxiliar o processo de escolha de materiais e soluções construtivas, levando-se em consideração o aspecto ambiental, através da quantificação de CO₂ embutido, e a viabilidade econômica, através do cálculo de custos. Para tanto, utiliza-se uma planilha eletrônica que compara materiais utilizados em seis etapas construtivas - parede, piso, cobertura, portas, janelas e estrutura – acrescida de uma nova funcionalidade, o aspecto financeiro. A metodologia atribui pesos aos quesitos meio ambiente e custo, a fim de criar cenários com pontuações que possam atender aos desejos ou necessidades dos projetistas. Os resultados obtidos em um estudo de caso mostraram a metodologia em prática e, para o projeto escolhido, o cenário de equilíbrio entre os quesitos se mostrou o mais aplicável, uma vez que as trocas de soluções com mais privilégio para o meio ambiente representaram aumento de custo proporcionalmente grande. A introdução do fator custo na planilha eletrônica de cálculo usada no trabalho representou um avanço na ferramenta computacional desenvolvida na Faculdade de Engenharia da UFJF.

Palavras-chave: Materiais de construção, construção sustentável, CO₂ embutido, custos de edificações.

ABSTRACT

Greenhouse gas (GHG) emissions caused by anthropogenic factors have been increasing since the time of the Industrial Revolution, causing remarkable and harmful environmental impacts. Inserted in this context of environmental degradation, the construction industry is characterized by using traditional methods and is responsible for the excessive consumption of raw materials, non-renewable energy resources and waste production, making the sector responsible for a considerable portion of this contemporary global problem. The civil construction sector has relevance in the Brazilian economy and deserves attention regarding the potential for improvements in sustainability. The construction design stage is the one that adds the greatest chances of making correct decisions that affect the entire useful life of the buildings. Different constructive solutions are presented for the same stage of work, with different environmental footprint and cost. The present work presents a methodology to help the process of choosing materials and constructive solutions, taking into account the environmental aspect, through the quantification of embodied CO₂, and the economic viability, through the calculation of costs. For this, an electronic spreadsheet is used that compares materials used in six constructive stages - wall, floor, roof, doors, windows and structure - plus a new functionality, the financial aspect. The methodology assigns weights to the environmental and cost aspects, in order to create scenarios with scores that can meet the wishes or needs of the designers. The results obtained in a case study showed the methodology in practice and, for the chosen project, the scenario of balance between the requirements proved to be the most applicable, since the exchange of solutions with more privilege for the environment represented an increase in proportionally large cost. The introduction of the cost factor in the spreadsheet used in the work represented an advance in the computational tool developed at the Faculty of Engineering of the UFJF.

Keywords: Building materials, sustainable construction, embodied CO₂, building costs.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – a) Variação da temperatura global combinada das superfícies terrestre e oceânica (as cores indicam diferentes conjuntos de dados); b) emissões antropogênicas de CO ₂ | 10 |
| Figura 2 – Emissão de gases do efeito estufa (GEE) por setor..... | 11 |
| Figura 3 – Número de artigos que mencionam “ACV” e “edifícios” obtidos através da plataforma Scopus. | 23 |
| Figura 4 – Estrutura da avaliação de ACV. | 24 |
| Figura 5 – Fronteiras de estudo de uma ACV. | 26 |
| Figura 6 – Etapas do ciclo de vida das edificações. | 28 |
| Figura 7 – Efeito da manutenção no desempenho ao longo do tempo. | 30 |
| Figura 8 – Desempenho e custos ao longo do tempo. | 33 |
| Figura 9 – Potencial de redução do CCV por etapa do ciclo de vida. | 38 |
| Figura 10 – Etapas de análise de custos durante o ciclo de vida. | 39 |
| Figura 11 – Etapas do trabalho. | 44 |
| Figura 12 - Cenários propostos no estudo. | 52 |
| Figura 13 – Planta baixa pavimento tipo do edifício..... | 56 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1 – Emissões de GEE por setor. | 14 |
| Gráfico 2 – Coleta de RCC no Brasil. | 17 |
| Gráfico 3 – Produção de cimento no mundo. | 19 |
| Gráfico 4 – Resultado comparativo – CO ₂ embutido total por edificação. | 60 |
| Gráfico 5 – Participação percentual por partes dos edifícios. | 61 |
| Gráfico 6 – Quantidade de CO ₂ embutido, por m ² de área construída, por ano, das cinco edificações estudadas..... | 62 |
| Gráfico 7 – Custo total por edificação e por etapa construtiva das edificações analisadas..... | 63 |
| Gráfico 8 – Participação percentual de custo por partes dos edifícios. | 64 |
| Gráfico 9 – Resultado comparativo para custo..... | 64 |
| Gráfico 10 – Resultado comparativo de CO ₂ embutido total e custo total das edificações estudadas..... | 65 |
| Gráfico 11 – Quantidades totais de emissões e custo total de uma obra, considerando as melhores soluções para cada cenário de pesos estudado. | 73 |
| Gráfico 12 – Tendência decrescente de custos e aumento de CO ₂ embutido..... | 74 |
| Gráfico 13 – Evolução percentual de custos e CO _{2emb} de acordo com a mudança de cenários (referência cenário 0/100)..... | 75 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Entradas e saídas durante o ciclo de vida de um edifício. | 28 |
| Tabela 2 – Valores de CO ₂ embutido de materiais de construção..... | 31 |
| Tabela 3 – Valores de CO ₂ embutido de materiais de construção..... | 36 |
| Tabela 4 – Possibilidade de serviços por etapa construtiva..... | 45 |
| Tabela 5 – Escolha dos materiais e espessura para um tipo de parede..... | 46 |
| Tabela 6 – Tabela representativa da tela inicial da planilha eletrônica CasaCO..... | 46 |
| Tabela 7 – Exemplo de cálculo de CO ₂ para alvenaria de blocos cerâmicos..... | 48 |
| Tabela 8 – Vida útil de projeto de cada serviço. | 49 |
| Tabela 9 – Exemplo de cálculo de notas para CO ₂ e custo de duas partes de uma edificação - paredes e pisos. | 52 |
| Tabela 10 – Exemplo de cálculo da média ponderada das notas para CO ₂ e custo de duas partes de uma edificação, de acordo com os cenários de pesos. | 53 |
| Tabela 11 – Exemplo de tabela com somatórios de CO ₂ e de custo para várias partes da obra, considerando as melhores soluções de cada cenário. | 54 |
| Tabela 12 – Resumo de quantidades totais de CO ₂ e custo total de uma obra, considerando as melhores soluções para cada cenário de pesos estudado. | 55 |
| Tabela 13 – Configurações das Edificações para o Estudo de Caso. | 58 |
| Tabela 14 – Notas para CO ₂ embutido e custo de paredes sem revestimento cerâmico. | 66 |
| Tabela 15 – Média ponderada das notas para CO ₂ embutido e custo de paredes sem revestimento cerâmico..... | 66 |
| Tabela 16 – Notas para CO ₂ embutido e custo de paredes com revestimento cerâmico..... | 67 |
| Tabela 17 – Média ponderada das notas para CO ₂ embutido e custo de paredes com revestimento cerâmico. | 67 |
| Tabela 18 – Notas para CO ₂ embutido e custo de pisos..... | 68 |
| Tabela 19 – Média ponderada das notas para CO ₂ embutido e custo de pisos..... | 68 |
| Tabela 20 – Notas para CO ₂ embutido e custo de materiais para cobertura. | 68 |
| Tabela 21 – Média ponderada das notas para CO ₂ embutido e custo de materiais para cobertura. | 69 |
| Tabela 22 – Notas para CO ₂ embutido e custo de materiais para portas..... | 69 |
| Tabela 23 – Média ponderada das notas para CO ₂ embutido e custo de materiais para portas. | 70 |
| Tabela 24 – Notas para CO ₂ embutido e custo de materiais para janelas. | 70 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 25 – Média ponderada das notas para CO ₂ embutido e custo de janelas..... | 71 |
| Tabela 26 – Quantitativo da estimativa estrutural. | 71 |
| Tabela 27 – Valores totais de CO ₂ embutido e de custo para todas as etapas construtivas, considerando as melhores soluções de cada cenário. | 72 |
| Tabela 28 – Resumo de quantidades totais de CO ₂ embutido e custo total da construção estudada, considerando as melhores soluções para cada cenário de pesos adotado..... | 73 |

SUMÁRIO

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO | 10 |
| 1.2 OBJETIVO | 12 |
| 1.3 JUSTIFICATIVA | 13 |
| 2. IMPACTOS AMBIENTAIS DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL..... | 16 |
| 2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) | 16 |
| 2.2 CONSUMO DE ÁGUA..... | 18 |
| 2.3 CIMENTO | 18 |
| 2.4 AÇO..... | 20 |
| 2.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO | 21 |
| 3. CICLO DE VIDA DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO E DOS EDIFÍCIOS ... | 22 |
| 3.1 HISTÓRICO | 22 |
| 3.2 MATERIAIS – FRONTEIRAS DE ESTUDO..... | 25 |
| 3.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DOS MATERIAIS E DOS EDIFÍCIOS DE ACORDO COM AS FASES DO CICLO DE VIDA..... | 26 |
| 3.4 VIDA ÚTIL DOS MATERIAIS..... | 29 |
| 3.4.1 Conceitos relacionados à vida útil..... | 29 |
| 3.4.2 Vida útil e a escolha de materiais | 32 |
| 4. DIÓXIDO DE CARBONO EMBUTIDO NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO | 34 |
| 5. ASPECTO ECONÔMICO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS..... | 37 |
| 5.1 CUSTOS E O CICLO DE VIDA | 37 |
| 5.2 CÁLCULO DO VALOR PRESENTE | 39 |
| 5.3 ANÁLISE INTEGRADA DE FATORES ECONÔMICOS E AMBIENTAIS | 40 |
| 5.4 ORÇAMENTO DE OBRAS | 42 |
| 6. METODOLOGIA..... | 44 |
| 6.1 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO | 44 |
| 6.2 PLANILHA ELETRÔNICA “CASACO”..... | 44 |
| 6.3 QUANTIDADE DE CO ₂ EMBUTIDO..... | 47 |
| 6.4 CUSTO DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS | 49 |
| 6.5 PROPOSTA DE CRITÉRIO DE ESCOLHA DOS MATERIAIS..... | 50 |
| 7. APLICAÇÃO DO MÉTODO – ESTUDO DE CASO..... | 56 |
| 8. RESULTADOS E ANÁLISE..... | 60 |

| | | |
|-----------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 8.1 | RESULTADOS DOS CENÁRIOS PROPOSTOS..... | 65 |
| 8.2 | Limitações do estudo | 76 |
| 9. | CONCLUSÃO..... | 77 |
| | REFERÊNCIAS | 79 |
| | ANEXO A – CO₂ EMBUTIDO POR SERVIÇO..... | 86 |
| | ANEXO B – COMPOSIÇÃO UNITÁRIA DE CUSTO POR SERVIÇO..... | 92 |

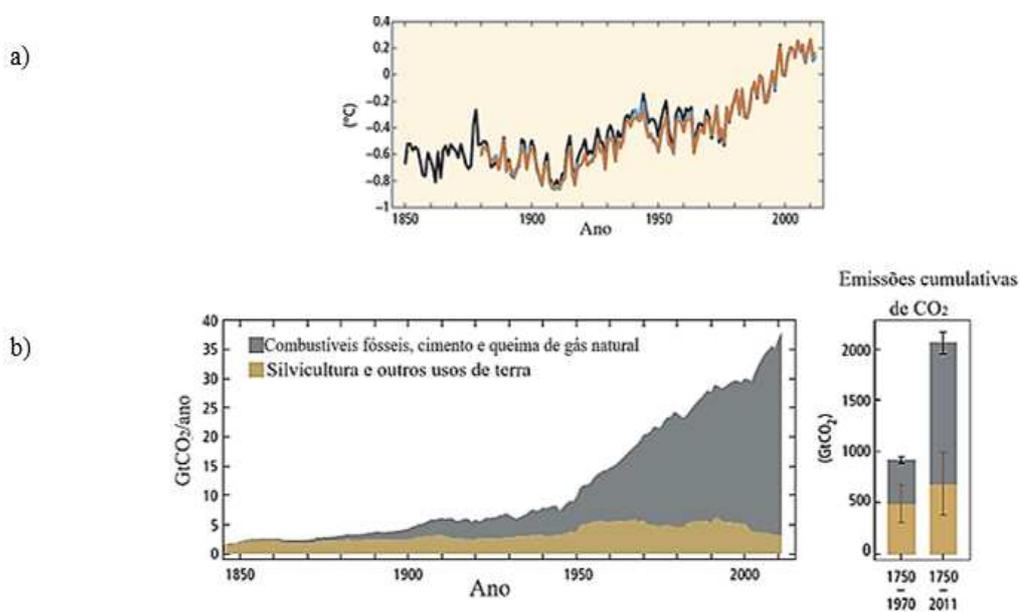
1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As indústrias pertencentes ao cenário da Revolução Industrial, a partir da segunda metade do século XVIII, se desenvolveram de forma muito acelerada e desordenada sob os aspectos trabalhista, de segurança, organizacionais e tecnológicos, originando problemas sistêmicos que perduram até os dias de hoje, muitos deles de cunho ambiental. As emissões de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera vêm aumentando desde aquela época, agravadas, em grande parte, pela globalização, desenvolvimento econômico e crescimento populacional, atingindo atualmente valores históricos.

Os efeitos causados no clima pela emissão desses gases, aliados a outros fatores antropogênicos, vêm sendo detectados através de aumentos de temperatura, elevação de nível dos oceanos e pela quantificação da própria quantidade de gases na atmosfera. Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), o intervalo entre 1983 e 2012 foi, provavelmente, o mais quente dos últimos 1400 anos no hemisfério norte. A superfície do planeta apresentou temperaturas mais quentes em cada uma das últimas três décadas quando comparada com qualquer década desde 1850. A Figura 1 apresenta a variação da temperatura combinada das superfícies terrestre e oceânica, em média global, e as emissões globais antropogênicas de CO₂ no período citado (IPCC, 2014).

Figura 1 – a) Variação da temperatura global combinada das superfícies terrestre e oceânica (as cores indicam diferentes conjuntos de dados); b) emissões antropogênicas de CO₂.

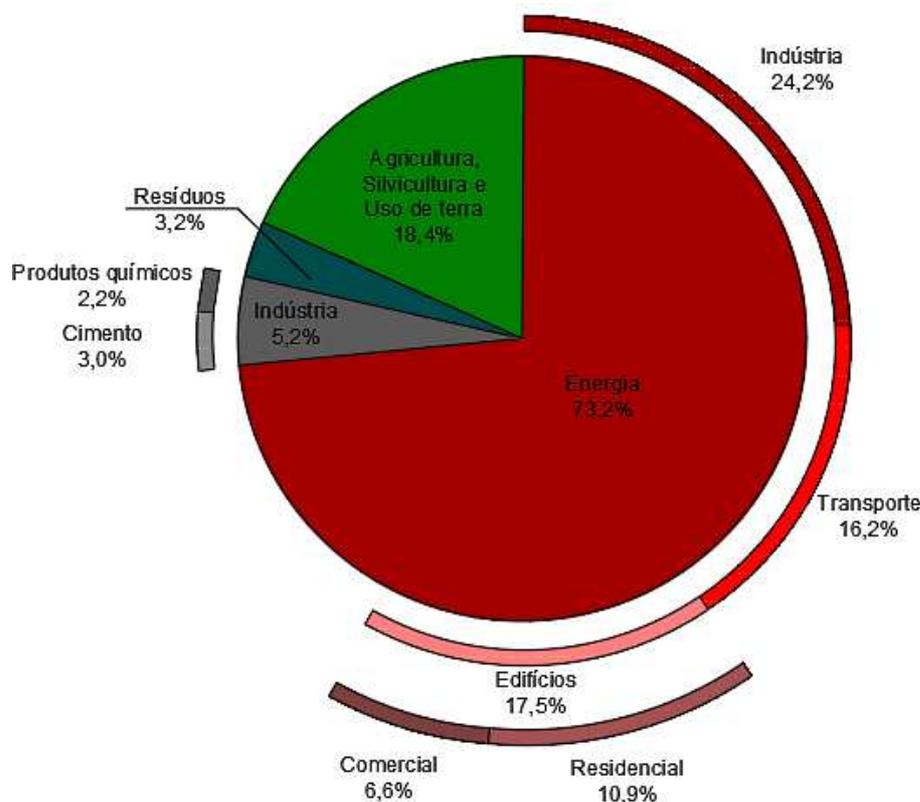


Fonte: Adaptado de IPCC (2014).

Inserida no contexto de mudanças climáticas, a indústria da construção civil é caracterizada, em muitos países, por utilizar métodos tradicionais e mão-de-obra pouco qualificada. Como consequência, alguns traços marcantes e prejudiciais ao ambiente, provenientes desse setor, podem ser identificados, como: desperdício de água e de materiais, emissão de partículas sólidas no ar, expressivo consumo de matérias-primas e de recursos energéticos (renováveis e não renováveis) e geração de grande volume de resíduos, fazendo com que o setor seja responsável por uma parcela considerável da emissão de gases do efeito estufa, direta ou indiretamente (MATEUS, 2004).

No mundo, as emissões totais atingiram, no ano de 2016, o valor de 49,4 GtCO_{2eq} (RITCHIE, 2020). A Figura 2 apresenta o percentual de emissões por setor com base em informações fornecidas pela ferramenta online “Climate Watch” e pela organização não governamental “World Resources Institute”. O setor de construção civil está inserido em vários aspectos apresentados na presente figura, seja no próprio consumo de energia por edifícios, seja na energia destinada a atividades industriais e manufatura dos insumos necessários a construção, além da produção do cimento.

Figura 2 – Emissão de gases do efeito estufa (GEE) por setor.



Fonte: Adaptado de Ritchie (2020).

No aspecto financeiro, a construção civil possui participação relevante na economia mundial, contribuindo, em média, com 5% a 9% do Produto Interno Bruto (PIB) dos países em desenvolvimento e empregando aproximadamente 220 milhões de pessoas (ILO, 2019). No Brasil, o setor é responsável por gerar mais de 12,5 milhões de postos de trabalho diretos, indiretos e informais, movimentando 6,2% do PIB nacional (CBIC, 2018) e contava, em 2018, com 124,5 mil empresas ativas, ocupando 1,9 milhão de pessoas (IBGE, 2020).

O conjunto atual das principais características do setor de construção civil gera conflitos com objetivos contemporâneos de se alcançar o desenvolvimento sustentável, baseados no equilíbrio dos pilares econômico, ambiental e social, em que as necessidades de consumo da geração atual sejam satisfeitas, sem comprometer o atendimento às necessidades das gerações futuras (MATEUS e BRAGANÇA, 2004). No entanto, ainda que fortemente movido por metas financeiras, que formam verdadeiras barreiras para transformações, a multiplicidade de subsectores, a diversidade dos agentes envolvidos e o vigor tradicional da construção civil, ao mesmo tempo aberta a novas tecnologias, permitem observar que há amplo espaço para mudanças que promovam a mitigação de impactos ambientais.

Com o intuito de se executar uma análise que aborde a sustentabilidade de forma mais extensiva, além dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos empreendimentos, a escolha de materiais e soluções construtivas também deve abarcar os custos financeiros - para que um material seja visto como uma alternativa sustentável deve apresentar, também, viabilidade econômica (BRUGNERA, 2018). Essa análise pode ser feita por meio de cálculos cujos resultados permitam comparações de soluções construtivas de acordo com um ou mais requisitos. Coloca-se, portanto, um desafio para pesquisas na área, dada a escassez de metodologias neste tema, agravada, em grande parte, pela inexistência de uma base de dados organizada sobre materiais de construção no país.

1.2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de otimização de aspectos ambientais e de custo da construção de edifícios ao longo do seu ciclo de vida, a fim de propor uma metodologia para as melhores escolhas de materiais e soluções construtivas na fase de projeto de empreendimentos. O impacto ambiental estudado será a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) embutido nos materiais de construção. O estudo será baseado no aprimoramento de uma ferramenta computacional de cálculo de CO₂ embutido, incluindo-se a quantificação de custos.

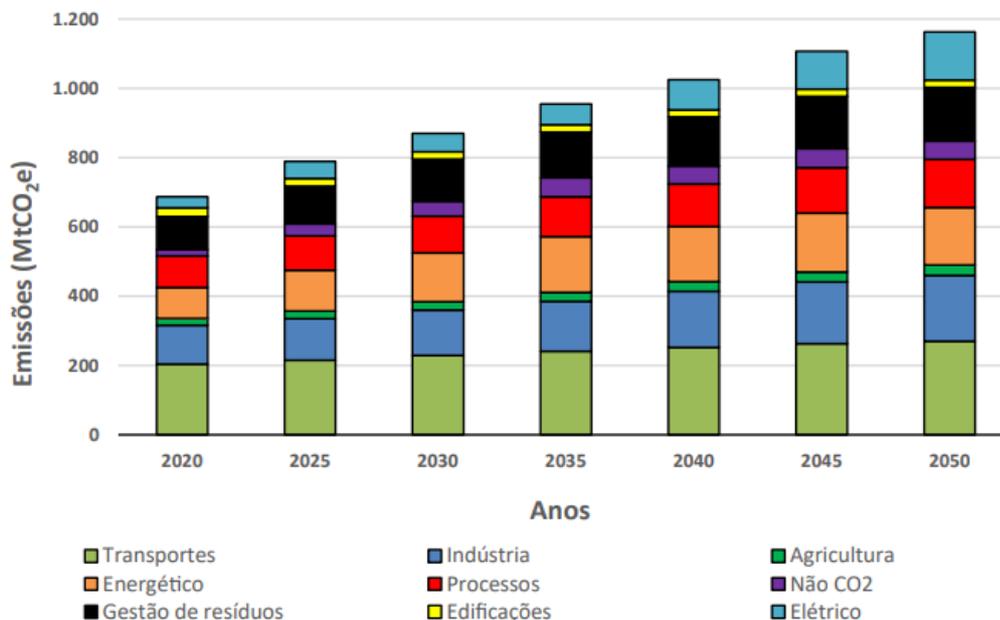
Como objetivo secundário propõe-se a comparação entre diferentes soluções construtivas em um estudo de caso - um edifício de médio porte - variando os materiais empregados na construção.

1.3 JUSTIFICATIVA

A busca por soluções sustentáveis a custos acessíveis na construção de edificações é premente, visto que as mudanças climáticas trazem, nos tempos atuais, transtornos diversos para as populações das mais diversas regiões do planeta, através de eventos extremos como inundações, secas, queimadas, calor e frio intensos e subida do nível dos oceanos. A conhecida expressão “pensar globalmente, agir localmente”, bastante adotada mundialmente para desenhar estratégias na área ambiental, poderia muito bem ser transcrita para agir por setores. Os produtos da construção civil - prédios, pontes, estradas e outros - são muito grandes e caros e, ao mesmo tempo, representam boa parte das emissões de GEE. A fim de se conseguir a neutralidade de emissões até 2050, a Agência Internacional de Energia (AIE) estima que as emissões diretas de CO₂ dos edifícios precisam cair 50% até 2030 assim como as emissões indiretas do setor de construção devem sofrer redução de 60% (UN, 2021). Percebe-se, portanto, que há não somente grandes metas dos países, mas que é preciso explorar o potencial de cada setor neste sentido.

O setor de construção possui um grande potencial de mitigação de emissões de GEE. Em um estudo realizado pelo IPCC (2007), foi constatado que se trata de um setor com grande potencial de redução de emissões, podendo alcançar uma redução mundial de emissões da ordem de 6 GtCO_{2eq} (IPCC, 2007 apud UNEP-SBCI, 2010). No Brasil, segundo dados do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, apenas os edifícios serão responsáveis por emissões associadas ao uso de energia em valores entre 21 e 25 MtCO_{2eq} por ano, entre os anos de 2020 e 2050, considerando apenas a parcela proveniente de combustíveis fósseis. Além disso, setores ligados à construção civil, como indústria e transportes, apresentarão emissões percentualmente relevantes (BRASIL, 2017). O Gráfico 1 apresenta a projeção de emissões totais do sistema energético por setor até o ano de 2050, considerando exclusivamente o uso de combustíveis fósseis.

Gráfico 1 – Emissões de GEE por setor.



Fonte: Brasil (2017).

Segundo Torgal e Jalali (2010), estudos desenvolvidos nas últimas décadas revelaram uma tendência mundial indicativa de que a fase operacional do ciclo de vida de um edifício é responsável pela maior parcela de consumo de energia ao longo de sua vida útil. Como consequência, ocorreram evoluções tecnológicas que melhoraram a eficiência energética durante a fase de uso, seja através da modernização dos aparelhos utilizados, seja em materiais construtivos com propriedades térmicas mais adequadas. Como resultado, à medida que o consumo energético operacional é reduzido, a parcela referente à energia incorporada nos materiais se torna, proporcionalmente, cada vez mais relevante, justificando maior investimento em estudos sobre impactos da fase de construção e escolha dos materiais.

Nota-se, também, que cresce a demanda por informações da área ambiental na tomada de decisão para a escolha dos materiais de construção. Em pesquisa realizada pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), foi observado que uma das maiores demandas entre profissionais da área é por bancos de dados de análise de ciclo de vida de produtos que contenham informações sobre sustentabilidade (CBCS, 2014).

O mercado da construção civil, tradicionalmente, sempre foi regido por metas financeiras e, sendo assim, há clara necessidade de mais empenho em dar luz aos aspectos ambientais por parte de projetistas e construtores. As especificações de materiais, no entanto, podem ser mais vantajosas para um determinado aspecto em um momento e se inverterm em outro. Trata-se, portanto, de um processo de escolha com critérios de certa forma conhecidos,

mas nem sempre analisados conjuntamente. O presente trabalho, ao abordar esse processo de escolhas, justifica-se no sentido de que não só é escassa a literatura sobre o tema, como também são escassos este tipo de abordagem no setor e ferramentas computacionais de auxílio aos cálculos envolvidos.

2. IMPACTOS AMBIENTAIS DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Segundo dados do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), a pegada ambiental do setor de construção corresponde a 40% do uso de energia mundial, 30% do uso de matérias-primas, 25% da geração de resíduos sólidos e do uso de água e 12% do uso da terra. O setor é responsável também por mais de um terço do total das emissões de gases do efeito estufa (UNEP-SBCI, 2010).

A emissão global total de gases do efeito estufa do setor de construção civil atingiu seu nível mais alto em 2019. A parcela relacionada à energia para operação e construção do setor de edifícios foi de 9,95 GtCO₂ emitidas. Este valor, juntamente com aqueles ligados a fabricação, transporte e uso de materiais de construção, resulta em um total de 38% das emissões globais relacionadas à energia e 35% do uso global de energia, totalizando, em valores absolutos, aproximadamente 13,5 GtCO₂ (IEA, 2020 *apud* UNEP, 2020).

No Brasil, as emissões de origem antrópica relacionadas à nossa matriz energética vigente em 2019 - com caráter mais renovável quando comparada com o resto do mundo - atingiram 419,9 MtCO_{2eq}, sendo que 4,4% (18,6 MtCO_{2eq}) deste valor é associado às emissões residenciais e 18,0% (75,8 MtCO_{2eq}) às industriais (EPE, 2020).

Além das emissões de CO₂, o setor de construção civil no Brasil também se destaca pelo uso de energia. O indicador de intensidade energética do setor industrial brasileiro, que mede o consumo de energia, demonstra a relevância de alguns segmentos associados à indústria da construção civil, entre eles o de metalurgia, no qual incluem-se ferro-gusa e aço, e o de não metálicos, que inclui cimento e cerâmica (EPE, 2020). Tratando-se especificamente do uso em edificações, somente as residências consumiram 10,8% da energia produzida no Brasil em 2020. Deste total, praticamente a metade (46,4%) foi de energia elétrica (EPE, 2021).

Algumas das principais ações e materiais provenientes do setor de construção que impactam o meio ambiente estão abordados a seguir, sendo: geração de resíduos, consumo de água e emissões provenientes da fabricação de cimento e aço.

2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)

Apesar de iniciativas de reúso e reciclagem de materiais, que mitigam efeitos ambientais e introduzem o conceito de economia circular para produtos que antes tinham como destino a disposição final, o setor de construção continua tendo como uma das principais características a grande produção de resíduos. Os chamados resíduos de construção civil (RCC) são definidos

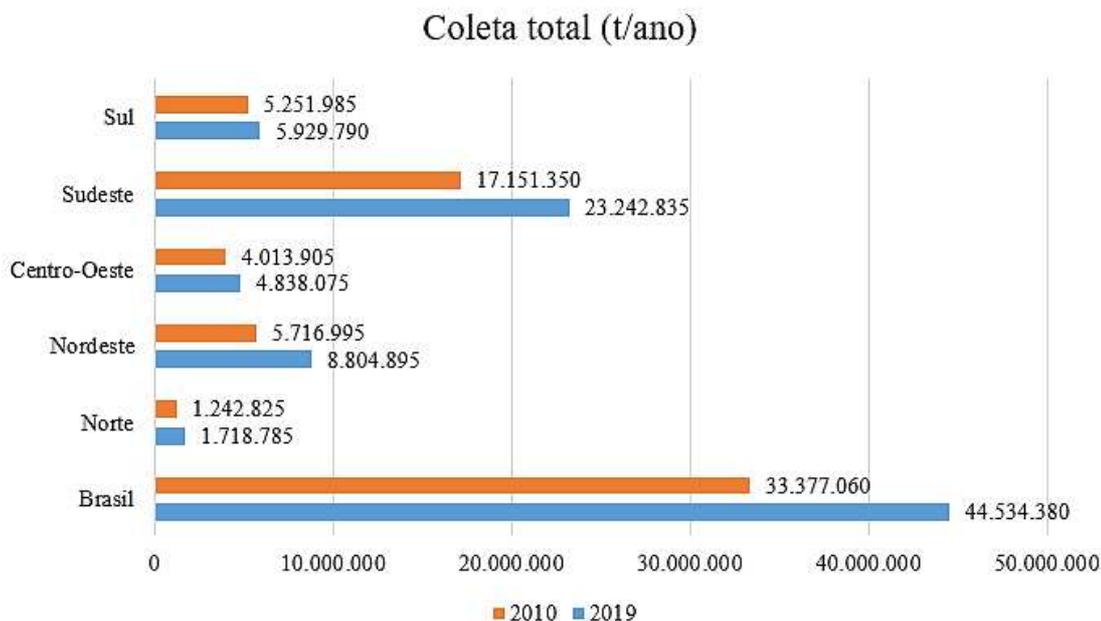
pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) como resíduos “provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos (...)” (CONAMA, 2002).

De uma forma geral, resíduos de construção civil representam entre 10% e 30% dos materiais que chegam em aterros sanitários no mundo (AGAMUTHU, 2009). Em 2018, os Estados Unidos produziram 600 milhões de toneladas de RCC, incluindo aço, madeira, *drywall* e gesso, tijolo e telha cerâmica, concreto e materiais asfálticos (EPA, 2020). Na China, estimou-se a produção de 1,13 bilhão de toneladas de RCC no ano de 2014, descontando resíduos provenientes de reformas. Nesse país, a maior parcela de resíduos foi proveniente de demolições, alcançando o percentual estimado de 35% (LU, 2014).

No Brasil, dados provenientes do SINDUSCON-SP (2012) revelam que a origem deste resíduo é difusa, com uma grande parcela originária do pequeno gerador (aproximadamente 70%) e o restante originário da construção formal ou grandes empresas.

Dados obtidos pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) indicam um aumento da ordem de um terço no RCC total coletado pelos municípios brasileiros na última década, superando o valor de 44 milhões de toneladas por ano (ABRELPE, 2020). O Gráfico 2 indica os valores totais de resíduos de construção civil computados pelos municípios brasileiros nos anos de 2010 e 2019.

Gráfico 2 – Coleta de RCC no Brasil.



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2020).

2.2 CONSUMO DE ÁGUA

A água disponível para uso não está presente de maneira uniforme na Terra e tem se tornado um recurso cada vez mais escasso devido à poluição, desperdício, mudanças climáticas e alto consumo.

O setor de construção civil demanda grande quantidade desse recurso. O consumo de água está presente em várias fases do ciclo de vida de inúmeros materiais, como na extração de matéria-prima, produção, manufatura dos produtos, instalação e em diversas atividades dos canteiros de obras. Dessa forma, faz sentido proceder uma análise em termos de consumo de água ao longo da cadeia produtiva, com o intuito de se quantificar também a água “embutida” nos materiais e serviços de construção (MCCORMACK *et al.*, 2007).

Em um estudo de caso para edifícios chineses, foi constatado um consumo de água da ordem de 26,5m³ por m² construído (HAN *et al.*, 2015). Além disso, Han *et al.* (2015) também verificaram que o consumo de água da cadeia produtiva foi 24 vezes maior que o consumo de água no local da obra, com grande parcela relacionada aos seguintes materiais: cimento, aço, cal e produtos metálicos.

Bardhan (2011) constatou em seu estudo para construções típicas na Índia, o valor de 92% para a água embutida nos principais materiais de construção utilizados e um consumo total de 27,60 m³/m². Marques, Gomes e Brandli (2017) realizaram um estudo de acompanhamento do consumo de água em seis obras no Rio Grande do Sul, a análise foi referente a etapa de execução da obra, sem considerar a água embutida nos materiais, chegando-se a valores que variaram entre 0,02 m³/m² e 0,28 m³/m².

Tais valores destacam a importância de se analisar o consumo de água no canteiro de obra, mas também ao longo de todo o ciclo, com o intuito de se diminuir o consumo de água na construção civil e mapear seus principais pontos de utilização.

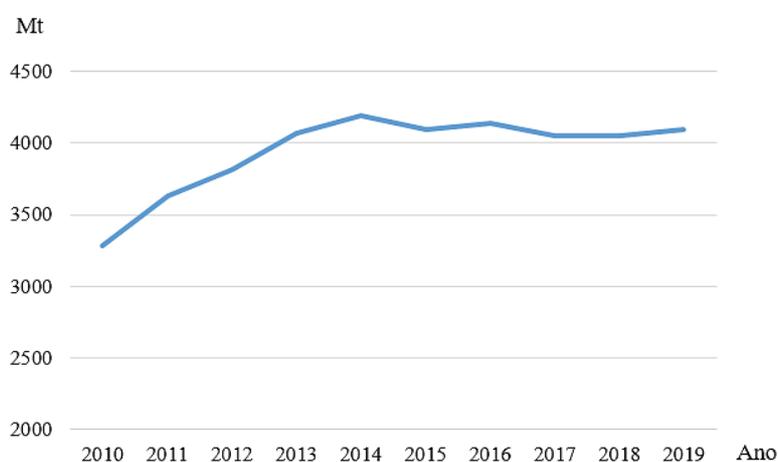
2.3 CIMENTO

O cimento é um dos principais materiais de construção civil. Devido a características do processo produtivo e da utilização em larga escala, os impactos ambientais causados por esse produto são extremamente importantes. A fabricação desse material envolve etapas de extração de matéria-prima e transporte, uso de eletricidade e energia (calor) para se obter o clínquer. Na etapa de calcinação - decomposição térmica da rocha calcária - se dá a maior parte das emissões de CO₂ na atmosfera. Devido às características intrínsecas ao processo de produção do cimento,

o impacto ambiental do produto final é grande, destacando o nível de emissão de GEE e possibilidade de contaminação do solo, água e ar, devido a granulometria do material (MAURY e BLUMENSCHNEIN, 2012).

A produção total de cimento no mundo atingiu, segundo estimativas, 4,1 bilhões de toneladas no ano de 2019, mantendo-se estável em valores superiores a 4 bilhões de toneladas desde 2013. A China desponta como principal produtor, superando 50% do total produzido no mundo, totalizando 2,3 bilhões de toneladas. Índia e Estados Unidos também possuem destaque, tendo produzido, respectivamente, 7,8% e 2,2% (IEA, 2020). O Gráfico 3 apresenta a produção de cimento no mundo, em bilhões de toneladas, entre os anos de 2010 e 2019.

Gráfico 3 – Produção de cimento no mundo.



Fonte: Adaptado de IEA (2020).

O Brasil possui uma capacidade de produção de até 100 milhões de toneladas de cimento por ano e se destaca na produção mundial por possuir a menor emissão de CO₂ por tonelada de cimento. Entre a década de 1990 e 2014 a produção aumentou 276%, porém as emissões foram reduzidas de 700 kgCO₂/ton de cimento para 572 kgCO₂/ton de cimento, representando uma redução de 18% das emissões. Entre os principais fatores que contribuíram para se alcançar essa marca, pode-se citar o aumento das adições de subprodutos (escória de alto-forno, cinza volante, pozolanas) ao clínquer, chegando a até 33% de substituição do clínquer, ao aumento de eficiência energética dos processos de produção e a substituição gradual de fontes de energia fósseis por alternativas menos poluentes (CNI, 2018).

A Europa possui uma meta estabelecida pela Associação de Cimento Europeu (CEMBUREAU) de neutralização de carbono para a indústria de cimento até 2050. Para se reduzir as emissões a esse nível, melhorias de tecnologia são necessárias, porém não são

suficientes. São necessárias mudanças no processo de produção, através da utilização de fontes de energia menos poluentes como a biomassa, políticas de redução de carbono embutido nos edifícios através de estudos de ciclo de vida e ações de captura, uso e armazenamento de carbono (CEMBUREAU, 2020).

No longo prazo, a tendência do consumo de concreto e, conseqüentemente, de cimento, é de aumentar conforme aumenta a capacidade financeira da população. Davidson (2014) revela que o aumento do Produto Interno Bruto (PIB) per capita pode contribuir para o aumento do consumo de cimento em um país, o que é ilustrado pelo exemplo da China, maior produtor de cimento do mundo e PIB crescente. Dessa forma, é necessária atenção especial aos impactos provenientes desse material pelo fato de ser um grande gerador de gases e possuir uma tendência crescente de consumo.

2.4 AÇO

O aço produzido em indústrias siderúrgicas é um produto utilizado em vários setores da economia, principalmente na construção civil, setor automotivo e de bens de capital. Trata-se de um produto de grande versatilidade e eficiência devido a suas propriedades de resistência, durabilidade, elasticidade e maleabilidade, além de ser um produto reciclável (BRONIEWICZ e BRONIEWICZ, 2020).

O Brasil é um grande produtor de aço, ocupando uma posição entre os dez maiores do mundo. O país possui uma capacidade de produção de 48,9 milhões de toneladas de aço bruto por ano e as emissões associadas ao setor computam o valor de 1,74 tCO_{2eq}/t aço bruto, enquanto a média mundial é de 1,88 tCO_{2eq}/t aço bruto (CNI, 2018). No país, o principal consumidor de produtos siderúrgicos é o setor de construção civil, representando uma parcela de 41,2% do consumo total. Entre os produtos consumidos estão o aço para estruturas e acabamentos e a escória, muito utilizada pela indústria de cimento como adição (AÇO BRASIL, 2021).

A indústria siderúrgica apresenta emissões relevantes de GEE, principalmente devido ao grande consumo de matérias primas, como o carvão mineral e o coque. No Brasil, a matriz energética do setor em 2020 foi composta por uma parcela de 70% em queima de carvão mineral e coque e 16% em produtos derivados de petróleo (AÇO BRASIL, 2021). O coque é utilizado durante o processo químico de redução do minério de ferro em ferro gusa no alto-forno, o que posteriormente dará origem ao aço. Paralelamente, durante essa etapa de redução, outros produtos são criados, sendo eles a escória e o gás de alto-forno (CNI, 2017).

Atualmente, já existem soluções para mitigar os impactos desses subprodutos e, com o aumento da relevância de políticas ESG (sigla em inglês para "environmental, social and governance"), utilizadas para medir critérios ambientais, sociais e de governança corporativa, a indústria busca soluções para seus problemas ambientais. A escória de alto-forno é aproveitada pela indústria do cimento como adição, o gás de alto-forno é usado em usinas termelétricas para geração de energia elétrica e a água de resfriamento é reaproveitada no próprio sistema, tendo atingido, em 2020, um índice de recirculação superior a 97%. Em termos energéticos a indústria brasileira foi capaz de suprir 51% da sua demanda de eletricidade no ano de 2020 com autogeração, através do reaproveitamento dos gases em termelétricas e com o uso de usinas hidrelétricas próprias (AÇO BRASIL, 2021).

2.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O cenário exposto revela a importância de se investir em soluções mais sustentáveis para a construção civil, especialmente pelo tamanho do setor, com um volume de atividades entre os mais altos do país. É notório que o Brasil carece de investimentos em infraestrutura e habitação, problemas crônicos. Atualmente, o déficit habitacional é de cerca de 5,8 milhões de moradias (BRASIL, 2021), número que se mantém estável há anos. Assim, a toda e qualquer retomada econômica estará atrelada, pode-se supor, uma gama de impactos ambientais. Tal cenário esteve sujeito a um agravamento extra em 2021, com a maior crise hídrica em 91 anos, de consequências imediatas no setor elétrico, que se vê forçado, pelo baixo nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas, a gerar energia a partir de fontes mais caras e mais poluidoras (G1, 2021). Todo este quadro indica fortemente o uso racional de energia, em primeiro lugar, e investimento em soluções mitigadoras de impactos ambientais nos principais setores da economia, passando, obviamente, pela busca de maior eficiência energética e menor emissão de GEE no setor de construção civil, particularmente nas edificações.

3. CICLO DE VIDA DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO E DOS EDIFÍCIOS

3.1 HISTÓRICO

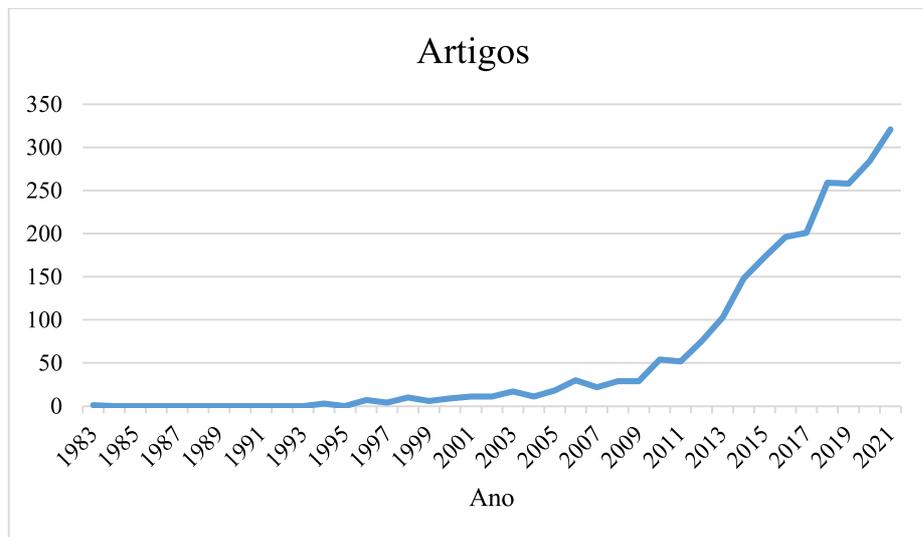
Estudos sobre impactos ambientais de bens de consumo tiveram início nas décadas de 1960 e 1970. Nessa época, buscava-se comparar diferentes alternativas de produtos utilizando-se índices como eficiência energética, uso de matéria-prima, emissão de gases e resíduos gerados. Esses estudos permitiram constatar que, dependendo do produto, a parcela mais significativa dos impactos ambientais não estava relacionada à fase de uso, mas sim a outras etapas do ciclo de vida, o que indicava e deu origem à ideia de avaliação do ciclo de vida (ACV) (GUINÉE *et al*, 2011).

A década de 1980 marcou o início de estudos de ACV no setor da construção civil, porém ainda sem uma metodologia normatizada ou amplamente aceita a ser utilizada. Na década de 1990, a SETAC - *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* reuniu profissionais ligados a estudos de ACV e criou o Código de Práticas SETAC, padronizando e desenvolvendo estrutura, metodologia e terminologias. Posteriormente, a partir de 1994, a *International Organization for Standardization* (ISO) também padronizou os métodos e procedimentos referentes a análise de ciclo de vida, propondo um modelo metodológico geral e que originou a série de normas ISO 14040, com a primeira publicação feita em 1997 (BUYLE, BRAET e AUDENAERT, 2013).

O interesse por estudos de ciclo de vida continuou aumentando no século 21. Seu efeito já podia ser observado em políticas públicas, como na França, onde o estudo de análise de ciclo de vida norteou as certificações da lei *Grenelle 1* para produtos industrializados, em vigor. Na Alemanha, cotas obrigatórias de reuso e reciclagem em processos produtivos são orientadas por políticas que levam em consideração a ACV. Em países como México, Peru e Chile, o uso desse tipo de estudo é obrigatório na legislação de biocombustíveis (IPEA, 2016).

A Figura 3 apresenta o aumento do número de artigos científicos que mencionam os termos “análise de ciclo de vida (ACV)” e “edifícios”, cujos dados foram obtidos através da plataforma Scopus, uma base de dados da Elsevier, que conta com citações e resumos de artigos publicados em revistas e jornais acadêmicos. De 1983 a 2021 foram publicados 2342 artigos que utilizaram tais termos em seus títulos, resumos ou palavras-chave. Constata-se um aumento de publicações que abordam esses tópicos durante o século 21, atingindo um ápice de 321 publicações no ano de 2021.

Figura 3 – Número de artigos que mencionam “ACV” e “edifícios” obtidos através da plataforma Scopus.



Fonte: elaborado pelo autor, a partir de Scopus (2022).

No Brasil, a Análise de Ciclo de Vida foi normatizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da NBR ISO 14040:2009 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura, e da NBR ISO 14044:2009 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. A primeira discorre sobre princípios gerais de uma ACV e o seu escopo. A segunda versa sobre cada tópico do escopo com maiores detalhes, definindo metodologias e pré-requisitos para a execução de uma ACV (BUENO, 2014).

Um estudo de ACV típico aborda aspectos ambientais e impactos ambientais potenciais durante o ciclo de vida de um produto, não incluindo aspectos econômicos ou sociais. Segundo a norma NBR ISO 14040 da ABNT (2009a), “o escopo de uma ACV, incluindo a fronteira do sistema e o nível de detalhamento, depende do objeto e do uso pretendido para o estudo”, podendo, dessa forma, variar muito entre estudos (ABNT, 2009a). Segundo a norma NBR ISO 14040 da ABNT (2009a), um estudo de Análise de Ciclo de Vida deve compreender quatro etapas, a saber:

Fase de **definição de objetivo e escopo**: no objetivo deve-se pontuar a aplicação do estudo, sua justificativa e público-alvo. No escopo deve-se incluir informações como o produto alvo do estudo, suas funções, a unidade funcional e fronteiras do estudo, além de procedimentos, requisitos, pressupostos e limitações (ABNT, 2009a).

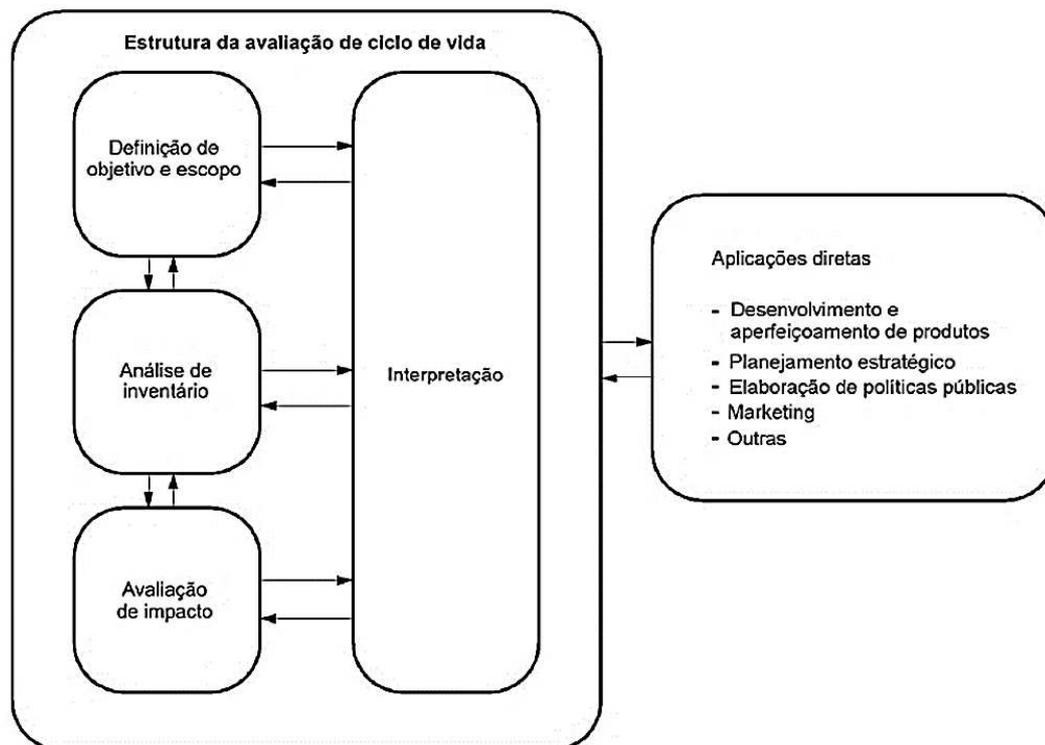
Fase de **análise de inventário do ciclo de vida** (ICV): compreende a coleta de dados e análise de valores do fluxo de entradas e saídas relacionadas a algum produto em função de determinada unidade usada para essa quantificação (ABNT, 2009a).

Fase de **avaliação de impactos do ciclo de vida** (AICV): nessa fase, a partir dos resultados da etapa anterior, se analisa a relevância dos impactos ambientais potenciais, agrupando as diferentes unidades de valores do estudo de ICV em categorias de impacto. Deve apresentar informações relativas à seleção de categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização, correlação dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas e cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (ABNT, 2009b).

Fase de **interpretação**: considera-se os resultados nas fases de ICV e AICV. Com base nesses dados, pode-se formular conclusões e recomendações com base no objetivo e escopo do estudo. Nessa fase também deve-se deixar claro as limitações do estudo (ABNT, 2009a).

A Figura 4 mostra as fases de um estudo de ACV e suas inter-relações.

Figura 4 – Estrutura da avaliação de ACV.



Fonte: ABNT NBR ISO 14040 (2009a).

3.2 MATERIAIS – FRONTEIRAS DE ESTUDO

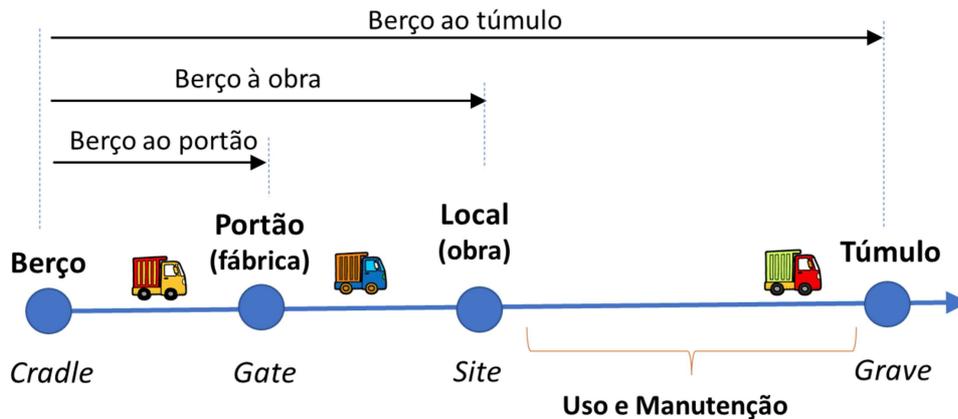
A ACV é um instrumento de gestão ambiental em que se quantificam entradas e saídas de um sistema de produção. Também conhecida como “análise do berço ao túmulo” (*cradle to grave analysis*, em inglês), é essencial que sejam estabelecidos limites ou fronteiras de estudo, para clareza dos dados e para comparações com dados obtidos em estudos análogos. Tais fronteiras podem ser úteis para identificar os pontos mais impactantes para o meio ambiente, além de avaliar o custo e o resultado de eventuais alterações dos processos. Ainda que a norma NBR ISO 14040 da ABNT (2009a) recomende o estudo de todo o ciclo de vida, também é possível estudar apenas uma etapa do sistema, quando existe interesse em otimizar apenas uma parte específica (IPEA, 2016).

A seguir apresenta-se a descrição das etapas entre os pontos usualmente delimitadores dos processos, adotados por diversos autores, que são o berço, o portão da fábrica, o local de aplicação do produto e o túmulo ou fim de vida, com os termos correspondentes em inglês:

- **Berço ao portão** (*cradle to gate*): estudo no qual o limite considerado começa na extração da matéria-prima (berço). Conta-se o transporte e atividades de fabricação até que o produto esteja pronto para sair da porta da fábrica (BRUGNERA, 2018).
- **Berço ao local** (*cradle to site*): limite que adiciona aos valores computados na fronteira anterior (berço ao portão) o impacto referente ao transporte do material até o canteiro de obra ou local desejado (CHRISTOFOROU *et al.*, 2015).
- **Berço ao túmulo** (*cradle to grave*): para essa etapa de estudo, a partir dos resultados obtidos na análise “berço ao local”, são adicionados os impactos referentes à fase de uso do produto e ao fim da sua vida útil. Trata-se da análise desde a extração de matérias-primas, passando pelo uso e manutenção até a disposição final, decidindo-se entre as opções descarte, reúso ou reciclagem (BRUGNERA, 2018).
- **Berço ao berço** (*cradle to cradle*): estudo que introduz a ideia de economia circular, no qual se considera a reutilização do produto ou, ao final da sua vida útil, a reciclagem, eliminando o descarte em aterros (BRUGNERA, 2018).

A Figura 5 ilustra as fronteiras delimitadoras mencionadas de um estudo de ACV.

Figura 5 – Fronteiras de estudo de uma ACV.



Fonte: Autor (2021).

3.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DOS MATERIAIS E DOS EDIFÍCIOS DE ACORDO COM AS FASES DO CICLO DE VIDA

Os expressivos impactos ambientais decorrentes de uma edificação e dos materiais que a compõem fazem com que estudá-los considerando o seu ciclo de vida seja a abordagem mais adequada. Porém, particularidades do setor, como a longa vida útil dos materiais e dos edifícios, tornam a análise bastante complexa (SOARES, SOUZA e PEREIRA, 2006).

A natureza e os processos de produção muito diversificados dos materiais que compõem um edifício também são aspectos que conferem complexidade ao estudo do ciclo de vida no setor. Existem diferentes opções de materiais para uma mesma função, com diferentes composições e características e, conseqüentemente, diferentes valores de pegada ambiental

Um edifício é o produto da montagem de diversos outros produtos, que são os inúmeros materiais e componentes usados na construção. Assim, computar os impactos ambientais do edifício depende não só de conhecer o percurso de cada material até sua chegada à obra, o que corresponde a calcular um impacto “embutido” ou “incorporado” da obra pronta, como de estabelecer um marco a partir do qual começa a contagem dos impactos da edificação propriamente dita. Por exemplo, a partir da ocupação do edifício começam a existir os consumos de energia e de água, além da geração de resíduos e das operações de manutenção.

Os pontos demarcadores das fases do ciclo de vida dos materiais são semelhantes aos da abordagem do item anterior - berço, portão, local, túmulo – considerando uma terminologia específica para o setor: extração da matéria-prima, fábrica, obra e disposição final. Entre cada

um desses pontos consideram-se os transportes necessários entre eles, e antes da disposição final, a possibilidade de reuso ou de reciclagem.

Os impactos das edificações também podem ser associados a etapas do empreendimento, da maneira como o setor está mais acostumado a dividi-las: planejamento, construção, uso/manutenção e demolição/fim de vida. Alguns impactos podem estar relacionados a mais de uma fase do empreendimento, como, por exemplo, o consumo de energia, a emissão de gases, a geração de resíduos e o consumo de água. Outros são diretamente relacionados a uma determinada fase como, por exemplo, poeira, produção de ruídos e vibrações provenientes do canteiro de obras. (ARAÚJO e CARDOSO, 2010).

Na etapa de **planejamento** pode-se analisar as futuras novas demandas criadas, de acordo com o porte do empreendimento, que afetam questões sociais, ambientais e urbanísticas, como aumento de consumo de água, da infraestrutura e do tráfego, assim como o aumento da geração de resíduos sólidos e esgoto durante a fase de ocupação, além do aumento do fluxo de águas superficiais devido à impermeabilização do solo (DIAS, 1999).

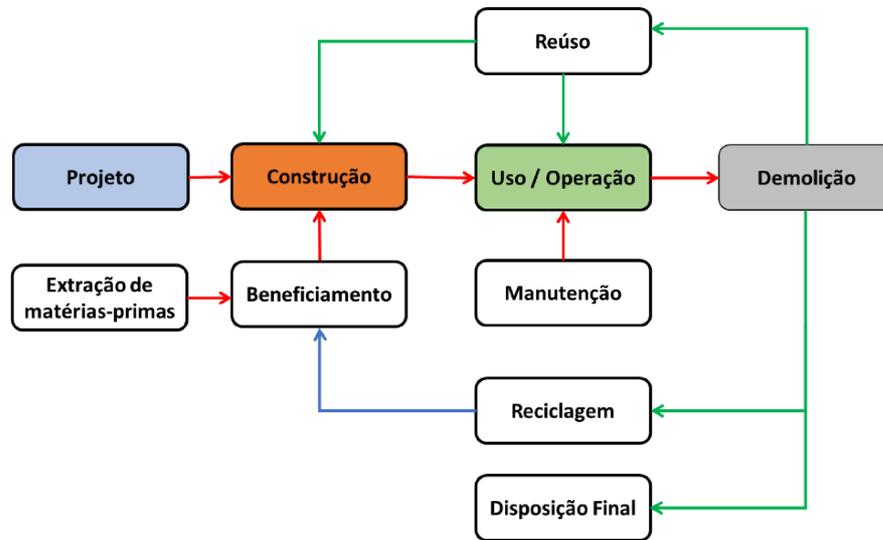
Na etapa de **construção** ocorrem impactos correspondentes à construção da infraestrutura do canteiro de obras e da própria edificação. Alguns destes impactos foram citados por Dias (1999): degradação de fauna e flora, aumento do tráfego e fluxo de veículos, geração de poeira, resíduos e ruídos.

A fase de **uso/manutenção** do edifício é a de maior duração, devido à longa vida útil das construções, e é responsável por uma significativa parcela dos impactos ambientais. Nessa etapa observa-se um grande consumo de energia elétrica, de água e geração de resíduos sólidos específicos, de acordo com a natureza do empreendimento – edifício comercial, residencial e outros.

Por fim, a fase de **demolição**, que representa o fim da vida útil do empreendimento, é aquela em que ocorre maior geração de resíduos sólidos por espaço de tempo. Para que ocorra o desmonte, além dos resíduos gerados deve-se também considerar os impactos relativos à geração de ruídos e poeira (poluição atmosférica por material particulado) e, por fim, analisar como dar destino a todas as classes de resíduos, principalmente aqueles que possam conter substâncias perigosas, como tintas, óleos e graxas, entre outros.

A Figura 6 – Etapas do ciclo de vida das edificações apresenta uma representação gráfica das etapas do ciclo de vida de uma edificação.

Figura 6 – Etapas do ciclo de vida das edificações.



Fonte: Adaptado de Silva (2003).

O principal objetivo de um estudo relacionado ao ciclo de vida de um edifício é auxiliar a tomada de decisões, principalmente na fase de projetos. Para isso, o processo cumpre dois importantes objetivos, o de minimizar a subjetividade e o imprevisto, e o de promover uma visão holística sobre o ciclo (SILVA, 2003). A Tabela 1 – Entradas e saídas durante o ciclo de vida de um edifício. ilustra recursos consumidos e impactos gerados durante as etapas do ciclo de vida de um edifício.

Tabela 1 – Entradas e saídas durante o ciclo de vida de um edifício.

| ETAPA Ciclo de vida | ENTRADAS | SAÍDAS |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Preparação do Terreno (Pré-construção) | Solo, energia Ex: limpeza e movimentação de terra | CO ₂ , poeira, ruído, perda de vegetação, perda de habitats |
| Construção | Energia, água, componentes e materiais | CO ₂ , poeira, ruído, RCC |
| Uso/manutenção | Energia, água e materiais (operação, manutenção e reforma) | CO ₂ , resíduos, esgoto, efeito ambiente interno, efeitos vizinhança |
| Demolição | Energia | CO ₂ , poeira, ruído, RCC |

Fonte: Adaptado de Silva (2003).

3.4 VIDA ÚTIL DOS MATERIAIS

Os primeiros estudos relacionados à durabilidade dos produtos tinham por objetivo determinar o período após o qual deveriam ocorrer intervenções de manutenção e, também, apontar aqueles que possuíam melhor relação custo-benefício, do ponto de vista econômico. Com a introdução do conceito de sustentabilidade, um novo aspecto ganhou importância no estudo de durabilidade, dado que do ponto de vista ambiental é vantajoso buscar materiais que possuam a vida útil prolongada. Quanto mais durável é um bem, menor a quantidade de recursos consumidos em ações de manutenção e substituição, além de menor volume de resíduos gerados (JOHN *et al.*, 2002).

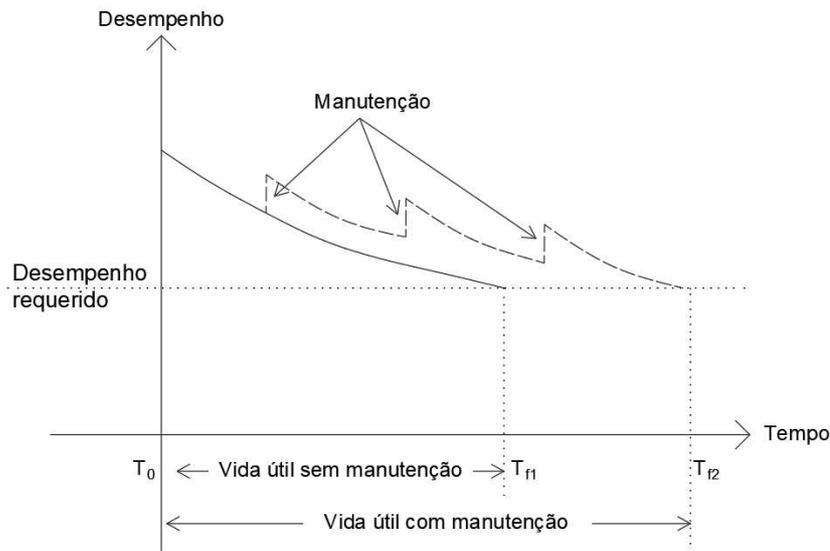
3.4.1 Conceitos relacionados à vida útil

As definições de durabilidade, vida útil (VU) e vida útil de projeto (VUP) estão presentes na norma ABNT NBR 15575-1 (2013) – Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais. A durabilidade é um aspecto qualitativo e representa a capacidade do material de atender a exigências mínimas de desempenho, afetada por fatores como condições ambientais, frequência de manutenção e composição do próprio material. A vida útil é um requisito para a durabilidade, expressa de forma quantitativa, em anos (SANTOS, 2018).

De acordo com a norma ABNT NBR 15575-1 (2013), vida útil (VU) pode ser conceituada como o “período de tempo compreendido entre o início de operação ou uso de um produto e o momento em que o seu desempenho deixa de atender os requisitos do usuário preestabelecidos”. Esse conceito pode ser utilizado tanto para a análise de materiais e componentes, quanto para uma edificação.

A vida útil é influenciada diretamente pela frequência de manutenções, que devem ser efetuadas conforme programado, com o intuito de se cumprir a vida útil de projeto estipulada. É possível prorrogar ou antecipar a vida útil de um elemento, dependendo da realização das ações de manutenção, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Efeito da manutenção no desempenho ao longo do tempo.



Fonte: ABNT NBR 15575-1 (2013).

A vida útil de projeto (VUP) é definida pela norma ABNT NBR 15575-1 (2013) como:

Período estimado de tempo para o qual um sistema é projetado, a fim de atender aos requisitos de desempenho estabelecidos nesta Norma, considerando o atendimento aos requisitos das normas aplicáveis, o estágio do conhecimento no momento do projeto e supondo o atendimento da periodicidade e correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo manual de uso, operação e manutenção (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 10).

Dessa forma, a VUP é um parâmetro definido pelo projetista, levando-se em consideração o padrão de construção e a previsão das manutenções futuras. Por se tratar de um valor teórico, pode ou não ser atingido, dependendo do cumprimento das especificações de projeto e de fatores externos, como os ambientais.

O valor mínimo de VUP adotado pela norma ABNT NBR 15575-1 (2013) para a estrutura principal de edificações é de 50 anos, utilizado para habitações de interesse social. A partir desse valor, outras partes da edificação podem ter seus respectivos VUP calculados. A Tabela 2 apresenta valores mínimos, intermediários e superiores de VUP para cada parte construtiva.

Tabela 2 – Valores de CO₂ embutido de materiais de construção.

| Parte da edificação | Exemplos | VUP (anos) | | |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------|----------|
| | | Mínimo | Intermediário | Superior |
| Estrutura principal | Fundações, elementos estruturais (pilares, vigas, lajes e outros), paredes estruturais, contenções. | ≥ 50 | ≥ 63 | ≥ 75 |
| Estrutura auxiliares | Muros divisórios, estrutura de escadas externas. | ≥ 20 | ≥ 25 | ≥ 30 |
| Vedação externa | Paredes de vedação externas, painéis de fachada, fachadas-cortina. | ≥ 40 | ≥ 50 | ≥ 60 |
| Vedação interna | Paredes e divisórias leves internas, escadas internas, guarda-corpos. | ≥ 20 | ≥ 25 | ≥ 30 |
| Cobertura | Estrutura e coletores embutidos. | ≥ 20 | ≥ 25 | ≥ 30 |
| | Telhamento. | ≥ 13 | ≥ 17 | ≥ 20 |
| | Calhas de beiral e coletores aparentes. | ≥ 4 | ≥ 5 | ≥ 6 |
| | Rufos e calhas internas. | ≥ 8 | ≥ 10 | ≥ 12 |
| Revestimento interno aderido | Revestimento de piso, parede e teto: de argamassa, de gesso, cerâmicos, pétreos, de tacos e assoalhos e sintéticos. | ≥ 13 | ≥ 17 | ≥ 20 |
| Revestimento interno não aderido | Revestimento de piso: têxteis, laminados ou elevados; lambris; forros falsos. | ≥ 8 | ≥ 10 | ≥ 12 |
| Piso externo | Pétreo, cimentados de concreto e cerâmico. | ≥ 13 | ≥ 17 | ≥ 20 |
| Esquadrias externas (de fachada) | Janelas, portas-balcão, gradis, grades de proteção, cobogós, brises. Inclusos complementos de acabamento . | ≥ 20 | ≥ 25 | ≥ 30 |
| Esquadrias internas | Portas e grades internas, janelas internas. | ≥ 8 | ≥ 10 | ≥ 12 |
| | Portas externas, portas corta-fogo. | ≥ 13 | ≥ 17 | ≥ 20 |
| | Complementos de esquadrias internas. | ≥ 4 | ≥ 5 | ≥ 6 |

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15575-1 (2013).

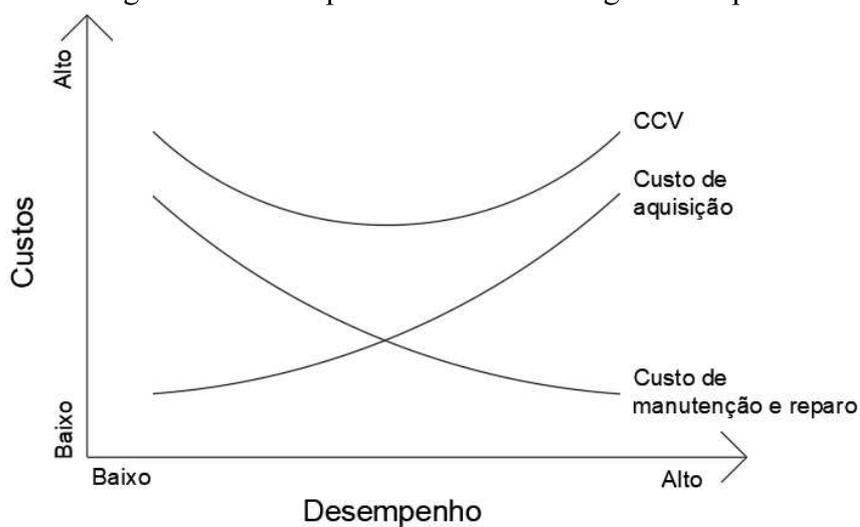
3.4.2 Vida útil e a escolha de materiais

O estudo de parâmetros ambientais e econômicos de uma edificação está relacionado ao conceito de vida útil. Mequignon *et al.* (2013) constataram que o tempo de vida útil dos materiais é um fator tão relevante quanto a escolha do material em si, para o cálculo das emissões de GEE relacionadas às edificações. Em um estudo comparativo, uma alternativa, a princípio, mais poluente, pode se tornar uma melhor alternativa caso o tempo de vida útil do material seja maior, uma vez que trocas de materiais e manutenções mais frequentes impactam na análise do ciclo de vida do edifício.

De forma análoga, pode-se realizar um estudo que analise o parâmetro custo em função da vida útil, levando-se em consideração o custo inicial, custos de manutenção e a vida útil estimada. Segundo Possan e Demoliner (2013), a utilização da análise do Custo de Ciclo de Vida (CCV) de uma edificação leva em consideração decisões de projeto, execução, uso e manutenção ao longo da vida útil e podem justificar um investimento financeiro maior em busca de menores custos relacionados à manutenção ao longo do tempo.

A Figura 8 ilustra desempenho e custos hipotéticos ao longo do tempo, evidenciando a importância de um estudo que considere, além do custo inicial, custos relacionados a manutenção ao longo da vida útil, com o intuito de se detectar a solução mais econômica. De acordo com a norma ABNT NBR 15575-1 (2013), o VUP estabelecido é o resultado de um estudo de otimização do custo global de construção, ou seja, define-se a vida útil de projeto com base no menor CCV possível, e não somente com a opção de material de menor custo inicial ou com a maior durabilidade, uma vez que o primeiro possivelmente terá um custo elevado com manutenções e, o segundo, um custo inicial elevado.

Figura 8 – Desempenho e custos ao longo do tempo.



Fonte: Adaptado de Possan e Demoliner (2013).

Além de se prezar pela qualidade e conforto, com padrões estabelecidos por norma, é de suma importância considerar o estudo da vida útil na escolha dos materiais. Entende-se ser usual utilizar o fator econômico como primordial na escolha dos materiais, porém, com o avanço de estudos relacionados a consciência ambiental, o fator vida útil pode também ser utilizado em análises comparativas de diferentes soluções construtivas. Dessa forma, através de um estudo comparativo, é possível determinar quais materiais apresentarão menores índices de impactos ambientais e de custo ao final da vida útil da edificação.

4. DIÓXIDO DE CARBONO EMBUTIDO NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

As etapas do ciclo de vida de um produto representam, inevitavelmente, consumo de energia. Esse consumo é ligado à operação de máquinas e equipamentos para extração e beneficiamento das matérias-primas, instalação dos produtos, e, finalmente, para demolição, reciclagem e disposição final, passando pela queima de combustível no transporte entre essas etapas (TRELOAR *et al.*, 2001 *apud* MONICH e TAVARES, 2010). Vale destacar que, também aqui, o estabelecimento das fronteiras dos estudos é importante, no sentido de dar claro sentido às quantidades envolvidas de energia de um ponto a outro dos processos.

A energia gasta em todo esse percurso, associada à unidade de produto (por exemplo, kWh/kg de material), recebe o nome de energia “embutida” ou energia “incorporada” (*embodied energy*, em inglês). Os valores podem envolver tanto energia elétrica, como a energia liberada na queima de combustíveis em forma de gases, entre outras. Para se entender, de fato, o que isso representa em termos de impactos para o planeta, todas podem ser convertidas em fontes primárias de energia consumida, como o carvão, o petróleo e o gás natural, entre aquelas não renováveis, e a madeira e a água, entre as renováveis. Entretanto, é bastante usual expressar tudo isso através de um só tipo de impacto, quando possível, para evitar dados confusos e erros de interpretação e, também, para permitir condições de comparação entre diferentes estudos científicos. Entre aqueles impactos mais danosos e que mais afligem os cientistas quanto às questões climáticas, está a emissão de gases do efeito estufa. É uma questão de escolha de cada estudo tomar apenas os GEE para analisar os impactos do ciclo de vida de um material ou edifício que, não necessariamente, significa negligenciar outros impactos, alguns deles já mencionados, como esgotamento de recursos naturais e geração de resíduos. A questão passa a ser, então, de conversão de consumo de energia em emissão de GEE. Esta relação é bastante conhecida mundialmente e expressa a quantidade de CO₂ por kWh (tCO₂/kWh) de cada país, pois cada região do planeta possui uma matriz energética diferente, com proporções diferentes de tipos de geração de energia, mais poluentes ou menos poluentes - carvão, nuclear, hidrelétrica, eólica, solar e biomassa, entre as principais.

O GEE mais preocupante, pela quantidade emitida, é o dióxido de carbono (CO₂), em torno do qual se desenvolvem os mais amplos debates sobre estratégias mundiais para a redução de emissões na atmosfera. Dessa maneira, existe a possibilidade - também uma questão de escolha ou adequação a um determinado tipo de estudo - de se expressar a emissão de GEE em forma de um só gás poluente e, para tanto, usa-se o potencial de aquecimento global (GWP -

sigla, em inglês, de *global warming potencial*), de cada gás (metano, hidrofluorcarbonos etc.) para se fazer conversões quantitativas. Os GEE aquecem a Terra absorvendo energia e reduzindo a taxa com que a energia escapa para o espaço (EPA,2021). Diferentes GEEs podem ter diferentes efeitos no aquecimento da Terra e o GWP foi desenvolvido para permitir a comparação entre os efeitos dos diferentes gases, no sentido de se fazer uma equivalência em relação. Assim, o CO₂, por definição, tem GWP igual a 1 e é usado como referência. Segundo a *United States Environmental Protection Agency*, Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2021), especificamente, é uma medida de quanta energia as emissões de 1 tonelada de um gás irão absorver em um determinado período de tempo, em relação às emissões de 1 tonelada de dióxido de carbono (CO₂). Quanto maior o GWP, mais um determinado gás aquece a Terra em comparação com o CO₂ em um período de tempo, geralmente usado o de 100 anos como referência.

Dois importantes gases do efeito estufa são o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), cujos GWP são iguais a 21 e 310, respectivamente (United Nations - Climate Change, 2021). Finalmente, após a conversão, a unidade que expressa a quantidade de GEE de um determinado cenário tendo o CO₂ como referência é o **CO₂ equivalente** (CO_{2eq}).

O impacto causado pelo CO₂ embutido retrata, na forma de CO_{2eq}, os impactos causados durante o processo produtivo estudado, de acordo com as fronteiras definidas. Na área de construção civil, o resultado pode ser apresentado em uma unidade que represente a quantidade de CO₂ emitida por unidade de material (aço, alumínio, cerâmica, PVC, etc.) ou produto (cimento, cal, brita, concreto etc.), em quilograma de CO₂ (ou CO_{2eq}) por quilograma de material (kgCO₂/kg) (MATEUS, 2004).

Uma maneira de se encontrar valores de CO_{2eq} para materiais de construção é consultar bases de dados. Infelizmente, não se encontra ainda no Brasil uma base disponibilizada por entidades organizadas dos setores público ou privado, representativas da indústria nacional. A solução está em “garimpar” números em bases internacionais e na literatura, verificando ou adaptando sua validade para o Brasil. Uma base estrangeira nem sempre servirá para aplicação direta em um estudo em nosso país - o que se faz é adaptar os números, usando critérios que levam em conta as diferentes realidades dos países relacionadas a fatores de produção, matérias primas disponíveis e, principalmente, a matriz energética de cada um. Uma das bases mais conhecidas e usadas no mundo inteiro é a suíça Ecoinvent. O IPT - Instituto de Pesquisa Tecnológicas de São Paulo - coordenou, em 2017 e 2018, um projeto de levantamento de dados

que veio a compor a base Ecoinvent a partir de inventários brasileiros para sete tipos de cimento, concreto e alguns produtos cimentícios, como blocos de concreto (IPT, 2018).

A Tabela 3 – Valores de CO₂ embutido de materiais de construção apresenta uma reunião de exemplos de materiais com dados de CO₂ embutido sugeridos por fontes nacionais.

Tabela 3 – Valores de CO₂ embutido de materiais de construção.

| Material | CO₂ embutido (kgCO₂/kg) | Fonte |
|------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------|
| Aço CA-50 | 1,55 | 1 |
| Alumínio | 4,44 | 2 |
| Areia | 0,01 | 1 |
| Argamassa colante | 1,01 | 1 |
| Revestimento cerâmico | 0,19 | 2 |
| Brita | 0,01 | 1 |
| Cal hidratada | 0,74 | 1 |
| Cerâmica para bloco | 0,23 | 1 |
| Cerâmica para telha | 0,63 | 1 |
| Cimento Portland | 0,59 | 4 |
| Concreto para bloco | 0,18 | 2 |
| Concreto (15 MPa) para telha | 0,16 | 2 |
| Fibrocimento | 1,11 | 3 |
| Madeira | 0,08 | 1 |
| Perfil de aço | 1,39 | 1 |
| PVC | 5,92 | 1 |
| Revestimento madeira | 0,08 | 1 |

1 - GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. (2015);

2 - COSTA, B. L. C. (2012);

3 - PEREIRA, M. F. B. (2014);

4 - SNIC (2019).

Fonte: Autor (2021).

5. ASPECTO ECONÔMICO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS

Paralelamente ao impacto ambiental, pode-se realizar um estudo de viabilidade econômica de um empreendimento através do levantamento de custos dos materiais e serviços que o compõe ao longo do ciclo de vida. Esse tipo de trabalho ficou conhecido como análise de custo de ciclo de vida (CCV) e tem por característica considerar apenas o aspecto econômico. A importância da sua aplicação se justifica pela busca das melhores soluções tanto de custo inicial como frente à expectativa de durabilidade ao longo do tempo.

As primeiras análises que consideram os custos ao longo do ciclo de vida no Reino Unido datam do final da década de 1950 (GOH e SUN, 2015). Nos Estados Unidos, a aplicação desse tipo de estudo se iniciou em meados da década de 1960, conduzidos pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (HERALOVA, 2017). Antes da década de 1970, a maioria dos participantes do mercado de construção civil consideravam apenas os custos iniciais de aquisição e construção devido a fatores como: falta de informação, falta de dados relacionados aos materiais ao longo do seu ciclo de vida e ao fato de que investidores podem estar interessados na análise somente até o término da fase de construção, uma vez que visam a venda de empreendimentos (BOUSSABAINÉ e KIRKHAM, 2005).

Na década de 1970, custos ligados às etapas de construção e operação começam a integrar estudos de edifícios, dando origem aos chamados estudos de ciclo de vida de utilização. Custos relacionados ao final de ciclo de vida, disposição final ou reciclagem ainda não eram computados (SEELEY, 1979 *apud* RODRIGUES, 2014). Ao final da década de 1970 e início da década de 1980 iniciou-se a aplicação do custo de ciclo de vida (CCV), representando uma análise completa, desde as etapas iniciais até a disposição final. Na década de 1990, a compreensão sobre CCV já se encontrava difundida, inclusive no setor construção civil (BOUSSABAINÉ e KIRKHAM, 2005).

Em 2008, o conceito de custo de ciclo de vida foi incorporado à norma ISO 15686-5 – *Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing*. Tal norma versa sobre o custo de ciclo de vida, conceitos relacionados e diretrizes de cálculo aplicados a edifícios e ativos construídos (RODRIGUES, 2014).

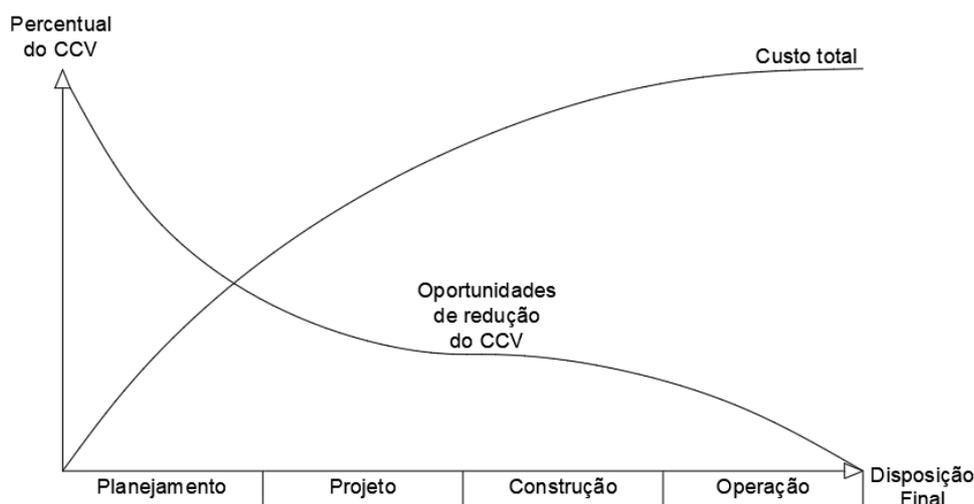
5.1 CUSTOS E O CICLO DE VIDA

O estudo do custo de ciclo de vida é definido pela norma ISO 15686-5 (2017) como sendo o levantamento do custo de um ativo ou de suas partes ao longo de seu ciclo de vida,

enquanto atenderem aos requisitos mínimos de desempenho estabelecidos. Perante a expectativa de se gerar uma economia de gastos exponencial, faz sentido realizar estudos iniciais que levem em consideração os custos envolvidos em um empreendimento ao longo do seu ciclo de vida.

Segundo a norma ISO 15686-5 (2017), até 80% dos custos relacionados à fase operacional de um edifício (incluindo manutenções e trocas de materiais) podem ser identificados nas etapas de projeto e concepção. Isso significa que os impactos gerados pelas escolhas iniciais influenciarão o edifício ao longo de todo o seu ciclo de vida, reforçando a responsabilidade das decisões tomadas nas fases iniciais dos empreendimentos e a necessidade de uma visão de longo prazo. A Figura 9 demonstra que as maiores oportunidades de economia de gastos estão localizadas nas etapas iniciais do ciclo de vida.

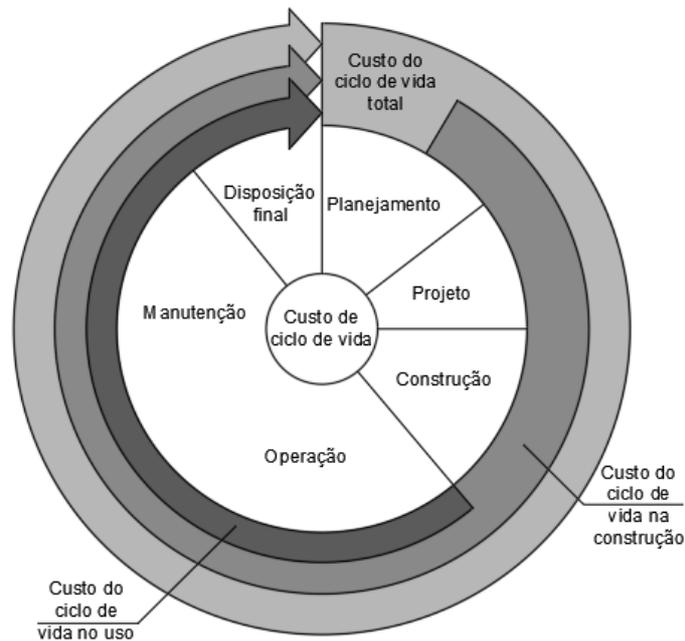
Figura 9 – Potencial de redução do CCV por etapa do ciclo de vida.



Fonte: Adaptado de AASHTO (2013).

Assim como em uma ACV pode-se utilizar fronteiras de estudo, a norma supracitada prevê que um estudo de CCV pode ser realizado em vários níveis, dependendo da disponibilidade de informações, do grau de precisão necessário e do interesse do autor. Desse modo, pode-se dividir o estudo segundo as etapas do ciclo de vida (planejamento, projeto, construção, operação, manutenção e disposição final) ou em fases que agrupem mais de uma etapa do ciclo de vida, por exemplo: custo de ciclo de vida total, custo de ciclo de vida na construção e custo de ciclo de vida no uso. A Figura 10 ilustra as possibilidades de estudo CCV segundo diferentes estágios.

Figura 10 – Etapas de análise de custos durante o ciclo de vida.



Fonte: Adaptado da norma ISO 15686-5 (2017).

5.2 CÁLCULO DO VALOR PRESENTE

Em uma análise de custos durante o ciclo de vida, o tempo é uma variável altamente relevante. Diferentes custos incidem em um edifício de acordo com a etapa do ciclo em que este se encontra e, dentro de uma mesma etapa, em diferentes idades, quando se analisa, por exemplo, a etapa de operação e os gastos advindos de manutenções periódicas. Dessa forma, é de praxe utilizar uma taxa de desconto incidindo sobre o fluxo de caixa futuro, com o intuito de trazer todos os gastos a valor presente e, dessa forma, permitir uma comparação (GLUCH e BAUMANN, 2003). Em outras palavras, o valor total necessário para cobrir todos os custos iniciais e os gastos do empreendimento ao longo do tempo será um valor presente acrescido de parcelas referentes à aplicação de juros e correção monetária, entre outros fatores. Daí as expressões “trazer para o valor presente” e “aplicar uma taxa de desconto”. O custo final atribuído é calculado através do levantamento dos gastos futuros reduzidos pela taxa de desconto. A Equação 1 é baseada na fórmula presente na norma europeia ISO 15686 (2017) para cálculo de custo de ciclo de vida (CCV) com base em uma taxa de desconto futuro.

$$Custo_{ec} = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (1)$$

Onde:

$Custo_{ec}$: custo proveniente de uma etapa construtiva ao longo do ciclo de vida, em R\$;

C_t : todos os custos como fluxo de caixa equivalente para um ano t , em R\$;

r : taxa de desconto;

t : ano analisado;

T : duração do ciclo de vida estimado, em anos;

Segundo a norma ISO 15686-5 (2017), a taxa de desconto que incide no setor privado depende de uma série de fatores: inflação, custo de capital, taxa de juros, custo de empréstimo, a taxa de retorno do investidor e a taxa que poderia ser obtida com a alocação do seu capital em um investimento diferente, entre outros.

Zhang (2017) converteu o impacto ambiental do ciclo de vida de um edifício localizado na China em custo ambiental de ciclo de vida. Para o cálculo do custo de carbono emitido foram utilizadas e comparadas taxas de desconto de 4%, 6% e 8%. Goulouti *et al.* (2020) estudaram incertezas de parâmetros associadas ao estudo de ACV e CCV e, durante um estudo de caso para residências multifamiliares na Suíça, utilizaram uma taxa de desconto de 5,5%. Rebitzer (2005) recomenda a adoção de uma taxa de desconto média de 5% em estudos de custos durante o ciclo de vida podendo, posteriormente, aplicar-se valores entre 0% e 10% com o intuito de se analisar a variação dos resultados.

5.3 ANÁLISE INTEGRADA DE FATORES ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

A escolha dos materiais de construção de um empreendimento é uma tarefa influenciada por vários aspectos. Existe uma série de fatores que podem ser levados em consideração, entre eles: custo, vida útil, desempenho, aspectos ambientais e aspectos sociais ou culturais. De uma forma geral, quanto mais variáveis forem incluídas em uma análise, mais próximo se estará de encontrar uma opção que represente a melhor solução.

Atualmente, existem estudos que apresentam métodos de análise integrada de diferentes fatores, entre eles a engenharia do ciclo de vida, traduzida do termo em inglês *life-cycle engineering* (LCE). Essa metodologia tem por objetivo abarcar em uma análise de três fatores:

financeiro, ambiental e de desempenho durante o ciclo de vida de um produto. Surgiu da necessidade de se reduzir os impactos ambientais de produtos, mantendo-os financeiramente viáveis, de forma que as indústrias continuassem competitivas e obtivessem reconhecimento ambiental (WANYAMA *et al.*, 2003 e INÁCIO, 2009).

Vários estudos buscam analisar opções de materiais utilizando mais de uma variável. Braga *et al.* (2017) analisaram o impacto ambiental e econômico da utilização de agregados graúdos naturais e reciclados em concreto, em um estudo do berço ao portão, e concluíram que um produto economicamente mais barato pode também ser ambientalmente menos agressivo. Em termos financeiros, os autores concluíram que utilizar agregados graúdos reciclados pode gerar uma economia de até 80%, quando se analisa o custo financeiro desse material.

Islam *et al.* (2014) analisaram a influência da troca de materiais em paredes de casas típicas australianas, ao longo do ciclo de vida, e concluíram, com o auxílio de um algoritmo de otimização, que emissões de gases, custos durante o ciclo de vida e geração de resíduos sólidos são diretamente influenciados pelas escolhas efetuadas. Através de um sistema de classificação por estrelas, verificaram que a melhoria na classificação da edificação poderia representar a redução de 14% das emissões de gases e cerca de 10% na demanda de energia do projeto. O custo financeiro, porém, aumentou 14% em média.

Kovacic *et al.* (2015) analisou aspectos financeiros e ambientais de três opções de fachadas para instalações industriais (forro de aço, painéis sanduíche de aço e painéis de madeira). Considerando um ciclo de vida maior que trinta e cinco anos, o custo variou 6% entre as opções, e a utilização de painéis madeira representou 80% de redução das emissões de gases, apesar de possuir o custo inicial de construção mais alto entre as opções estudadas.

Balashbaneh *et al.* (2019) desenvolveram um estudo sobre opções de materiais a serem utilizados em edifícios que se encontram em zonas de risco de inundações (tijolo comum, bloco de concreto, painéis de parede de aço, madeira e estrutura de concreto pré-moldado). Foram considerados critérios ambientais e de custos em situações de ocorrência e não-ocorrência de inundações. Os autores concluíram que a madeira foi o material mais caro, porém com menor emissão de gases em situações normais e que o concreto pré-moldado foi a melhor opção em termos ambientais para situações de inundação. Como conclusão, madeira e aço foram as piores soluções em regiões de inundação, enquanto o tijolo foi o de melhor performance.

Ahmed e Tsavdaridis (2018) analisaram três configurações de pisos sob os aspectos ambientais e de custos ao longo do ciclo de vida, duas delas pré-existentes e uma terceira

configuração proposta pelos autores. Concluíram que a opção proposta por eles apresentava vantagens financeiras e ambientais, com redução de emissão de gases de até 37% e redução de custos de construção de pelo menos 13%.

Liang *et al.* (2021) compararam a construção de um edifício em madeira e em concreto armado nos Estados Unidos. Os autores concluíram que, para uma vida útil de sessenta anos, a construção em madeira representou menos 12% de emissões de gases do efeito estufa, porém com um custo 9,6% maior ao longo da vida útil, quando comparada com o concreto armado.

Todos esses estudos consideram a realidade regional, em termos de matriz energética, disponibilidade de recursos e preços, fatores que podem fazer a interpretação de resultados ser bastante diferente de um para outro.

5.4 ORÇAMENTO DE OBRAS

Segundo o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – SINAPI (2020), o orçamento de obra “busca alcançar a estimativa de custos antes que se transformem em despesas, sendo necessário, após isso, acompanhá-los e gerenciá-los à medida que ocorrem”. Conforme a publicação TCPO (2010), uma das mais tradicionais do setor, o orçamento de uma construção é “o cálculo que se faz para determinar todos os gastos de uma obra ou serviço de construção” (TCPO, 2010).

De acordo com Baeta (2012 *apud* SINAPI, 2020), um orçamento pode ser classificado de acordo com o seu nível de detalhamento, da seguinte maneira: estimativa de custo, orçamento preliminar e orçamento analítico ou detalhado.

- a. **Estimativa de custo:** trata-se de uma análise preliminar realizada com base em custos históricos (experiência) e comparação com projetos similares. O cálculo da sua ordem de grandeza pode ser utilizado para avaliar a viabilidade econômica.
- b. **Orçamento preliminar:** feito com base em levantamento de quantidade dos principais serviços e pesquisa de preço dos insumos mais relevantes. Possui grau de incerteza menor que a estimativa de custo, porém é menos preciso que um orçamento analítico.
- c. **Orçamento analítico ou detalhado:** elaborado a partir de composições de custos definidas e após pesquisa de preço dos insumos, buscando chegar o mais próximo possível do custo real. Para tal, deve-se dispor dos projetos necessários para a execução do empreendimento (com detalhamento e levantamento de quantitativos).

O processo de elaboração de um orçamento pode ser dividido em quatro fases: recebimento e análise inicial do projeto, levantamento e quantificação dos serviços, composição de custos e análise de conclusão do orçamento (IOPES, 2017). A seguir são descritas cada uma delas, segundo o Instituto de Obras Públicas do Espírito Santo – IOPES (2017).

I. Recebimento e análise inicial do projeto: o orçamentista deve verificar se possui todas as informações necessárias para a definição dos serviços e se existe alguma inconformidade nos projetos.

II. Levantamento e quantificação dos serviços: nessa etapa define-se quais serviços serão executados e é feita a sua quantificação.

III. Composição de custos: etapa na qual são feitas as tabelas de custo unitário. Nessa etapa sabe-se a quantidade de cada serviço e buscam-se tabelas de informações dos serviços por unidade (TCPO, SINAPI, entre outras) e preços dos insumos e, ao final, adiciona-se o BDI (benefícios e despesas indiretas).

IV. Análise de conclusão do orçamento: etapa de revisão na qual é feita uma conferência das planilhas, verificando se todos os serviços foram considerados nas quantidades e de maneira corretas.

No presente trabalho, em que a metodologia proposta de escolha de soluções construtivas será baseada na sistemática de orçamentação de obras, tanto para o levantamento de custos quanto para o da quantidade de CO₂ embutido de edificações, o processo de cálculos seguirá o de um orçamento detalhado, com exceção do cálculo relativo a parte estrutural, para o qual será feita uma estimativa de custos.

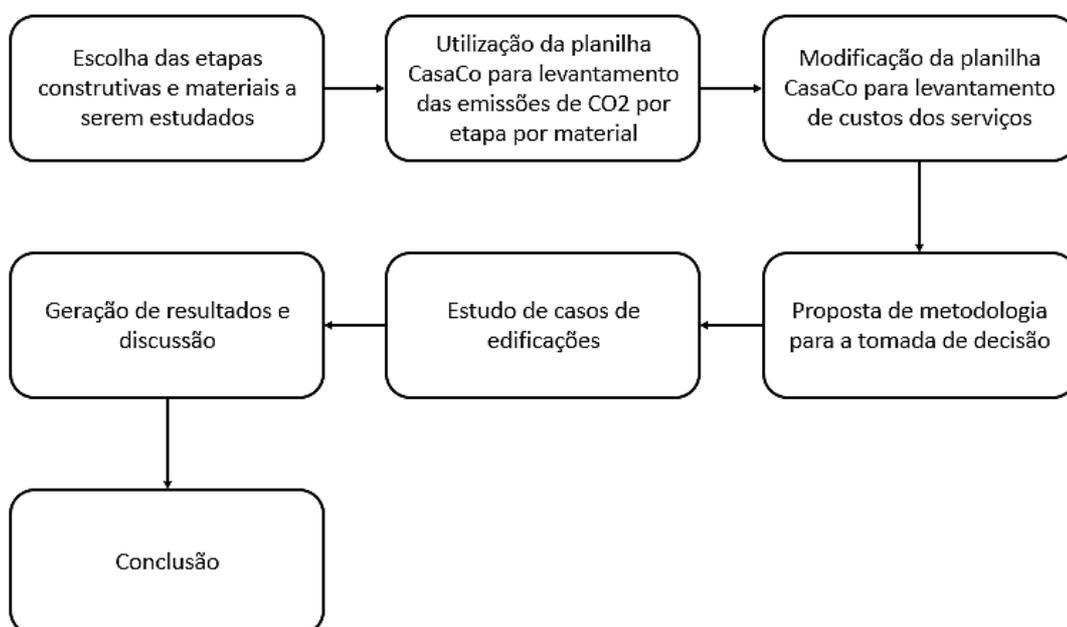
6. METODOLOGIA

No presente capítulo é apresentada uma proposta de metodologia para auxílio no processo de escolha de materiais e soluções construtivas para projetos de edificação, considerando os fatores quantidade de CO₂ embutido e custo das alternativas.

6.1 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

A Figura 11 apresenta, em forma de fluxograma, as etapas necessárias para o desenvolvimento da metodologia.

Figura 11 – Etapas do trabalho.



Fonte: Autor (2021).

6.2 PLANILHA ELETRÔNICA “CASACO”

A planilha eletrônica “CasaCO” foi desenvolvida pelo Grupo PARES – Pesquisa Aplicada em Argamassas e Construção Sustentável, do Departamento de Construção Civil da UFJF, e teve a primeira versão concluída em 2017. Vem sendo aprimorada com diversas novas funcionalidades desde então, sempre com apoio de bolsistas de iniciação científica do curso de Engenharia Civil. Funciona no programa computacional Excel, da Microsoft, e tinha o objetivo inicial de calcular a quantidade de CO₂ embutido em uma edificação, considerando os materiais de construção utilizados em cinco etapas construtivas: paredes, pisos, cobertura, portas e janelas.

A planilha permite comparar até cinco edificações, cada uma com diferentes combinações de materiais e serviços para as etapas construtivas. A Tabela 4 apresenta os materiais e serviços que podem compor as etapas construtivas do programa. Em determinadas etapas, as soluções são formadas por várias “camadas” sobrepostas para compor uma solução construtiva, como no caso de paredes (exemplo: emboço externo + bloco cerâmico + emboço interno) e pisos (exemplo: laje de concreto armado + contrapiso de argamassa + revestimento de madeira). A quantidade de CO₂ embutido, nesses casos, será a soma da quantidade de CO₂ de cada camada, por unidade de serviço – para paredes e pisos, a unidade é o metro quadrado. A etapa construtiva “estrutura”, que anteriormente constava como uma laje que compunha uma das camadas de piso, foi adicionada de forma separada no decorrer deste trabalho, considerando o volume total estimado de concreto de lajes, vigas e pilares de uma edificação.

Tabela 4 – Possibilidade de serviços por etapa construtiva.

| Etapa Construtiva | Materiais | |
|--------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Paredes | Emboço de argamassa | Alvenaria de bloco de concreto vazado |
| | Alvenaria de bloco cerâmico vazado | Revestimento cerâmico |
| | Alvenaria de bloco cerâmico maciço | Argamassa colante |
| Pisos | Contrapiso de argamassa (cimento, areia) | Revestimento cerâmico |
| | Argamassa colante | Revestimento de madeira |
| Cobertura | Telha cerâmica | Telha Fibrocimento |
| | Telha concreto | Telha alumínio |
| Janelas | Alumínio | PVC |
| | Aço | Madeira |
| Portas | Alumínio | PVC |
| | Aço | Madeira |
| Estrutura | Concreto armado (concreto fck 25 MPa e aço CA50) | |

Fonte: Autor (2021).

A metodologia proposta no presente trabalho será desenvolvida utilizando-se a ferramenta CasaCO, incorporando-se a funcionalidade de cálculo do custo da obra. Assim, ela passaria a funcionar com duplo objetivo: comparar soluções construtivas tanto em termos ambientais (CO₂ embutido) quanto em termos de custo. Ressalta-se que nesse estudo não são considerados custos relativos a serviços de fundação, estrutura da cobertura, forros, pintura, louças e metais, instalações elétricas e telefônicas, hidráulicas e sanitárias.

A Tabela 5 mostra uma parte da planilha em que é feita a configuração de uma parede formada por camadas (linhas da tabela, iguais às da planilha) pré-definidas, como o emboço e o tipo de bloco usado na alvenaria. Nessas linhas deve-se preencher, também, a espessura de cada camada. A Tabela 6 mostra outros dados de entrada importantes para os cálculos, como área total construída de cada edificação, quantidade de serviço de cada etapa construtiva e vida útil da edificação.

Tabela 5 – Escolha dos materiais e espessura para um tipo de parede.

| PAREDES | | | |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------|-----------------------|
| Nome: Emboço + Bloco cerâmico vazado + Emboço | | | |
| | Camadas | Unidade | Espessura (cm) |
| 1 | Emboço argamassa (cimento, cal, areia) | cm | 2 |
| 2 | Bloco cerâmico vazado | cm | 9 |
| 3 | Emboço argamassa (cimento, cal, areia) | cm | 2 |

Fonte: Autor (2021).

Tabela 6 – Tabela representativa da tela inicial da planilha eletrônica CasaCO.

| Área construída (m²): | EDIFICAÇÃO 1 | | EDIFICAÇÃO 2 | |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------|-------|
| | 36,0 | | 36,0 | |
| Vida útil estimada (anos): | 100,0 | | 100,0 | |
| Partes da edificação | Materiais e soluções construtivas | | Materiais e soluções construtivas | |
| PAREDES 1 (m²) | Emboço + bloco cerâmico vazado + emboço | 200,0 | Emboço + bloco cerâmico vazado + emboço | 200,0 |
| PAREDES 2 (m²) | Emboço + bloco cerâmico vazado + emboço | 0,0 | Emboço + bloco cerâmico vazado + emboço + rev. cerâmico | 0,0 |
| PISOS 1 (m²) | Laje c. a. + argamassa + cola + cerâmica | 36,0 | Laje c. a. + argamassa + cola + madeira | 36,0 |
| PISOS 2 (m²) | Laje c. a. + argamassa + cola + cerâmica | 0,0 | Laje c. a. + argamassa + cola + cerâmica | 0,0 |
| COBERTURA (m²) | Telha cerâmica | 50,0 | Telha de concreto | 50,0 |
| JANELA (m²) | Alumínio | 50,0 | Madeira | 50,0 |
| PORTA (m²) | Alumínio | 40,0 | Madeira | 40,0 |
| ESTRUTURA (m³) | Concreto armado (concreto fck 25 MPa e aço CA50) | 16,0 | Concreto armado (concreto fck 25 MPa e aço CA50) | 16,0 |

Fonte: Autor (2021).

A planilha CasaCO pode comparar até cinco edificações simultaneamente e apresenta, como resultados, a quantidade total de CO₂ embutido de cada edificação, a distribuição percentual por etapa construtiva em cada uma delas e a quantidade de CO₂ por metro quadrado por ano, também para cada edificação.

6.3 QUANTIDADE DE CO₂ EMBUTIDO

Para o cálculo da quantidade total de CO₂ embutido de uma edificação, a planilha leva em conta um índice de emissão de CO₂ por material (kgCO₂/kg) e as quantidades de materiais consumidas por etapa de obra, além do tempo de vida útil de cada material ou componente. Dessa forma, o cálculo é feito em duas etapas: na primeira, calcula-se a quantidade de CO₂ de um serviço (revestimento de parede, alvenaria e outros), com base em uma composição de custo conhecida que inclui os materiais consumidos e suas respectivas quantidades por unidade de serviço (m², m³). A referência usada para obter as composições foi a publicação TCPO - Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos, da Editora Pini, reconhecida pelo meio técnico e amplamente usada por empresas construtoras de todo o território nacional (TCPO, 2010). Portanto, um serviço composto por “n” insumos será calculado com base na Equação 2:

$$CO_{2,s} = \sum_{x=1}^n (Q_x \times iCO_{2,x}) \quad (2)$$

Onde:

$CO_{2,s}$: gás carbônico embutido em uma unidade de um serviço “s”, em kgCO₂/m² ou kgCO₂/m³;

Q_x : consumo de um material “x” por unidade de serviço;

$iCO_{2,x}$: quantidade de CO₂ embutido em 1 kg de um material “x” em kgCO₂/kg.

Em uma segunda etapa, com base nos valores de CO₂ embutido de cada serviço, calcula-se a quantidade para cada etapa construtiva (piso, parede, cobertura, janelas, portas e estrutura), composta por um ou mais serviços. Para as etapas de pisos e paredes deve-se levar em consideração a espessura de cada serviço, como emboço e revestimento, por exemplo, preenchida pelo utilizador da planilha. Para etapas como cobertura, janelas e portas, esse valor não é levado em consideração, podendo ser igual a 1 na Equação 3 a seguir, que apresenta o valor de CO₂ para cada etapa.

$$CO_{2,ec} = \sum \left(\frac{VUP_e}{VUP_s} \times CO_{2,s} \times Q_{serviço} \times e_s \right) \quad (3)$$

Onde:

$CO_{2,ec}$: gás carbônico embutido de uma etapa construtiva “ec”, em kgCO₂;

VUP_e : vida útil de projeto da edificação, em anos;

VUP_s : vida útil do serviço “s”, em anos;

$Q_{serviço}$: quantidade de serviço a ser executado na presente etapa, em m^2 ou m^3 ;

e_s : espessura de cada serviço, levada em consideração para as etapas de parede e piso, em cm (para as demais etapas construtivas $e_s=1$);

Os valores de CO_2 embutido dos materiais utilizados no estudo foram obtidos na literatura, condizentes com a aplicação no Brasil, e correspondem à abordagem **berço ao portão** (*cradle to gate*), já apresentados na Tabela 3. A Tabela 7 mostra um exemplo de quantificação de CO_2 para o serviço de alvenaria de blocos cerâmicos. O tempo de vida útil de partes e componentes das construções utilizados nos cálculos foram estabelecidos respeitando os valores mínimos indicados na norma ABNT NBR ISO 15575 – Parte 1, e estão presentes na Tabela 8. O Anexo A apresenta, detalhadamente, a quantidade de CO_2 embutido por serviço.

Tabela 7 – Exemplo de cálculo de CO_2 para alvenaria de blocos cerâmicos.

| Serviço: Alvenaria de vedação com blocos cerâmicos vazados 10 x 20 x 20 (junta de 12 mm) assentados com arg. 1:2:8 (cimento, cal, areia). Unidade: m^2 | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------|--------------------------------------|----------------------------|
| | Unid. | Consumo | CO_2 embutido por material (kg/un) | kg CO_2 /cm de espessura |
| Cimento Portland CP-II E-32 | kg | 2,18 | 0,37 | 0,08 |
| Cal hidratada | kg | 2,18 | 0,74 | 0,16 |
| Areia | m^3 | 0,015 | 0,01 | 0,00 |
| Cerâmica para bloco | kg | 50,00 | 0,23 | 1,15 |
| | | | Total | 1,39 |

Fonte: Autor (2021).

Tabela 8 – Vida útil de projeto de cada serviço.

| SERVIÇO/MATERIAL | VIDA ÚTIL DE PROJETO (ANOS) |
|---------------------------------------------------|-----------------------------|
| PAREDES | |
| Emboço argamassa (cimento, cal, areia) | 100 |
| Bloco cerâmico vazado | 100 |
| Bloco cerâmico maciço | 100 |
| Bloco concreto vazado | 100 |
| Revestimento cerâmico | 50 |
| Argamassa colante | 50 |
| PISOS | |
| Argamassa (cimento, areia) | 100 |
| Argamassa colante | 50 |
| Revestimento cerâmico | 50 |
| Revestimento de madeira | 100 |
| COBERTURA | |
| Telha cerâmica | 60 |
| Telha concreto | 60 |
| Telha Fibrocimento | 60 |
| Telha alumínio | 100 |
| JANELA | |
| Alumínio | 100 |
| Aço | 50 |
| PVC | 30 |
| Madeira | 50 |
| PORTA | |
| Alumínio | 100 |
| Aço | 50 |
| PVC | 30 |
| Madeira | 50 |
| ESTRUTURA | |
| Concreto armado (concreto fck= 25 MPa e Aço CA50) | 100 |

Fonte: Autor, adaptado da norma ABNT ISSO NBR ISO 15575-1 (2021).

6.4 CUSTO DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS

O custo calculado para os serviços que constam na planilha CasaCO foi calculado de forma análoga ao cálculo feito para a etapa de levantamento de CO₂. Dessa forma, o custo para cada serviço é obtido através da Equação 4:

$$Custo_s = \sum_{x=1}^x (Q_x \times Custo_{un,s}) \quad (4)$$

Onde:

$Custo_s$: custo de um serviço “s”, em R\$/m².cm (etapas de parede e piso) ou R\$/m² (demais etapas);

Q_x : consumo de um material “x” de cada serviço, em unidade de material/unidade de serviço;

$Custo_{un,s}$: custo atribuído a cada material que compõe o serviço, em R\$/unidade de material.

O custo final atribuído a uma etapa construtiva é calculado com base na Equação 1, baseada na fórmula presente na norma europeia ISO 15686 (2017) para cálculo de custo de ciclo de vida (CCV), adotando-se uma taxa de desconto. A taxa adotada foi de 5%, em linha com a literatura e dados já citados neste trabalho.

Todos os valores de consumo de materiais foram obtidos na publicação TCPO (TCPO, 2010). Os preços dos insumos foram extraídos da tabela Sinapi (SINAPI, 2020), na sua versão desonerada. Os resultados foram obtidos, assim como no levantamento da quantidade de CO₂ embutido das edificações, considerando-se também a influência do fator tempo, isto é, efetuando-se as substituições de partes da obra que ocorrem em sua manutenção, de acordo com a vida útil de cada uma. Assim, para períodos longos, como entre 100 e 200 anos, faz-se necessário prever o recurso financeiro total no presente que deveria estar disponível para atender às despesas futuras. Matematicamente significa que, ao invés de somar tudo que seria gasto em 100 anos, por exemplo, a preços de hoje, e considerar que este valor deveria já estar disponível no presente, deve-se considerar uma taxa de desconto, em função de juros que incidem sobre os valores monetários, para obter o valor monetário atual que cobrirá as necessidades da construção com o tempo. O Anexo B apresenta, com maior detalhe, as tabelas de composição unitária de custo por serviço.

6.5 PROPOSTA DE CRITÉRIO DE ESCOLHA DOS MATERIAIS

O critério proposto no presente trabalho, de escolha dos materiais a serem utilizados em uma edificação, se baseia nos quesitos quantidade de CO₂ embutido e custo. Como já mencionado, o objetivo é obter a construção mais amigável para o meio ambiente e, ao mesmo

tempo, buscar a de menor custo ou que seja possível dentro da realidade orçamentária do proprietário da obra. Assim, depara-se com uma questão de otimização desses dois parâmetros para equilibrá-los da melhor forma em um projeto.

A metodologia pensada foi a de atribuir pesos aos dois quesitos, para uma tomada de decisão quanto às escolhas de materiais das etapas da obra presentes na planilha CasaCO (paredes, pisos, cobertura, janelas e portas), avaliando-se a soma do CO₂ e do custo total das diferentes possibilidades de soluções construtivas. Os pesos serão atribuídos de modo a atender ao desejo ou necessidade do empreendedor de dar prioridade a um lado (ambiental) em detrimento do outro (financeiro) ou vice-versa, com a possibilidade, de considerar que os dois quesitos têm pesos iguais.

Inicialmente, a fim de padronizar os valores calculados pela planilha tanto de custo como de CO₂ das várias soluções construtivas de cada etapa das edificações, os números encontrados são transformados em valores proporcionais a 10. Assim, cada um dos dois aspectos recebe, para cada etapa de obra, separadamente, uma “nota” que varia de 0 a 10, com a nota máxima para a solução de maior custo (a pior delas), o mesmo acontecendo para solução que tem maior quantidade de CO₂. Isto permitirá identificar e comparar mais facilmente as soluções em termos proporcionais, em busca, sempre, daquelas de menor nota. Em seguida, para se avaliar os dois critérios conjuntamente, calcula-se uma média ponderada com a distribuição de pesos para cinco cenários diferentes, que vão do equilíbrio (peso igual para custo e CO₂) até dois extremos opostos (peso 100% para um dos parâmetros e 0% para o outro e vice-versa), passando por níveis intermediários (75%/25% e 25%/75%) - Figura 12. Estes cenários foram pensados para atender tanto a questões objetivas, como a disponibilidade de recursos financeiros para realizar uma obra, a disponibilidade local de materiais e a sazonalidade de preços, entre outros exemplos, como a questões subjetivas, como a sensibilidade de um empreendedor para a causa ambiental.

Figura 12 - Cenários propostos no estudo.

Cenários de pesos CO₂/Custo

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0/100 | 25/75 | 50/50 | 75/25 | 100/0 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|



Aumenta a preocupação com o quesito meio ambiente
 Diminui o peso do fator custo nas decisões

Fonte: Autor (2021).

A Tabela 9 – Exemplo de cálculo de notas para CO₂ e custo de duas partes de uma edificação - paredes e pisos e a Tabela 10 – Exemplo de cálculo da média ponderada das notas para CO₂ e custo de duas partes de uma edificação, de acordo com os cenários de pesos. Ilustram dois exemplos de cálculos das “notas” e das médias ponderadas da planilha. As células de fundo escurecido mostram as menores notas, ou seja, as melhores soluções.

Tabela 9 – Exemplo de cálculo de notas para CO₂ e custo de duas partes de uma edificação - paredes e pisos.

| Paredes | Quantidade (m ²) | CO₂ | | | CUSTO | | |
|----------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------|--------------------|-------------|---------------|
| | | CO ₂ /m ² | CO ₂ total (kg) | Nota 1 | R\$/m ² | Custo total | Nota 2 |
| A | 250 | 65,00 | 16.250 | 10,00 | 12,00 | 3.000,00 | 4,00 |
| B | 250 | 40,00 | 10.000 | 6,15 | 25,00 | 6.250,00 | 8,33 |
| C | 250 | 32,00 | 8.000 | 4,92 | 18,00 | 4.500,00 | 6,00 |
| D | 250 | 55,00 | 13.750 | 8,46 | 30,00 | 7.500,00 | 10,00 |

| Pisos | Quantidade (m ²) | CO ₂ /m ² | CO ₂ total (kg) | Nota 1 | R\$/m ² | Custo total | Nota 2 |
|--------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------|--------------------|-------------|---------------|
| E | 100 | 20,00 | 2.000 | 5,00 | 30,00 | 3.000,00 | 2,50 |
| F | 100 | 26,00 | 2.600 | 6,50 | 120,00 | 12.000,00 | 10,00 |
| G | 100 | 33,00 | 3.300 | 8,25 | 40,00 | 4.000,00 | 3,33 |
| H | 100 | 40,00 | 4.000 | 10,00 | 60,00 | 6.000,00 | 5,00 |

Fonte: Autor (2021).

Tabela 10 – Exemplo de cálculo da média ponderada das notas para CO₂ e custo de duas partes de uma edificação, de acordo com os cenários de pesos.

| Nota final (média ponderada Nota 1 e Nota 2) | | | | | |
|-----------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Pesos (CO₂/Custo) | | | | | |
| | 0/100 | 25/75 | 50/50 | 75/25 | 100/0 |
| Paredes | | | | | |
| A | 4,00 | 5,50 | 7,00 | 8,50 | 10,00 |
| B | 8,33 | 7,79 | 7,24 | 6,70 | 6,15 |
| C | 6,00 | 5,73 | 5,46 | 5,19 | 4,92 |
| D | 10,00 | 9,62 | 9,23 | 8,85 | 8,46 |
| | | | | | |
| Pisos | | | | | |
| E | 2,50 | 3,13 | 3,75 | 4,38 | 5,00 |
| F | 10,00 | 9,13 | 8,25 | 7,38 | 6,50 |
| G | 3,33 | 4,56 | 5,79 | 7,02 | 8,25 |
| H | 5,00 | 6,25 | 7,50 | 8,75 | 10,00 |

Fonte: Autor (2021).

A partir da sequência de cálculos mostrada, a soma das quantidades de CO₂ e de custo de todas as etapas de uma obra, considerando as melhores soluções de cada cenário, poderá ser obtida para avaliação final – Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 11 – Exemplo de tabela com somatórios de CO₂ e de custo para várias partes da obra, considerando as melhores soluções de cada cenário.

| Menores valores de CO₂ embutido total e custo total da obra calculados de acordo com os cenários de pesos (proporção CO₂/Custo) | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|
| | 0/100 | | 25/75 | | 50/50 | | 75/25 | | 100/0 | |
| | CO₂ (kg) | Custo (R\$) |
| Paredes | | | | | | | | | | |
| A | 16.250,0 | 3.000,0 | 16.250,0 | 3.000,0 | - | - | - | - | - | - |
| B | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| C | - | - | - | - | 8.000,0 | 4.500,0 | 8.000,0 | 4.500,0 | 8.000,0 | 4.500,0 |
| D | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Pisos | | | | | | | | | | |
| E | 2.000,0 | 3.000,0 | 2.000,0 | 3.000,0 | 2.000,0 | 3.000,0 | 2.000,0 | 3.000,0 | 2.000,0 | 3.000,0 |
| F | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| G | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| H | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Cobertura | | | | | | | | | | |
| I | - | - | - | - | - | - | - | - | 1.500,0 | 5.000,0 |
| J | 1.875,0 | 1.750,0 | 1.875,0 | 1.750,0 | 1.875,0 | 1.750,0 | 1.875,0 | 1.750,0 | - | - |
| K | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| L | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Portas | | | | | | | | | | |
| M | - | - | - | - | - | - | - | - | 40,0 | 9.000,0 |
| N | 220,0 | 3.000,0 | 220,0 | 3.000,0 | 220,0 | 3.000,0 | 220,0 | 3.000,0 | - | - |
| O | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| P | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Janelas | | | | | | | | | | |
| Q | - | - | - | - | - | - | - | - | 150,0 | 10.000,0 |
| R | 240,0 | 6.250,0 | 240,0 | 6.250,0 | 240,0 | 6.250,0 | 240,0 | 6.250,0 | - | - |
| S | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| T | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SOMA | 20.585 | 17.000 | 20.585 | 17.000 | 12.335 | 18.500 | 12.335 | 18.500 | 11.690 | 31.500 |

Fonte: Autor (2021).

Tabela 12 – Resumo de quantidades totais de CO₂ e custo total de uma obra, considerando as melhores soluções para cada cenário de pesos estudado.

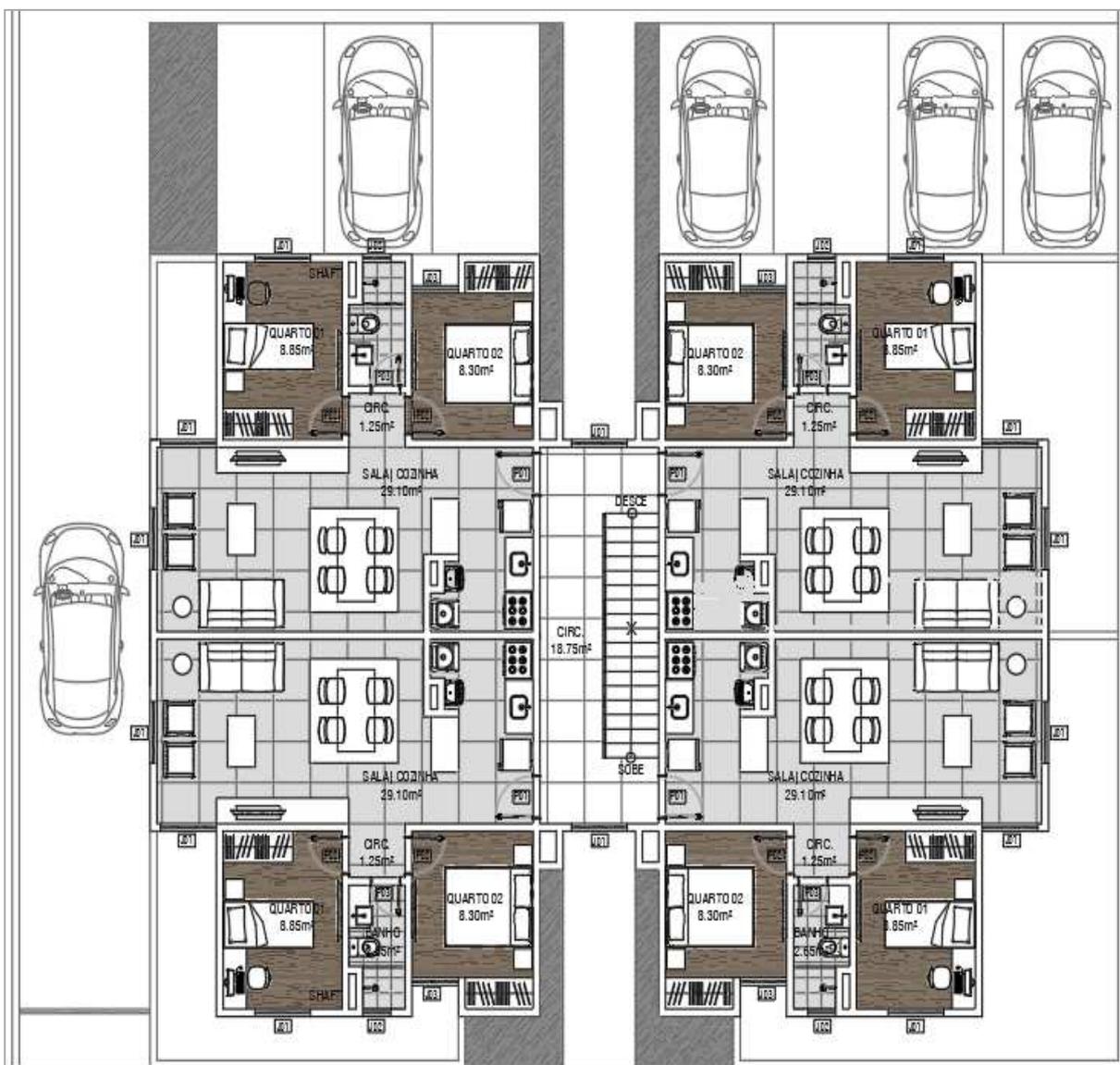
| Cenários | CO₂ (kg) | CUSTO (R\$) |
|-----------------|----------------------------|--------------------|
| 0/100 | 20.585 | 17.000,00 |
| 25/75 | 20.585 | 17.000,00 |
| 50/50 | 12.335 | 18.500,00 |
| 75/25 | 12.335 | 18.500,00 |
| 100/0 | 11.690 | 31.500,00 |

Fonte: Autor (2021).

7. APLICAÇÃO DO MÉTODO – ESTUDO DE CASO

No presente capítulo é demonstrada uma aplicação do método de escolha de soluções construtivas em um estudo de caso, um projeto de edifício residencial de porte médio – quatro pavimentos – de aproximadamente 1000 m² de área construída. O projeto foi cedido por uma empresa do mercado de construção civil de Juiz de Fora – MG e pode ser observado, na planta baixa da Figura 13. Desta maneira, foi possível se basear em quantidades reais de serviços das etapas analisadas na planilha CasaCO – paredes, pisos, cobertura, portas, janelas e estrutura, mostradas na Tabela 13.

Figura 13 – Planta baixa pavimento tipo do edifício.



Fonte: Autor (2021).

Os cálculos foram feitos, inicialmente para obtenção da quantidade de CO₂ embutido total e do custo total do projeto relacionados aos materiais, considerando-se cinco combinações de soluções construtivas diferentes para as etapas construtivas trabalhadas pela planilha CasaCO. As combinações foram obtidas a partir da escolha de uma de referência, seguindo-se quatro variações com alteração dos materiais das etapas, uma de cada vez. Os totais de CO₂ e de custo das opções construtivas foram, também, relacionados à área construída das edificações e ao seu tempo de vida útil adotado, obtendo-se um parâmetro de comparação uniforme, em kgCO₂/m².ano. A Tabela 13 mostra as configurações das edificações (a célula de fundo escurecido destaca a solução construtiva alterada, em relação à edificação de referência).

A Tabela 13 mostra a montagem de cinco edificações, com combinações diferentes das partes calculadas na planilha CasaCO (paredes, pisos, cobertura, janelas, portas e estrutura), assim como as quantidades de serviços extraídas do projeto do estudo de caso da Figura 13. A Edificação 1 foi tomada como referência e, para as demais, foram feitas alterações de partes da construção, conforme a seguir:

- Edificação 1: alvenaria de bloco cerâmico vazado, piso cerâmico e em tacos de madeira, cobertura de telha cerâmica, janelas e portas de madeira;
- Edificação 2: alvenaria de bloco de concreto, piso cerâmico e em tacos de madeira, cobertura de telha cerâmica, janelas e portas de madeira;
- Edificação 3: alvenaria de bloco cerâmico vazado, piso cerâmico, cobertura de telha cerâmica, janelas e portas de madeira;
- Edificação 4: alvenaria de bloco cerâmico vazado, piso cerâmico e em tacos de madeira, cobertura de telha de concreto, janelas e portas de madeira;
- Edificação 5: alvenaria de bloco cerâmico vazado, piso cerâmico e em tacos de madeira, cobertura de telha cerâmica, janelas e portas de alumínio.

Tabela 13 – Configurações das Edificações para o Estudo de Caso.

| Área construída (m ²): | EDIFICAÇÃO 1 | | EDIFICAÇÃO 2 | | EDIFICAÇÃO 3 | | EDIFICAÇÃO 4 | | EDIFICAÇÃO 5 | |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------|------|
| | 1000 | | 1000 | | 1000 | | 1000 | | 1000 | |
| Vida útil estimada (anos): | 100 | | 100 | | 100 | | 100 | | 100 | |
| PAREDES 1 (m²) | Emboço + bloco cerâmico vazado + emboço | 1500 | Emboço + bloco concreto + emboço | 1500 | Emboço + bloco cerâmico vazado + emboço | 1500 | Emboço + bloco cerâmico vazado + emboço | 1500 | Emboço + bloco cerâmico vazado + emboço | 1500 |
| PAREDES 2 (m²) | Emboço + bloco cerâmico vazado + emboço + arg. colante + rev. cerâmico | 600 | Emboço + bloco concreto + emboço + arg. colante + rev. cerâmico | 600 | Emboço + bloco cerâmico vazado + emboço + arg. colante + rev. cerâmico | 600 | Emboço + bloco cerâmico vazado + emboço + arg. colante + rev. cerâmico | 600 | Emboço + bloco cerâmico vazado + emboço + arg. colante + rev. cerâmico | 600 |
| PISOS 1 (m²) | Argamassa + cola + madeira | 700 | Argamassa + cola + madeira | 700 | Argamassa + cola + cerâmica | 700 | Argamassa + cola + madeira | 700 | Argamassa + cola + madeira | 700 |
| PISOS 2 (m²) | Argamassa + cola + cerâmica | 200 |
| COBERTURA (m²) | Telha cerâmica | 300 | Telha cerâmica | 300 | Telha cerâmica | 300 | Telha concreto | 300 | Telha cerâmica | 300 |
| JANELA (m²) | Madeira | 100 | Madeira | 100 | Madeira | 100 | Madeira | 100 | Alumínio | 100 |
| PORTA (m²) | Madeira | 90 | Madeira | 90 | Madeira | 90 | Madeira | 90 | Alumínio | 90 |
| Estrutura (m³) | Concreto armado (concreto fck 25Mpa e aço CA 50) | 160 | Concreto armado (concreto fck 25Mpa e aço CA 50) | 160 | Concreto armado (concreto fck 25Mpa e aço CA 50) | 160 | Concreto armado (concreto fck 25Mpa e aço CA 50) | 160 | Concreto armado (concreto fck 25Mpa e aço CA 50) | 160 |

Fonte: Autor (2021).

Como a metodologia e a planilha CasaCO preveem, nos cálculos de CO₂ embutido e do custo, as trocas de partes da construção em função de sua vida útil e da vida útil da edificação, foram adotados valores de norma técnica brasileira para os primeiros, conforme já apresentado na Tabela 8, e 100 anos para as edificações. A vida útil de 100 anos foi definida por se tratar de um valor condizente, de certa forma, com a realidade brasileira, em que não está presente uma forte cultura de preservação de construções antigas, de dois ou mais séculos de existência, mas permite encontrar e projetar edificações para um século de uso e funcionamento.

A apresentação dos resultados iniciais, em forma de gráficos, foi organizada da seguinte maneira:

- Quantidades totais e por etapa construtiva do CO₂ embutido das cinco edificações;
- Distribuição percentual da quantidade de CO₂ por etapa construtiva das cinco edificações;
- Comparação entre as edificações usando-se o parâmetro uniforme, expresso em kgCO₂/m².ano;
- Custo total e por etapa construtiva das cinco edificações;
- Distribuição percentual do custo por etapa construtiva das cinco edificações;
- Comparação entre as edificações usando-se o parâmetro uniforme, expresso em R\$/m².ano.

A metodologia combina, em seguida, os resultados dos quesitos CO₂ e custo, para interpretação, apresentando-os da seguinte maneira:

- Gráfico de colunas e linhas (dois eixos verticais), com as quantidades de CO₂ e custo totais e por etapas das cinco soluções de edificações.

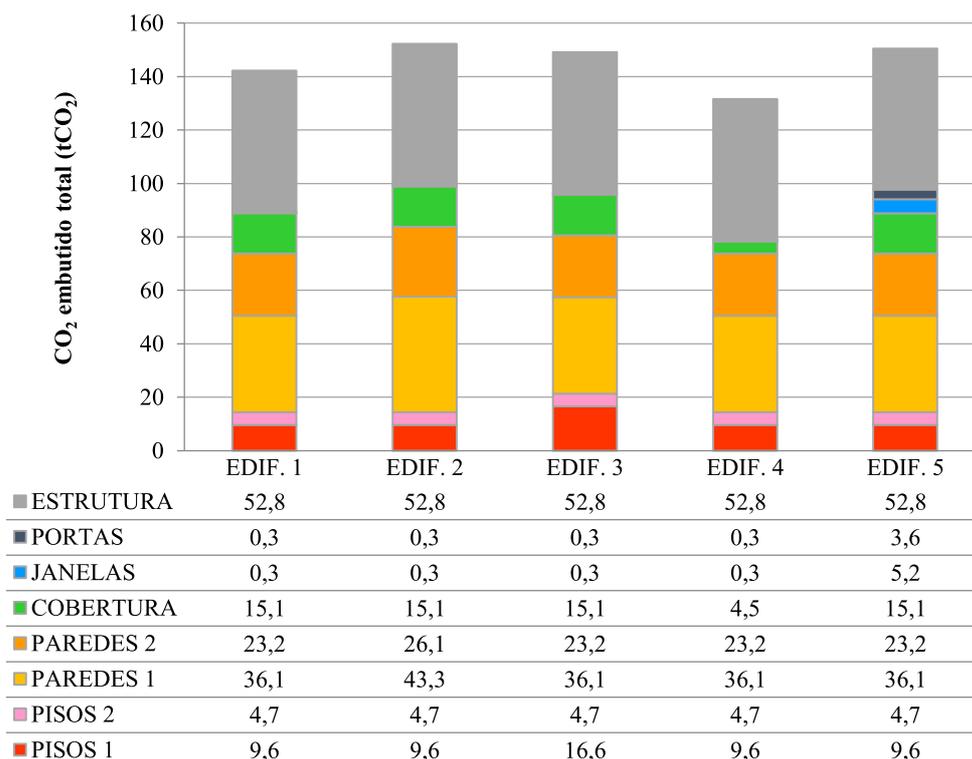
A combinação dos dois quesitos em um só gráfico tem o objetivo de demonstrar que os quesitos ambiental e de custo de soluções construtivas não obedecem a uma mesma tendência de aumento ou economia quando se fazem escolhas de soluções construtivas. Assim, em seguida, aplicou-se a atribuição de “notas” (base 10) para as soluções construtivas de cada etapa e, finalmente, foram montados os cinco cenários de pesos e suas respectivas médias ponderadas. Com o quadro das melhores soluções encontradas para cada cenário, foi possível extrair da planilha CasaCO os valores calculados da quantidade de CO₂ e de custo de cada uma para, enfim, efetuando-se a soma das etapas, obter o total de cada quesito por cenário.

8. RESULTADOS E ANÁLISE

No presente capítulo são apresentados os resultados relativos ao estudo de caso de um prédio, efetuado a fim de aplicar a metodologia proposta na dissertação, de escolha de soluções construtivas para edificações.

O Gráfico 4 apresenta a quantidade total, em tCO₂ embutido, para cada edificação e cada uma de suas partes. O valor total de CO₂ embutido para a Edificação 1 foi de 142,1 tCO₂, enquanto a média para as cinco edificações foi de 145,0 tCO₂. A edificação com maior valor total foi a número dois (152,2 tCO₂), devido à substituição de bloco cerâmico vazado por bloco de concreto na alvenaria, em relação à Edificação 1. A Edificação 4, na qual foi feita a substituição de telhas cerâmicas por telhas de concreto, apresentou a menor quantidade, 131,5 tCO₂.

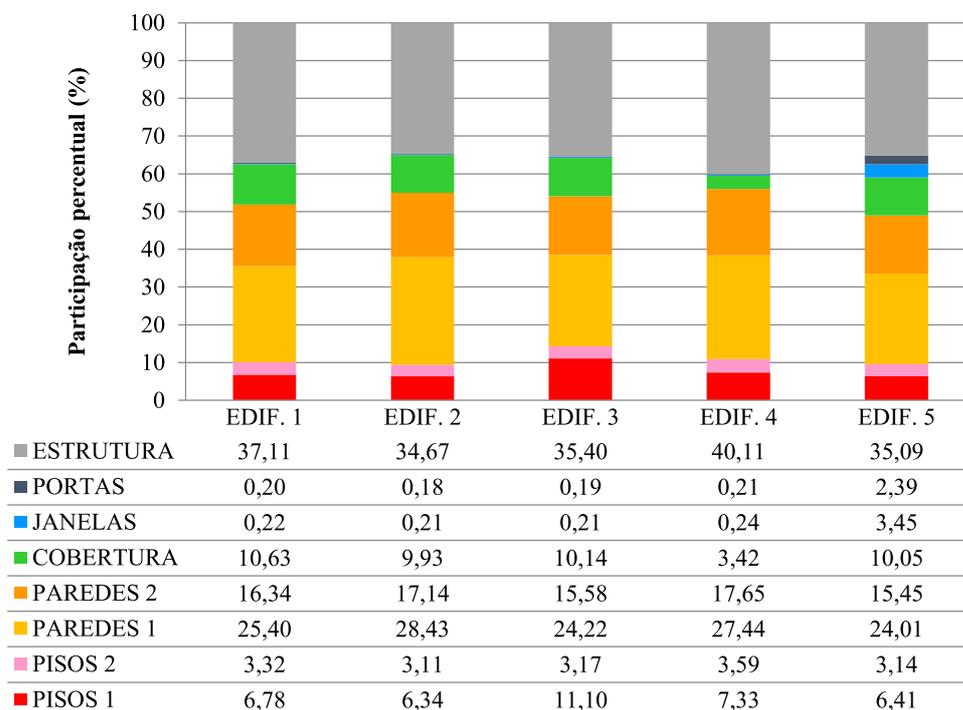
Gráfico 4 – Resultado comparativo – CO₂ embutido total por edificação.



Fonte: Autor (2021).

O Gráfico 5 apresenta o impacto percentual de cada etapa construtiva no total de CO₂ embutido de cada uma das cinco edificações montadas.

Gráfico 5 – Participação percentual por partes dos edifícios.



Fonte: Autor (2021).

Observa-se que, estrutura e paredes representam as maiores participações percentuais, de 36,48% e 42,33%, em média, respectivamente. Essa ocorrência se justifica tanto pelo valor de CO₂ associado aos materiais envolvidos, quanto pela elevada participação dessas etapas em termos de quantidade de serviço, em relação ao total das edificações.

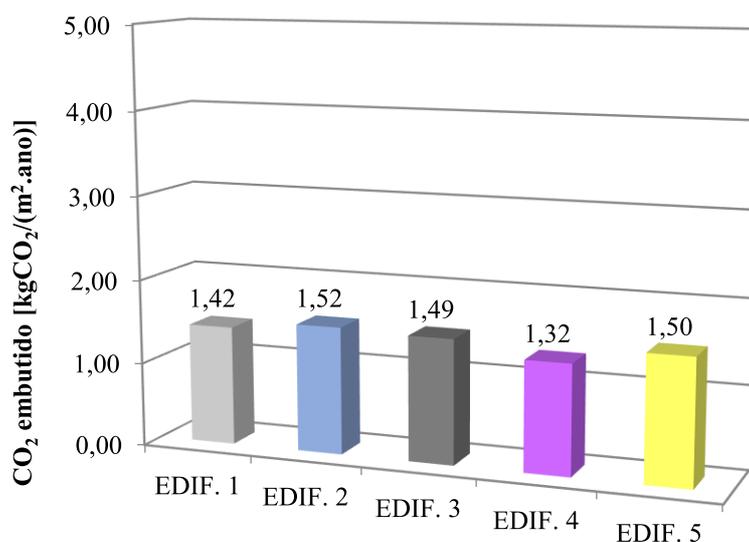
A substituição de maior impacto percentual foi a mudança de esquadrias de madeira para alumínio. Apesar de uma maior vida útil do alumínio, estimada em cem anos, o uso da madeira se mostrou uma alternativa de menor quantidade de CO₂ embutido ao longo do tempo, mesmo com maior número de substituições. Portas e janelas de madeira apresentaram juntas, em média, uma participação de 0,42% nas emissões das edificações. Com o uso do alumínio nas esquadrias, esse percentual subiu para 5,84% na Edificação 5.

O Gráfico 6 exhibe, para cada uma das cinco edificações, um resultado numérico que representa a quantidade total de CO₂ embutido, em kg, dividida pela área construída, em m², por ano. O resultado desse cálculo, portanto, é dado em kgCO₂/m².ano.

O principal objetivo desse gráfico é comparar as configurações de edifícios considerando a área construída e o tempo. No presente estudo, que busca comparar apenas materiais diferentes, valores de área construída e vida útil estimada foram mantidos constantes para as cinco edificações, variando, naturalmente, o índice de CO₂ embutido de cada material.

A Edificação 1, de referência, teve o resultado de 1,42 kgCO₂embutido/m².ano. A edificação de maior resultado foi a Edificação 2, que teve a alvenaria de bloco cerâmico vazado alterada para alvenaria de bloco de concreto, em relação à Edificação 1. A de menor resultado foi a Edificação 4, na qual trocou-se a cobertura de telha cerâmica para a cobertura de telha de concreto, em relação à Edificação 1.

Gráfico 6 – Quantidade de CO₂ embutido, por m² de área construída, por ano, das cinco edificações estudadas.

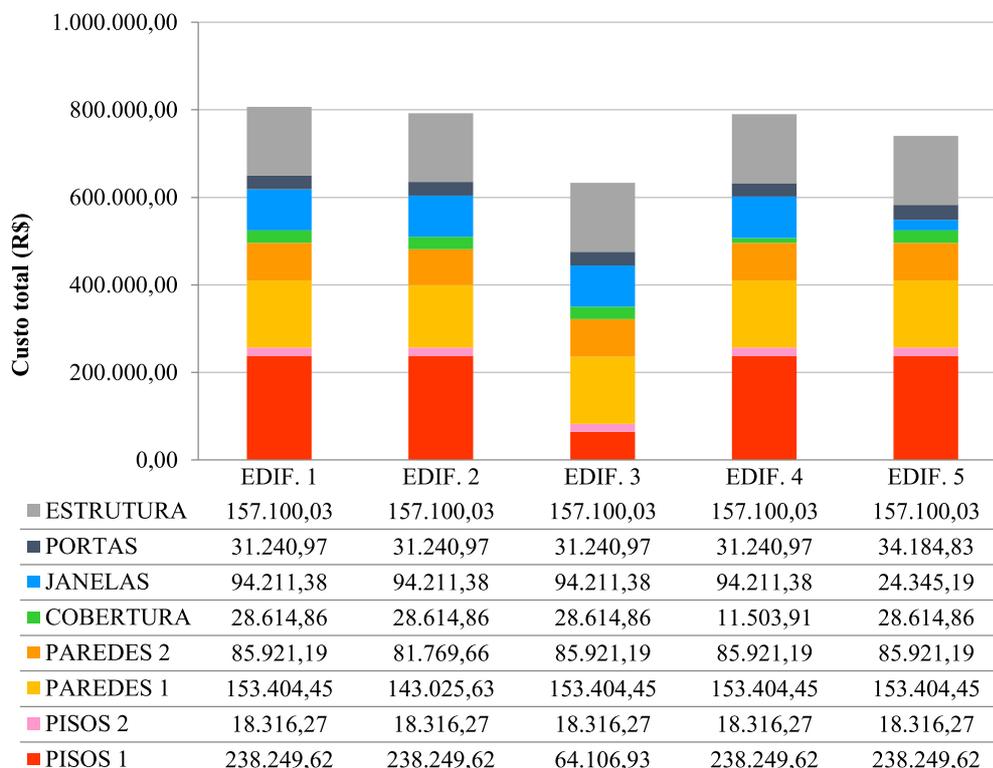


Fonte: Autor (2021).

O Gráfico 7, o Gráfico 8 e o Gráfico 9 apresentam os resultados dos cálculos de custo das cinco configurações de edificações estudadas.

O Gráfico 7 exibe o custo total e o custo das etapas construtivas de cada configuração de edificação analisada. O custo obtido para a Edificação 1, definida como referência, foi de R\$ 807.058,77 e foi o maior valor entre todas. A média de custo das cinco edificações foi de R\$ 752.517,51. A Edificação 3 apresentou o menor custo devido à substituição do piso de taco de madeira por piso cerâmico, registrando um valor total de R\$ 632.916,08.

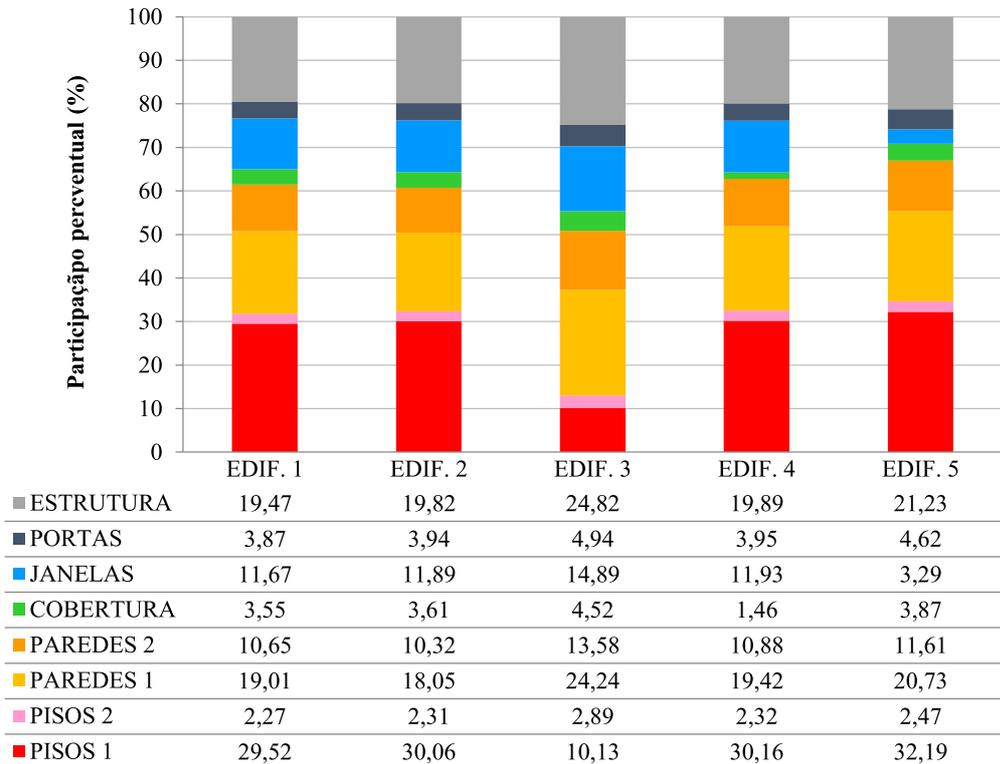
Gráfico 7 – Custo total por edificação e por etapa construtiva das edificações analisadas.



Fonte: Autor (2021).

O Gráfico 8 apresenta a distribuição percentual das etapas construtivas das edificações. No geral, estrutura, alvenaria e piso se destacaram com os maiores percentuais, alcançando 80%, somadas, para a Edificação 1. Observa-se, na Edificação 3, na qual foi feita substituição de piso de madeira por piso cerâmico, que o custo do piso diminuiu acentuadamente, sendo a mudança percentual mais representativa por etapa.

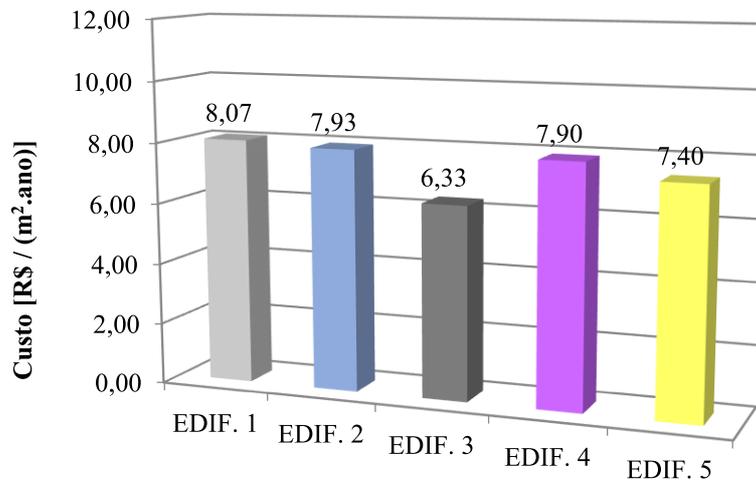
Gráfico 8 – Participação percentual de custo por partes dos edifícios.



Fonte: Autor (2021).

A comparação entre edificações considerando-se sua área construída e vida útil, constantes em todas elas, é mostrada no Gráfico 9, em R\$/m².ano. O valor médio encontrado foi de R\$ 7,53/m².ano.

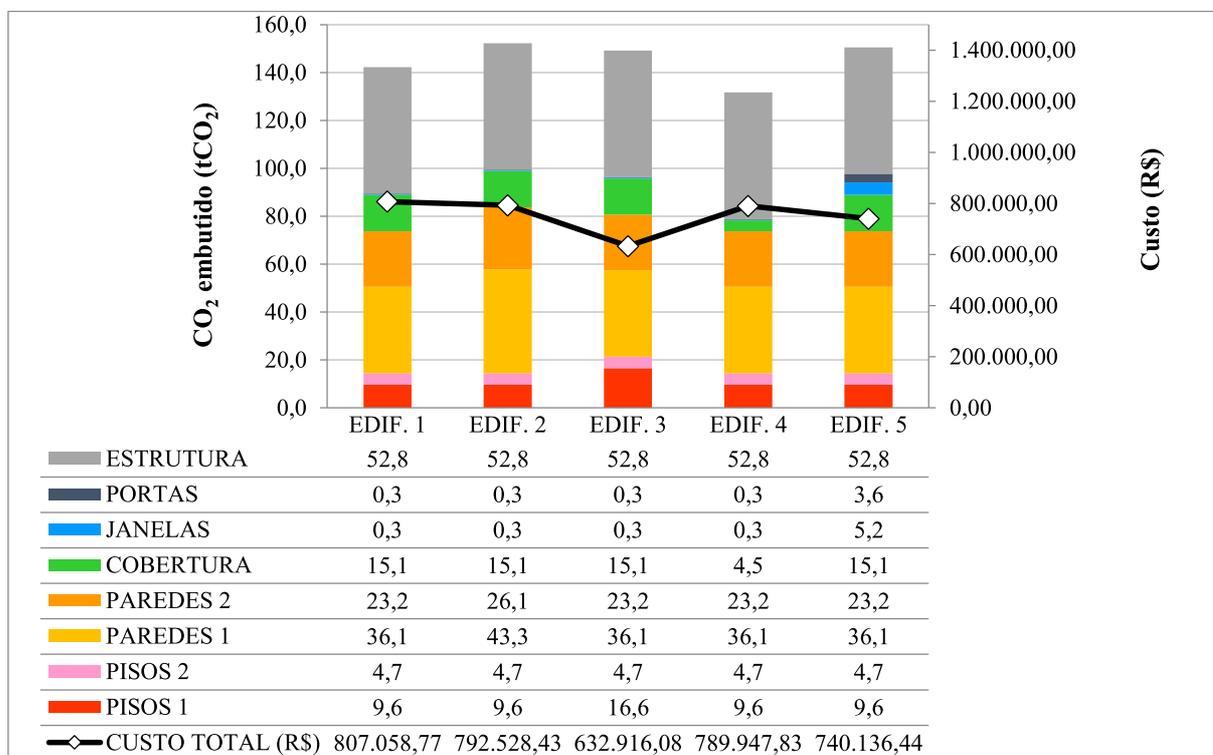
Gráfico 9 – Resultado comparativo para custo.



Fonte: Autor (2021).

O Gráfico 10 apresenta todos os valores absolutos obtidos de CO₂ e custo, sintetizados em um único gráfico.

Gráfico 10 – Resultado comparativo de CO₂ embutido total e custo total das edificações estudadas.



Fonte: Autor (2021).

Ressalta-se que, mesmo sendo possível observar o impacto da substituição de um material por outro em um edifício, é difícil concluir qual possibilidade de construção representa a melhor solução em termos financeiros e ambientais. O Edifício 3 que é o de menor custo, apresenta um dos maiores valores de CO₂ embutido. O mesmo ocorre para o Edifício 4, que apresenta o melhor resultado para o quesito ambiental, porém custo próximo ao mais alto. É natural que os materiais apresentem boa performance em um aspecto e não sejam os melhores em outro.

8.1 RESULTADOS DOS CENÁRIOS PROPOSTOS

A Tabela 14 apresenta o resultado obtido para as três diferentes configurações de parede sem revestimento cerâmico. De forma isolada, a menor emissão de CO₂ embutido é a da parede de bloco cerâmico vazado, enquanto a parede de bloco de concreto é a de menor custo. No estudo de cenários, a Tabela 15 demonstra que, naqueles que privilegiam o aspecto econômico (0/100 e 25/75), a parede formada por bloco de concreto se destaca, com as menores (melhores)

notas, enquanto no cenário de equilíbrio (50/50) e nos cenários com maior peso para o aspecto ambiental, a parede de bloco cerâmico vazado se apresenta como melhor solução. Em nenhum aspecto a parede de bloco cerâmico maciço obteve os melhores indicadores, uma vez que seu custo é maior, assim como a sua quantidade de CO₂ embutido.

Tabela 14 – Notas para CO₂ embutido e custo de paredes sem revestimento cerâmico.

| Notas para soluções construtivas | | | | | | | |
|------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------|--------------------|-------------|---------------|
| Paredes 1 | Quantidade (m ²) | CO₂ | | | CUSTO | | |
| | | CO ₂ /m ² | CO ₂ total | Nota 1 | R\$/m ² | Custo total | Nota 2 |
| Emboço + Bloco cerâmico vazado + Emboço | 1.500 | 24,08 | 36.124 | 4,43 | 102,27 | 153.404,45 | 7,55 |
| Emboço + Bloco de concreto + Emboço | 1.500 | 28,86 | 43.291 | 5,31 | 95,35 | 143.025,63 | 7,04 |
| Emboço + Bloco cerâmico maciço + Emboço | 1.500 | 54,37 | 81.562 | 10,00 | 135,46 | 203.182,85 | 10,00 |

Fonte: Autor (2021).

Tabela 15 – Média ponderada das notas para CO₂ embutido e custo de paredes sem revestimento cerâmico.

| Nota final (média ponderada Nota 1 e Nota 2) | | | | | |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Paredes 1 | Cenários de pesos CO₂/Custo | | | | |
| | 0/100 | 25/75 | 50/50 | 75/25 | 100/0 |
| Emboço + Bloco cerâmico vazado + Emboço | 7,55 | 6,77 | 5,99 | 5,21 | 4,43 |
| Emboço + Bloco de concreto + Emboço | 7,04 | 6,61 | 6,18 | 5,74 | 5,31 |
| Emboço + Bloco cerâmico maciço + Emboço | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 |

Fonte: Autor (2021).

A Tabela 16 exibe o resultado obtido para as três configurações de parede com a adição de argamassa colante e revestimento cerâmico em um dos lados. Como foram adicionadas camadas iguais nas três configurações de parede, as paredes de menor quantidade de CO₂ embutido e de menor custo continuaram as mesmas (bloco cerâmico vazado e bloco de concreto, respectivamente). A mesma análise pode ser feita para o estudo de cenários, como mostra a Tabela 17.

Tabela 16 – Notas para CO₂ embutido e custo de paredes com revestimento cerâmico.

| Notas para soluções construtivas | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------|--------------------|-------------|---------------|
| Paredes 2 (adição de rev. cerâmico) | Quantidade (m ²) | CO₂ | | | CUSTO | | |
| | | CO ₂ /m ² | CO ₂ total | Nota 1 | R\$/m ² | Custo total | Nota 2 |
| Emboço + Bloco cerâmico vazado + Emboço + Rev. cerâmico | 600 | 38,73 | 23.236 | 5,61 | 143,20 | 85.921,19 | 8,12 |
| Emboço + Bloco de concreto + Emboço + Rev. cerâmico | 600 | 43,50 | 26.103 | 6,30 | 136,103 | 81.769,66 | 7,73 |
| Emboço + Bloco cerâmico maciço + Emboço + Rev. cerâmico | 600 | 69,02 | 41.411 | 10,00 | 176,39 | 105.832,55 | 10,00 |

Fonte: Autor (2021).

Tabela 17 – Média ponderada das notas para CO₂ embutido e custo de paredes com revestimento cerâmico.

| Nota final (média ponderada Nota 1 e Nota 2) | | | | | |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Parede 2 (adição de rev. cerâmico) | Cenários de pesos CO₂/Custo | | | | |
| | 0/100 | 25/75 | 50/50 | 75/25 | 100/0 |
| Emboço + Bloco cerâmico vazado + Emboço | 8,12 | 7,49 | 6,87 | 6,24 | 5,61 |
| Emboço + Bloco de concreto + Emboço | 7,73 | 7,37 | 7,02 | 6,66 | 6,30 |
| Emboço + Bloco cerâmico maciço + Emboço | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 |

Fonte: Autor (2021).

A Tabela 18 apresenta as notas para as duas opções de piso (tacos de madeira e revestimento cerâmico). A configuração de taco de madeira apresenta menor quantidade de CO_{2emb}, enquanto o piso cerâmico é o de menor custo.

A Tabela 19 mostra as notas finais de acordo com cada cenário, para os quais a opção de piso cerâmico é mais vantajosa quando se privilegiam os custos (cenários 0/100 e 25/75) e para o cenário de equilíbrio (50/50). O piso de madeira é o de melhor resultado para cenários que optam pela redução de impacto ambiental (75/25 e 100/0).

Tabela 18 – Notas para CO₂ embutido e custo de pisos.

| Notas para soluções construtivas | | | | | | | |
|--------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------|--------------------|-------------|---------------|
| Piso 1 | Quantidade (m ²) | CO₂ | | | CUSTO | | |
| | | CO ₂ /m ² | CO ₂ total | Nota 1 | R\$/m ² | Custo total | Nota 2 |
| Contrapiso + Cola + Rev. cerâmico | 700 | 23,64 | 16.551 | 10,00 | 91,58 | 64.106,93 | 2,69 |
| Contrapiso + Cola + Taco de madeira | 700 | 13,79 | 9.650 | 5,83 | 340,36 | 238.249,62 | 10,00 |

Fonte: Autor (2021).

Tabela 19 – Média ponderada das notas para CO₂ embutido e custo de pisos.

| Nota final (média ponderada Nota 1 e Nota 2) | | | | | |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Piso 1 | Cenários de pesos CO₂/Custo | | | | |
| | 0/100 | 25/75 | 50/50 | 75/25 | 100/0 |
| Contrapiso + Cola + Rev. cerâmico | 2,69 | 4,52 | 6,35 | 8,17 | 10,00 |
| Contrapiso + Cola + Taco de madeira | 10,00 | 8,96 | 7,92 | 6,87 | 5,83 |

Fonte: Autor (2021).

A Tabela 20 exibe as notas para quatro opções de materiais de cobertura. A cobertura com telhas de alumínio apresentou menor quantidade de emissões de CO₂ embutido, enquanto telhas de cerâmica foram as de maior impacto. Sob o aspecto financeiro, telhas de fibrocimento são as mais econômicas, enquanto as de alumínio foram as de maior custo. A Tabela 21 apresenta os materiais que obtiveram os melhores indicadores para cada cenário. Quando se privilegia apenas o aspecto financeiro (cenário 0/100), a telha de fibrocimento se apresenta como a melhor opção. Nos cenários intermediários (25/75, 50/50 e 75/25) a telha de concreto obteve o melhor indicador. Para o cenário que considera apenas o aspecto ambiental, telhas de alumínio se mostraram mais vantajosas.

Tabela 20 – Notas para CO₂ embutido e custo de materiais para cobertura.

| Notas para soluções construtivas | | | | | | | |
|-----------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------|--------------------|-------------|---------------|
| Cobertura | Quantidade (m ²) | CO₂ | | | CUSTO | | |
| | | CO ₂ /m ² | CO ₂ total | Nota 1 | R\$/m ² | Custo total | Nota 2 |
| Telha cerâmica | 300 | 50,40 | 15.120 | 10,00 | 95,38 | 28.614,86 | 7,02 |
| Telha de concreto | 300 | 15,02 | 4.505 | 2,98 | 38,35 | 11.503,91 | 2,82 |
| Telha de alumínio | 300 | 8,75 | 2.625 | 1,74 | 135,85 | 40.756,35 | 10,00 |
| Telha de fibrocimento | 300 | 45,95 | 13.786 | 9,12 | 31,10 | 9.329,32 | 2,29 |

Fonte: Autor (2021).

Tabela 21 – Média ponderada das notas para CO₂ embutido e custo de materiais para cobertura.

| Nota final (média ponderada Nota 1 e Nota 2) | | | | | |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Cobertura | Cenários de pesos CO₂/Custo | | | | |
| | 0/100 | 25/75 | 50/50 | 75/25 | 100/0 |
| Telha Cerâmica | 7,02 | 7,77 | 8,51 | 9,26 | 10,00 |
| Telha Concreto | 2,82 | 2,86 | 2,90 | 2,94 | 2,98 |
| Telha Alumínio | 10,00 | 7,94 | 5,87 | 3,81 | 1,74 |
| Telha Fibrocimento | 2,29 | 4,00 | 5,71 | 7,41 | 9,12 |

Fonte: Autor (2021).

A Tabela 22 apresenta os resultados obtidos no cálculo das notas para quatro opções de materiais para portas. Tanto sob o aspecto ambiental quanto sob o financeiro, a madeira se mostrou como a melhor opção, com destaque para o aspecto ambiental, em que apresentou grande diferença da quantidade de CO₂ embutido em comparação com os outros materiais. Na comparação de custos, a madeira se mostrou a opção mais barata, porém com valor próximo ao do alumínio. A Tabela 23 ilustra notas finais ponderadas para cada um dos cinco cenários, nos quais a madeira apresenta os melhores resultados.

Tabela 22 – Notas para CO₂ embutido e custo de materiais para portas.

| Notas para soluções construtivas | | | | | | | |
|-----------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------|--------------------|-------------|---------------|
| Portas | Quantidade (m ²) | CO₂ | | | CUSTO | | |
| | | CO ₂ /m ² | CO ₂ total | Nota 1 | R\$/m ² | Custo total | Nota 2 |
| Alumínio | 90 | 39,97 | 3.597 | 5,23 | 379,83 | 34.184,83 | 6,52 |
| Madeira | 90 | 3,12 | 281 | 0,41 | 347,12 | 31.240,97 | 5,96 |
| Aço | 90 | 27,80 | 2.502 | 3,64 | 582,57 | 52.431,52 | 10,00 |
| PVC | 90 | 76,37 | 6.873 | 10,00 | 566,40 | 50.975,85 | 9,72 |

Fonte: Autor (2021).

Tabela 23 – Média ponderada das notas para CO₂ embutido e custo de materiais para portas.

| Nota final (média ponderada Nota 1 e Nota 2) | | | | | |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Portas | Cenários de pesos CO₂/Custo | | | | |
| | 0/100 | 25/75 | 50/50 | 75/25 | 100/0 |
| Alumínio | 6,52 | 6,20 | 5,88 | 5,55 | 5,23 |
| Madeira | 5,96 | 4,57 | 3,19 | 1,80 | 0,41 |
| Aço | 10,00 | 8,41 | 6,82 | 5,23 | 3,64 |
| PVC | 9,72 | 9,79 | 9,86 | 9,93 | 10,00 |

Fonte: Autor (2021).

Completando a análise com a etapa esquadrias, os quatro materiais utilizados no estudo para portas também integraram o estudo de janelas. A madeira continuou se destacando como material de menor impacto ambiental, em termos de CO₂ embutido, como apresentado na Tabela 24. Quanto ao custo, o alumínio se mostrou como a alternativa mais econômica. A Tabela 25 exhibe as notas finais, em média ponderada, para cada material. O alumínio obteve os melhores indicadores para cenários que privilegiam o aspecto custo (0/100 e 25/75), enquanto a madeira se destacou no cenário de equilíbrio (50/50) e nos cenários que privilegiam a menor emissão de CO₂ (75/25 e 100/0). Devido às suas características relacionadas a fatores ambientais e aos custos, o PVC foi a alternativa com os piores indicadores em todos os cenários analisados.

Tabela 24 –Notas para CO₂ embutido e custo de materiais para janelas.

| Notas para soluções construtivas | | | | | | | |
|-----------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------|--------------------|-------------|---------------|
| Janelas | Quantidade (m ²) | CO₂ | | | CUSTO | | |
| | | CO ₂ /m ² | CO ₂ total | Nota 1 | R\$/m ² | Custo total | Nota 2 |
| Alumínio | 100 | 51,96 | 5196 | 6,36 | 243,45 | 24.345,19 | 1,50 |
| Madeira | 100 | 3,12 | 312 | 0,38 | 942,11 | 94.211,38 | 5,81 |
| Aço | 100 | 33,36 | 3.336 | 4,08 | 422,03 | 42.203,04 | 2,60 |
| PVC | 100 | 81,70 | 8.170 | 10,00 | 1.620,28 | 162.027,79 | 10,00 |

Fonte: Autor (2021).

Tabela 25 – Média ponderada das notas para CO₂ embutido e custo de janelas.

| Nota final (média ponderada Nota 1 e Nota 2) | | | | | |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Janelas | Cenários de pesos CO₂/Custo | | | | |
| | 0/100 | 25/75 | 50/50 | 75/25 | 100/0 |
| Alumínio | 1,50 | 2,72 | 3,93 | 5,15 | 6,36 |
| Madeira | 5,81 | 4,45 | 3,10 | 1,74 | 0,38 |
| Aço | 2,60 | 2,97 | 3,34 | 3,71 | 4,08 |
| PVC | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 |

Fonte: Autor (2021).

Por fim, o cálculo da quantidade de CO₂ embutido e de custos também foi realizado considerando as quantidades de serviço das etapas construtivas presentes no estudo de caso. Para a etapa de estruturas, apenas a opção concreto armado foi considerada, por se tratar da solução convencional, presente na grande maioria das obras de edificação brasileiras. A Tabela 26 exhibe a quantidade de CO_{2emb} e custos da etapa estrutura em concreto armado, levando-se em consideração estimativas de gastos para o prédio do estudo de caso.

Tabela 26 – Quantitativo da estimativa estrutural.

| Quantitativo estrutural | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------|--------------------|-------------|---------------|
| Estrutura | Quantidade (m ³) | CO₂ | | | CUSTO | | |
| | | CO ₂ /m ² | CO ₂ total | Nota 1 | R\$/m ² | Custo total | Nota 2 |
| Concreto armado (concreto fck 25 MPa e aço CA 50) | 160 | 329,93 | 52.788 | - | 918,88 | 157.100,03 | - |

Fonte: Autor (2021).

A Tabela 27 reúne as informações para a análise em conjunto dos cenários. Nessa tabela, as células estão preenchidas com os valores das melhores soluções de cada cenário. Na última linha, somando-se o conteúdo de cada coluna, obtém-se o custo total e a quantidade CO₂ de para cada cenário.

Tabela 27 – Valores totais de CO₂ embutido e de custo para todas as etapas construtivas, considerando as melhores soluções de cada cenário.

| Menores valores de CO ₂ embutido total e custo total da obra calculados de acordo com os cenários de pesos (proporção CO ₂ /Custo) | | | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| | 0/100 | | 25/75 | | 50/50 | | 75/25 | | 100/0 | |
| | CO ₂ (kg) | Custo (R\$) |
| PAREDES 1 | | | | | | | | | | |
| Cerâmico | - | - | - | - | 36.123,65 | 153.404,45 | 36.123,65 | 153.404,45 | 36.123,65 | 153.404,45 |
| Concreto | 43.290,79 | 143.025,63 | 43.290,79 | 143.025,63 | - | - | - | - | - | - |
| Cer. maciço | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| PAREDES 2 | | | | | | | | | | |
| Cerâmico | - | - | - | - | 23.235,80 | 85.921,19 | 23.235,80 | 85.921,19 | 23.235,80 | 85.921,19 |
| Concreto | 26.102,66 | 81.769,66 | 26.102,66 | 81.769,66 | - | - | - | - | - | - |
| Cer. maciço | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| PISO 1 | | | | | | | | | | |
| Cerâmica | 16.550,55 | 64.106,93 | 16.550,55 | 64.106,93 | 16.550,55 | 64.106,93 | - | - | - | - |
| Madeira | - | - | - | - | - | - | 9.649,81 | 238.249,62 | 9.649,81 | 238.249,62 |
| PISO 2 | | | | | | | | | | |
| Cerâmica | 4.728,73 | 18.316,27 | 4.728,73 | 18.316,27 | 4.728,73 | 18.316,27 | 4.728,73 | 18.316,27 | 4.728,73 | 18.316,27 |
| COBERTURA | | | | | | | | | | |
| Cerâmica | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Concreto | - | - | 4.504,83 | 11.503,91 | 4.504,83 | 11.503,91 | 4.504,83 | 11.503,91 | - | - |
| Alumínio | - | - | - | - | - | - | - | - | 2.624,63 | 40.756,35 |
| Fibrocimento | 13.786,20 | 9.329,32 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| PORTAS | | | | | | | | | | |
| Alumínio | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Madeira | 281,09 | 31.240,97 | 281,09 | 31.240,97 | 281,09 | 31.240,97 | 281,09 | 31.240,97 | 281,09 | 31.240,97 |
| Aço | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| PVC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| JANELAS | | | | | | | | | | |
| Alumínio | 5.195,97 | 24.345,19 | 5.195,97 | 24.345,19 | - | - | - | - | - | - |
| Madeira | - | - | - | - | 312,32 | 94.211,38 | 312,32 | 94.211,38 | 312,32 | 94.211,38 |
| Aço | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| PVC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| ESTRUTURA | | | | | | | | | | |
| Concreto | 52.788,34 | 157.100,03 | 52.788,34 | 157.100,03 | 52.788,34 | 157.100,03 | 52.788,34 | 157.100,03 | 52.788,34 | 157.100,03 |
| SOMA | 162.724,32 | 529.234,01 | 153.442,95 | 531.408,60 | 138.525,31 | 615.805,13 | 131.624,57 | 789.947,83 | 129.744,37 | 819.200,27 |

Fonte: Autor (2021).

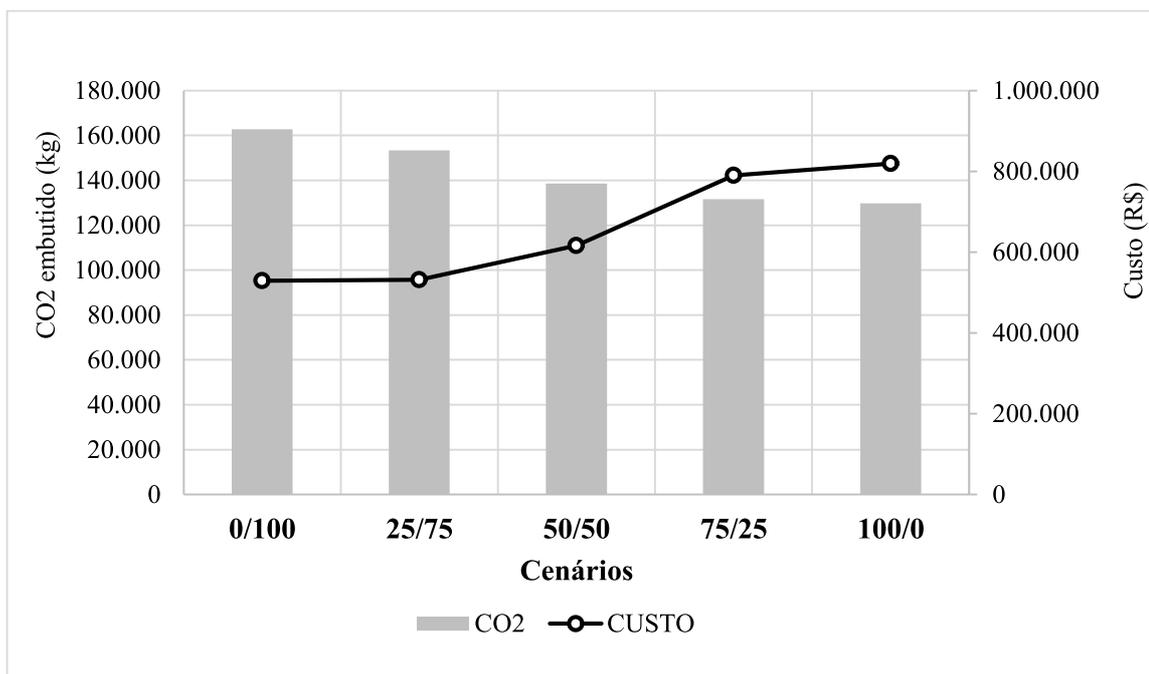
A Tabela 28 apresenta o resumo da soma dos valores das melhores soluções encontradas para cada etapa de obra, para os cinco cenários do estudo. O Gráfico 11 mostra conjuntamente esses valores, evidenciando que a evolução dos valores de um quesito ocorre de modo inverso à do outro, de acordo com as mudanças de cenário estudadas.

Tabela 28 – Resumo de quantidades totais de CO₂ embutido e custo total da construção estudada, considerando as melhores soluções para cada cenário de pesos adotado.

| Cenários | CO _{2emb} (kg) | CUSTO (R\$) |
|--------------|-------------------------|-------------|
| 0/100 | 162.724,32 | 529.234,01 |
| 25/75 | 153.442,95 | 531.408,60 |
| 50/50 | 138.525,31 | 615.805,13 |
| 75/25 | 131.624,57 | 789.947,83 |
| 100/0 | 129.744,37 | 819.200,27 |

Fonte: Autor (2021).

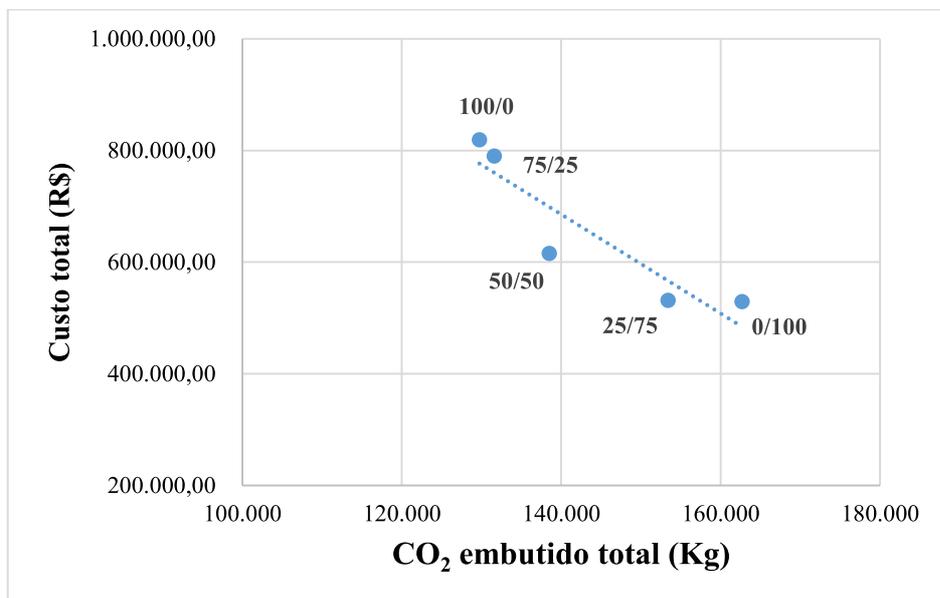
Gráfico 11 – Quantidades totais de emissões e custo total de uma obra, considerando as melhores soluções para cada cenário de pesos estudado.



Fonte: Autor (2021).

O Gráfico 12 também ilustra a relação entre os dois quesitos de escolha de soluções construtivas estudados, considerando os resultados do estudo de caso obtidos com a metodologia proposta.

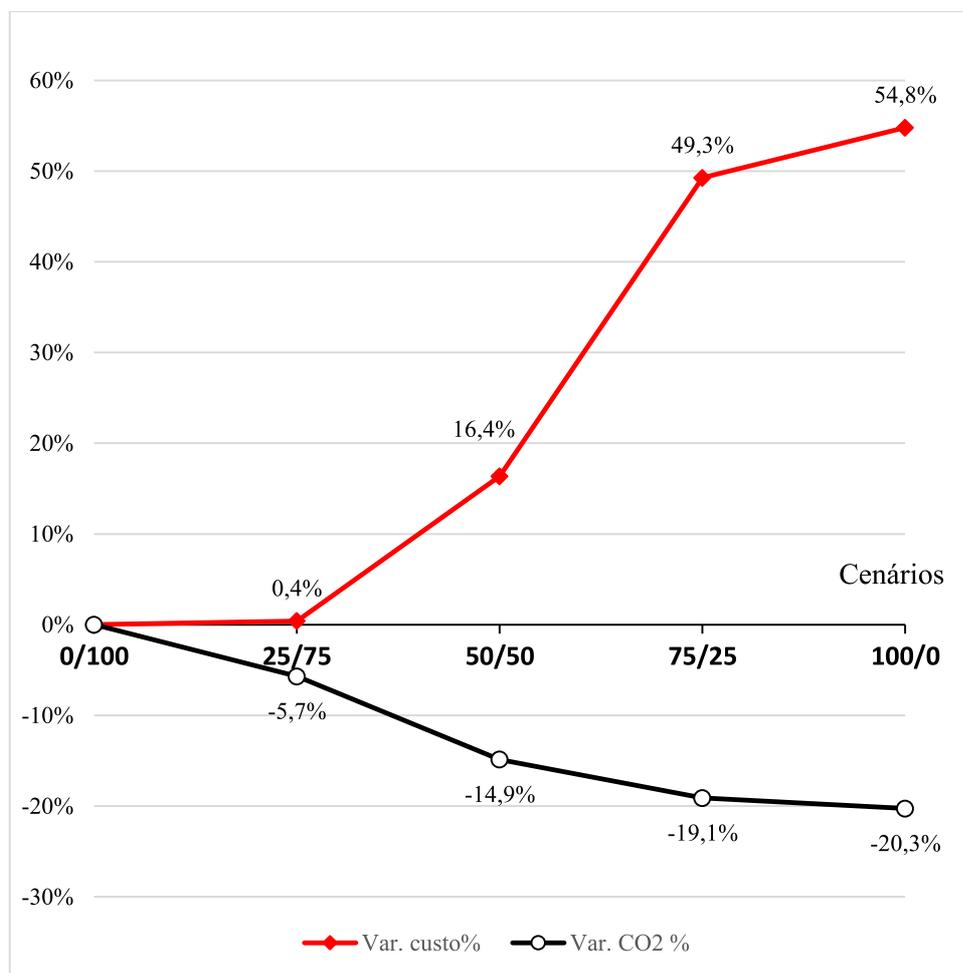
Gráfico 12 – Tendência decrescente de custos e aumento de CO₂ embutido.



Fonte: Autor (2021).

A metodologia proposta também permite fornecer um tipo de dado que consiste em avaliar a evolução percentual ocorrida a cada mudança de cenário. O Gráfico 13 apresenta esta evolução, tomando-se como referência os valores do cenário que privilegia totalmente os custos (cenário 0/100). Para o cenário 25/75, que continua privilegiando a economia, o aumento de custo é muito baixo (0,4%) e a redução da emissão de gases já alcança 5,7%. Para o cenário de equilíbrio (50/50), percebe-se aumento de custos e redução de emissões em valores quase simétricos, 16,4% a mais de custo para redução de 14,9% de CO₂. Finalmente, para os cenários que privilegiam o meio ambiente, os custos aumentam em uma tendência mais acentuada que a redução de emissões, em torno de 50% de aumento para a mudança de cenário, enquanto as emissões diminuem em cerca de 20%. Com esse tipo de análise pode-se pensar nas escolhas a cada mudança de cenário e suas respectivas implicações.

Gráfico 13 – Evolução percentual de custos e CO_{2emb} de acordo com a mudança de cenários (referência cenário 0/100).



Fonte: Autor (2021).

8.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Os resultados encontrados obedecem a premissas pré-estabelecidas para os cálculos, que se configuram em limitações do estudo. As principais são:

- Etapas de obra em número restrito - estrutura, alvenaria, cobertura, pisos, portas e janelas, ainda que representativas da maior quantidade de CO₂ embutido das edificações;
- Adoção de índices de CO₂ embutido dos materiais da literatura e, portanto, com parâmetros pré-fixados, como fonte dos dados ou método de obtenção, assim como fidelidade e adaptabilidade ao cenário brasileiro e suas características de mercado, climáticas, de processos produtivos e matriz energética, entre outros.
- Adoção de planilhas de composição de serviços de fonte bibliográfica, sujeita a questionamentos e variações conforme a região do país ou índices de consumo de materiais e produtividade de cada empresa;
- Adoção e fixação do tempo de vida útil para materiais, componentes e elementos construtivos a partir de uma única fonte.
- Análise um tanto subjetiva no ponto em que se deixa a critério do projetista ou do dono do empreendimento a decisão por privilegiar o aspecto econômico, o ambiental, ou pelo equilíbrio ente eles.

9. CONCLUSÃO

O mercado de construção civil é estratégico e de grande impacto para a economia do país, movimentando uma parcela relevante do PIB, mas, ao mesmo tempo, representa impactos ambientais relevantes. Devido a características intrínsecas ao setor, a indústria da construção civil é marcada por métodos tradicionais e é responsável por uma elevada produção de resíduos, consumo de energia e uso excessivo de matéria-prima, além da grande responsável por parcela importante da emissão de gases do efeito estufa durante todo o ciclo de vida de um empreendimento e dos materiais que o compõem. O contexto histórico do setor mostra que o custo das construções é o fator primordial na tomada de decisão da fase de planejamento dos empreendimentos. No entanto, o cenário mundial de mudanças climáticas exige novas posturas do mercado, no sentido de incluir estratégias de sustentabilidade nos projetos e nas cidades, com atuação firme e consciente dos vários atores envolvidos. Algumas leis e selos de qualidade ambiental de edifícios começam a ganhar corpo no país, assim como trabalhos acadêmicos nessa área, a exemplo do que já ocorre há cerca de duas décadas em países europeus, como a França.

O objetivo do presente trabalho foi delineado dentro desse contexto de análise financeira e ambiental de empreendimentos de construção civil, através do uso de uma planilha eletrônica de cálculos pré-existente, desenvolvida na Faculdade de Engenharia da UFJF, na qual foram incorporadas novas funcionalidades. O intuito do trabalho e dessa ferramenta foi, portanto, propor uma forma de análise que integre os aspectos econômico e ambiental de edificações, através da adoção de uma metodologia que auxilie a escolha de materiais e soluções construtivas na fase de projeto de empreendimentos. Trabalhou-se com um modelo de pesos atribuídos a valores calculados de custo e de quantidade de CO₂ embutido nas soluções construtivas para as etapas de obra possíveis de se analisar na planilha – estrutura, alvenaria, cobertura, pisos, portas e janelas. A distribuição desses pesos resultou em cinco cenários diferentes de análise, privilegiando mais ou menos um aspecto em detrimento do outro, ou mantendo o equilíbrio entre eles.

A realidade atual de altos custos na construção civil e busca por produtividade nos mostra uma tendência de escolha de soluções com base apenas no aspecto financeiro. Porém, existem possibilidades, ilustradas pelos cenários intermediários, de tomada de decisão considerando o aspecto financeiro, porém sem abandonar completamente o ambiental. A comparação entre cenários proposta permitiu mostrar, por meio da metodologia elaborada e da

aplicação realizada para uma edificação, proporções de impactos à medida que se muda de um cenário para o imediatamente mais próximo, seguindo-se um sentido de modificação de pesos.

O trabalho desenvolvido está inserido em um cenário de desafios contemporâneos para o setor da construção civil, com alto potencial de mudanças em favor do meio ambiente. As ferramentas computacionais são essenciais para agilizar cálculos e simulações de desempenho das edificações. Mas o que está realmente por trás desse tipo de iniciativa é a urgência de implementação de uma cultura de sustentabilidade no setor, muito incipiente ainda no país. Inúmeras são as possibilidades de temas de estudo, que vão desde simulações, como as aqui apresentadas, até desenvolvimento de materiais, passando por políticas públicas mitigadoras de impactos ambientais. Para trabalhos futuros, apresentam-se algumas sugestões ligadas ao tema estudado:

- Implementação de novos materiais e etapas de obra na análise;
- Análise comparando tempos de vida útil diferentes das edificações, ou seja, verificação da influência da variação do tempo;
- Aplicação da metodologia a edificações de tipologias variadas – porte, acabamento, sistema construtivo etc;
- Variação na taxa de desconto adotada para o cálculo dos custos a longo prazo.

REFERÊNCIAS

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO transportation asset management guide**. Estados Unidos, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 15575 - Parte 1. Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro, 2021.

AÇO BRASIL. **Relatório Aço Brasil Ambiental**. 2020, 18p.

AGAMUTHU, P. **Challenges in sustainable management of construction and demolitions waste**. Waste Management & Research, 2009, 2p.

AHMED, I. M.; TSAVDARIDIS, K. D. **Life cycle assessment (LCA) and cost (LCC) studies of lightweight composite flooring systems**. Journal of Building Engineering, 2018, 10p.

ARAÚJO, V. M.; CARDOSO, F. F. **Análise dos aspectos e impactos ambientais dos canteiros de obras e suas correlações**. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2010, 30p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/panorama/>> Acesso em: 22 Mai. 2021.

BALASBANEH *et al.* **Sustainable materials selection based on flood damage assessment for a building using LCA and LCC**. Journal of Cleaner Production, 2019, 12p.

BARDHAN, S. **Assessment of water resource consumption in building construction in India**. Ecosystems and Sustainable Development VIII, 2011, 9p.

BOUSSABAINÉ, A.; KIRKHAM, R. **Whole Life-cycle Costing risk and risk responses**. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 2005.

BRAGA *et al.* **Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates**. Journal of Cleaner Production, 2017, 15p.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente. **Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo**

carbono. 2017. Disponível em: <<https://csr.ufmg.br/opcoesdemitigacao/wp-content/uploads/2018/02/Modelagem-Integrada.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Dados revisados do déficit habitacional e inadequação de moradias nortearão políticas públicas.** 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/dados-revisados-do-deficit-habitacional-e-inadequacao-de-moradias-nortearao-politicas-publicas>>. Acesso em: 05 jun. 2021.

BRONIEWICZ, F.; BRONIEWICZ, M. **Sustainability of Steel Office Buildings.** *Energies*, 2020, 16p.

BRUGNERA, R. R. **Análise integrada de desempenho energético, impacto ambiental e custo: estudo de soluções de fachada para edifícios de escritórios no Brasil.** Tese de doutorado. USP, São Paulo. 2018. 282p.

BUENO, C. **Avaliação de Ciclo de Vida na Construção Civil: Análise de Sensibilidade.** Tese de doutorado. USP, São Carlos - SP. 2014. 268p.

BUYLE, M.; BRAET, J. e AUDENAERT, A. **Life cycle assessment in the construction sector: A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, p. 379-388.

CBCS. **Aspectos da construção sustentável no brasil e promoção de políticas públicas.** Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS). 2014, 110p

CBIC, 2018. **Em Movimento: como a construção civil movimenta a economia e gera empregos.** Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC). Brasil. Disponível em: <https://cbic.org.br/es_ES/em-movimento-como-a-construcao-civil-movimenta-a-economia-e-gera-empregos/>. Acesso em: 20 out. 2020.

CEMBUREAU, The European Cement Association. **Reaching climate neutrality along the cement and concrete value chain by 2050.** 2020, 8p.

CHRISTOFOROU, E. *et al.* **Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of adobe bricks.** *Journal of Cleaner Production*, 2015, P.1-10.

CONAMA, 2002. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução CONAMA n°. 307. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil.** Ministério do Meio Ambiente, CONAMA, 2002.

CNI, Confederação Nacional da Indústria. **Mudança do clima e indústria brasileira: iniciativas e recomendações estratégicas para implementação e financiamento da ndc do brasil.** Brasília, 2018, 116p.

COSTA. B. L. C. **Quantificação das Emissões de CO2 Geradas na Produção de Materiais Utilizados na Construção Civil no Brasil.** Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2012, 190p.

DAVIDSON, E. **Defining the trend: cement consumption versus gross domestic product.** Global Cement Magazine, 2014, 7p.

DIAS, M. do C. O. **Manual de Impactos Ambientais - Orientações Básicas sobre Aspectos Ambientais de Atividades Produtivas.** Banco do Nordeste, 1999, 297p.

EPA - United States Environmental Protection Agency. **Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Fact Sheet.** 2020, 25pg.

EPA - United States Environmental Protection Agency. **Understanding Global Warming Potentials. 2021.** Disponível em: <<https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>>. Acesso em: 21 maio 2021.

EPE. **Balço Energético Nacional 2020: Relatório Síntese / Ano Base 2019. 2020.** Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2020.

EPE. **Balço Energético Nacional 2021: Relatório Síntese / Ano Base 2020. 2021.** Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202021-ab%202020_v2.pdf. Acesso em 12/07/2021.

G1. **Entenda por que está chovendo menos no Brasil e se há risco de nova crise hídrica em SP. 2021.** Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2021/06/14/por-que-esta-chovendo-menos-e-sao-paulo-pode-viver-nova-crise-hidrica.ghtml>. Acessado em 12/07/2021.

GOH, B. H.; SUN, Y. **The Development of Life-cycle Costing for Buildings.** Building Research and Information. 2015, p.319-333.

GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. **Edifício Ambiental.** Oficina de Textos. São Paulo - SP, 2015, 592p.

GLUCH, P.; BAUMANN, H. **The life cycle costing (LCC) approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making.** Building and Environment, 2003, p.571-580.

GOULOUTI *et al.* **Uncertainty of building elements' service lives in building LCA & LCC: What matters?.** Building and Environment, 2020, 13p.

GUINÉE *et al.* **Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future.** Environmental Science & Technology, 2011, p.90-96.

HAN *et al.* **Virtual water accounting for a building construction engineering project with nine sub-projects: a case in E-town, Beijing.** Journal of Cleaner Production, 2015, 10p.

HERALOVA, R. S. **Life cycle costing as an important contribution to feasibility study in construction projects**. Creative Construction Conference 2017. Croácia, 2017, p565-570.

IBGE. **Pesquisa anual da indústria da construção 2018**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Brasil, 2020, 4p.

IEA. **International Energy Agency**. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-cement-production-2010-2019>. Acesso em: 10 de Agosto de 2021.

ILO. **Developing the construction industry for employment-intensive infrastructure investments - Guide**. International Labour Office (ILO). Geneva, Suíça, 2019, 275 p.

INÁCIO, C. A. C. **Seleção de materiais com base na metodologia de Life Cycle Engineering: caso de estudo uma mola da roupa**. Dissertação de mestrado. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009, 113p.

IOPES. **Manual para elaboração de orçamentos de obras públicas**. Instituto de Obras Públicas do Espírito Santo (IOPES). Espírito Santo, 2017, 85p.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Geneva, Suíça, 2014, 151 p.

IPEA. **A avaliação de ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2016, 52p.

IPT. **Ciclo de vida na construção: IPT faz levantamento de dados de fabricação de materiais de construção para inventários de ciclo de vida brasileiros**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Brasil, 2018. Disponível em: https://www.ipt.br/noticia/1428-ciclo_de_vida_na_construcao.htm.

ISLAM *et al.* **Life cycle assessment and life cycle cost implications of wall assemblages designs**. Energy and Buildings, 2014, 13p.

ISO 15686. **Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing**. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Suíça, 2017.

JOHN, V. M. *et al.* **Durabilidade e Sustentabilidade desafios para a construção civil brasileira**. Workshop sobre durabilidade das construções. 2002.

KOVACIC *et al.* **Tool for life cycle analysis of facade-systems for industrial buildings**. Journal of Cleaner Production, 2015, 13p.

LIANG *et al.* **Environmental life-cycle assessment and life-cycle cost analysis of a high-rise mass timber building: a case study in pacific northwestern United States**. Sustainability 2021, 16p.

LU *et al.* **Estimating and calibrating the amount of building-related construction and demolition waste in urban China**. International Journal of Construction Management, 2017, p.13-24.

MARQUES, C. T.; GOMES, B. M. F.; BRANDLI, L. L. **Consumo de água e energia em canteiros de obra: um estudo de caso do diagnóstico a ações visando à sustentabilidade.**

Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 79-90, out./dez. 2017.

MATEUS, R. F. M. S; BRAGANÇA L. **Avaliação da sustentabilidade da construção: desenvolvimento de uma metodologia para a avaliação a sustentabilidade de soluções construtivas.** Congresso sobre construção sustentável. Leça da Palmeira, Portugal, 2004, 10p.

MATEUS, R. F. M. S. **Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção.** Dissertação de mestrado. Universidade do Minho. Portugal, 2004, 288p.

MATTOS, A. D. **Como preparar orçamentos de obras: dicas para orçamentistas, estudos de caso, exemplos.** Editora Pini. São Paulo - SP, 2007, 281p.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHNEIN, R. N. **Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente.** Sustentabilidade em debate. Brasília, 2012, p.75-96.

MCCORMACK *et al.* **Modelling direct and indirect water requirements of construction.** Building Research & Information, 2007, p.156 – 162.

MEQUIGNON, M. *et al.* **Greenhouse gases and building lifetimes.** Building and Environment, 2013, p.77-83.

MONICH, C. R.; TAVARES, S. F. **Energia e CO₂ embutidos na fabricação dos materiais de construção: panorama atual no Brasil e no exterior.** ENTAC 2010 – XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Canela – RS, 2010, 10p.

PEREIRA, M. F. B. **Conteúdo energético e emissões de CO₂ em coberturas verdes, de telha cerâmica e de fibrocimento: estudo de caso.** Dissertação de mestrado. UFSM-RS. Santa Maria - RS, 2014, 148p.

POSSAN, E.; DEMOLINER, A. **Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral.** Revista técnico-científica do CREA-PR, 2013, 14p.

REBITZER, G. **Enhancing the application efficiency of life cycle assessment for industrial uses.** Tese de doutorado. Instituto federal de tecnologia de Lausanne, Suíça. 2005. 219p.

RITCHIE, H. **Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?** 2020. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>>. Acesso em: 11 jan. 2022.

RODRIGUES, J. V. D. **O custo do ciclo de vida de edifícios como suporte à gestão de ativos físicos construídos.** Dissertação de mestrado. Portugal, Lisboa, 2014.

SANTOS, D. G. **Estudo da vida útil e degradação de fachadas em argamassa a partir da inspeção de edifícios.** Dissertação de mestrado. Brasília, 2018.

SILVA, B. V. **Construção de ferramenta para avaliação do ciclo de vida de edificações**. Dissertação de mestrado. USP, São Paulo - SP. 2013. 146p.

SILVA, V. G. **Avaliação da sustentabilidade de edifícios de escritórios brasileiros: diretrizes e base metodológica**. Tese de doutorado. São Paulo - SP, 2003, 210 pp.

SINAPI. **Custo de composições analítico MG desonerado**. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. Caixa Econômica Federal. Brasília, CAIXA, 2020.

SINAPI. **Metodologias e Conceitos**. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. Caixa Econômica Federal. 8ª Ed., Brasília, CAIXA, 2020.

SINDUSCON. **Resíduos da Construção Civil e o estado de São Paulo**. Sindicato da indústria da construção civil de São Paulo (SINDUSCON), 2012, 81p.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, SNIC. **Relatório anual 2019**. Brasil, São Paulo, SP. 2019.

SOARES, S. R.; SOUZA, D. M.; PEREIRA, S. W. **A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil**. Construção e meio ambiente. Coletânea Habitare vol. 7. Porto Alegre, 2006, p. 96-128.

TCPO. **Tabela de Composições de Preços para Orçamento**. São Paulo: PINI, 2010, 630p.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. **A sustentabilidade dos materiais de construção**. Portugal, 2010, 460p.

UNEP. **2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector**. Nairobi, 2020, 80pg.

UNEP-SBCI. **Common Carbon Metric: Protocol for Measuring Energy Use and Reporting Greenhouse Gas Emissions from Building Operations**. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - Edifícios Sustentáveis e Iniciativa Climática (UNEP-SBCI), 2010, 28p.

United Nations - Climate Change. **Global Warming Potentials (IPCC Second Assessment Report)**. Disponível em: <<https://unfccc.int/process/transparency-and-reporting/greenhouse-gas-data/greenhouse-gas-data-unfccc/global-warming-potentials>>. Acesso em: 21 maio 2021.

UN - Environment Programme. **Emissões do setor de construção civil atingiram recordes em 2019 - relatório da ONU**. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/emissoes-do-setor-de-construcao-civil-atingiram>. Acessado em 09/07/2021.

WANYAMA *et al.* **Life-cycle engineering: issues, tools and research**. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2003, p.307-316.

WEIBENBERGER, M.; JENSCH, W.; LANG, W. **The convergence of life cycle assessment and nearly zero-energy buildings: The case of Germany.** Energy and Buildings, 2014, 7p.

ZHANG, Y. **Taking the time characteristic into account of life cycle assessment: method and application for buildings.** Sustainability 2017. Zhejiang University of Technology, China, 2017, 14p.

ANEXO A – CO₂ EMBUTIDO POR SERVIÇO

| ALVENARIA | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Serviço: Alvenaria de vedação com tijolos cerâmicos maciços 5,7 x 9 x 19 (junta de 12 mm) assentados com argamassa 1:2:8 (cimento, cal, areia). | | | | |
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ /cm de espessura |
| Cimento Portland | kg | 4,55 | 0,59 | 0,30 |
| Cal hidratada | kg | 4,55 | 0,74 | 0,37 |
| Areia | m ³ | 0,03 | 0,01 | 3,38E-05 |
| Cerâmica para bloco | kg | 168,00 | 0,23 | 4,29 |
| | | | Σ= | 4,97 |

| Serviço: Alvenaria de vedação com blocos cerâmicos vazados 9 x 19 x 19 (junta de 12 mm) assentados com arg. 1:2:8 (cimento, cal, areia). | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ /cm de espessura |
| Cimento Portland | kg | 2,18 | 0,59 | 0,14 |
| Cal hidratada | kg | 2,18 | 0,74 | 0,18 |
| Areia | m ³ | 0,015 | 0,01 | 1,67E-05 |
| Cerâmica para bloco | kg | 50,00 | 0,23 | 1,28 |
| | | | Σ= | 1,60 |

| Serviço: Alvenaria de vedação com blocos de concreto furado 9 x 19 x 39 cm (junta de 12 mm) assentados com arg. 1:0,5:8 (cimento, cal, areia). | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ /cm de espessura |
| Cimento Portland | kg | 1,16 | 0,59 | 0,08 |
| Cal hidratada | kg | 0,29 | 0,74 | 0,02 |
| Areia | m ³ | 0,008 | 0,01 | 8,63E-06 |
| Concreto para bloco | kg | 99,33 | 0,18 | 2,03 |
| | | | Σ= | 2,13 |

| COBERTURA | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Serviço: Cobertura com telha de alumínio envernizada ou pintada, perfil trapezoidal | | | | |
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| Alumínio | kg | 1,97 | 4,44 | 8,75 |
| | | | Σ= | 8,75 |

| Serviço: Cobertura com telha de fibrocimento | | | | |
|----------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| Fibrocimento | kg | 20,70 | 1,11 | 22,98 |
| | | | Σ= | 22,98 |

| Serviço: Cobertura com telha de concreto (largura útil 320 mm) | | | | |
|----------------------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| Concreto para telha | kg | 48,07 | 0,16 | 7,51 |
| | | | Σ= | 7,51 |

| Serviço: Cobertura com telha cerâmica com argamassa de cimento, cal hidratada e areia Traço 1:2:9 / i = 35% | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| Cerâmica para telha | kg | 40,00 | 0,63 | 25,20 |
| | | | Σ= | 25,20 |

| JANELAS | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Serviço: Janela de alumínio padronizada, colocação e acabamento de correr, dimensões 1,20x1,50m | | | | |
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| Alumínio | kg | 11,70 | 4,44 | 51,96 |
| | | | Σ= | 51,96 |

| Serviço: Janela de aço padronizada, colocação e acabamento de correr, dimensões | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| Perfil de Aço | kg | 12,00 | 1,39 | 16,68 |
| | | | Σ= | 16,68 |

| Serviço: Janela de madeira (Angelim) padronizada, colocação e acabamento de correr, dimensões 1,20 x 1,50 m | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| Madeira | kg | 19,52 | 0,08 | 1,56 |
| | | | Σ= | 1,56 |

| Serviço: Janela de PVC, dimensões 0,60 x 0,60m | | | | |
|------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| PVC | kg | 4,60 | 5,92 | 27,23 |
| | | | Σ= | 27,23 |

| REVESTIMENTOS | | | | |
|------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Serviço: Chapisco com argamassa 1:3 e = 5 mm (interno, externo e teto) | | | | |
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| Areia | m ³ | 0,007 | 0,01 | 7,20E-05 |
| Cimento Portland | kg | 2,92 | 0,59 | 1,72 |
| | | | Σ= | 1,72 |

| Serviço: Emboço argamassa 1:2:8 e = 20 mm (interno e teto) | | | | |
|------------------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| Cimento Portland | kg | 3,64 | 0,59 | 1,07 |
| Cal hidratada | kg | 3,64 | 0,74 | 1,35 |
| Areia | m ³ | 0,024 | 0,01 | 1,22E-04 |
| | | | Σ= | 2,42 |

| Serviço: Contrapiso de cimento e areia 1:5 e = 1 cm | | | | |
|-----------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| Cimento Portland | kg | 2,92 | 0,59 | 1,72 |
| Areia | m ³ | 0,012 | 0,01 | 1,20E-04 |
| | | | Σ= | 1,72 |

| Serviço: Argamassa colante | | | | |
|----------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| Argamassa colante | kg | 4,50 | 1,01 | 4,55 |
| | | | Σ= | 4,55 |

| | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Serviço: Azulejo assentado com argamassa mista de cimento, cal e areia, traço 1:2:8 | | | | |
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| Revestimento cerâmico | kg | 14,85 | 0,19 | 2,78 |
| | | | Σ= | 2,78 |

| | | | | |
|--------------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Serviço: Revestimento piso madeira (Angelim) esp. 2 cm | | | | |
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| Revestimento madeira | kg | 15,62 | 0,08 | 0,62 |
| | | | Σ= | 0,62 |

| | | | | |
|---------------------------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| PORTAS | | | | |
| Serviço: Porta interna maciça em Angelim, 0,80 x 2,10m, esp. 2,5 cm | | | | |
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| Madeira | kg | 19,52 | 0,08 | 1,56 |
| | | | Σ= | 1,56 |

| | | | | |
|-----------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Serviço: Porta interna maciça em aço, 0,80 x 2,10 m | | | | |
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| Perfil de Aço | kg | 10,00 | 1,39 | 13,90 |
| | | | Σ= | 13,90 |

| | | | | |
|---------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Serviço: Porta interna maciça em PVC 0,70 x 2,10m | | | | |
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| PVC | kg | 4,30 | 5,92 | 25,46 |
| | | | Σ= | 25,46 |

| | | | | |
|---------------------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| Serviço: Porta de alumínio 70 x 210 com veneziana, uma folha. | | | | |
| Unidade: | m ² | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| Alumínio | kg | 9,00 | 4,44 | 39,97 |
| | | | Σ= | 39,97 |

| | | | | |
|---------------------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------------------------|-------------------|
| ESTRUTURA | | | | |
| Serviço: Concreto Estrutural 25 MPa, concreto controle tipo A | | | | |
| Unidade: | m ³ | | | |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Índice de CO ₂ (kg/un) | kgCO ₂ |
| Cimento Portland | kg | 349,00 | 0,59 | 205,91 |
| Areia | m ³ | 0,87 | 0,01 | 0,009 |
| Brita | m ³ | 0,84 | 0,01 | 0,008 |
| Aço CA 50 | kg | 80,00 | 1,55 | 124,00 |
| | | | Σ= | 329,93 |

ANEXO B – COMPOSIÇÃO UNITÁRIA DE CUSTO POR SERVIÇO

| ALVENARIA | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|-------------------------|-------------|
| Serviço: Alvenaria de vedação com tijolos cerâmicos maciços 5,7 x 9 x 19 (junta de 12 mm) assentados com argamassa 1:2:8 (cimento, cal, areia). | | | | | |
| Unidade: | m ² | | | Código TCPO: | 04211.8.1.6 |
| Quantidade: | 1,00 | | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo / cm de espessura | |
| Pedreiro | h | 1,60 | 18,46 | 3,28 | |
| Servente | h | 1,86 | 13,23 | 2,74 | |
| Areia | m ³ | 0,032 | 66,67 | 0,24 | |
| Cal hidratada | kg | 4,75 | 0,64 | 0,34 | |
| Cimento Portland CP-IV E-32 | kg | 4,75 | 0,38 | 0,20 | |
| Tijolo maciço cerâmico | un | 75,30 | 0,27 | 2,26 | |
| | | | Σ= | 9,05 | |

| Serviço: Alvenaria de vedação com blocos cerâmicos vazados 9 x 19 x 19 (junta de 12 mm) assentados com argamassa 1:2:8 (cimento, cal, areia). | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|-------------------------|-------------|
| Unidade: | m ² | | | Código TCPO: | 04211.8.2.3 |
| Quantidade: | 1,00 | | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo / cm de espessura | |
| Pedreiro | h | 1,00 | 18,46 | 2,05 | |
| Servente | h | 1,14 | 13,23 | 1,67 | |
| Areia | m ³ | 0,016 | 66,67 | 0,12 | |
| Cal hidratada | kg | 2,46 | 0,64 | 0,17 | |
| Cimento Portland CP-IV E-32 | kg | 2,46 | 0,38 | 0,10 | |
| Bloco cerâmico furado vedação | un | 25,70 | 0,44 | 1,24 | |
| | | | Σ= | 5,36 | |

| Serviço: Alvenaria de vedação com blocos de concreto furado 9 x 19 x 39 cm (junta de 10 mm) assentados com argamassa 1:0,5:8 (cimento, cal, areia). | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|-------------------------|
| Unidade: | m ² | | Código TCPO: | 04221.8.1.1 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo / cm de espessura |
| Pedreiro | h | 0,66 | 18,46 | 1,35 |
| Servente | h | 0,72 | 13,23 | 1,06 |
| Areia | m ³ | 0,008 | 66,67 | 0,06 |
| Cal hidratada | kg | 0,29 | 0,64 | 0,02 |
| Cimento Portland CP-IV E-32 | kg | 1,16 | 0,38 | 0,05 |
| Bloco de concreto de vedação | un | 12,90 | 1,43 | 2,05 |
| | | | Σ= | 4,59 |

| COBERTURA | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|-------------|
| Serviço: Cobertura com telha de alumínio envernizada ou pintada, perfil trapezoidal | | | | |
| Unidade: | m ² | | Código TCPO: | 07410.8.2.2 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Ajudante | h | 0,30 | 14,21 | 4,26 |
| Montador | h | 0,30 | 18,43 | 5,53 |
| Gancho de alumínio | un | 3,00 | 1,80 | 5,40 |
| Telha de alumínio trapezoidal | kg | 1,97 | 61,25 | 120,66 |
| | | | Σ= | 135,85 |

| Serviço: Cobertura com telha de fibrocimento - tipo ondulada | | | | |
|--------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|-------------|
| Unidade: | m ² | | Código TCPO: | 07320.8.5.2 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Ajudante de telhadista | h | 0,22 | 13,23 | 2,91 |
| Telhadista | h | 0,22 | 20,12 | 4,43 |
| Parafuso com rosca galvanizada | un | 1,42 | 1,5 | 2,13 |
| Telha de fibrocimento | m ² | 1,15 | 17,25 | 19,84 |
| Conjunto vedação elástica | un | 1,42 | 0,15 | 0,21 |
| | | | Σ= | 29,52 |

| | | | | |
|----------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|-------------|
| Serviço: Cobertura com telha de concreto (largura útil 320 mm) | | | | |
| Unidade: | m ² | | Código TCPO: | 07320.8.4.1 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Ajudante de telhadista | h | 1,08 | 13,23 | 14,29 |
| Telhadista | h | 0,27 | 20,12 | 5,43 |
| Telha de concreto | un | 10,90 | 1,53 | 16,68 |
| | | | Σ= | 36,40 |

| | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|-------------|
| Serviço: Cobertura com telha cerâmica com argamassa de cimento, cal hidratada e areia Traço 1:2:9 / i = 35% | | | | |
| Unidade: | m ² | | Código TCPO: | 07320.8.3.2 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Ajudante de telhadista | h | 2,03 | 13,23 | 26,86 |
| Telhadista | h | 1,50 | 20,12 | 30,18 |
| Areia | m ³ | 0,004 | 66,67 | 0,25 |
| Cal hidratada | kg | 0,49 | 0,64 | 0,31 |
| Cimento Portland CP-IV E-32 | kg | 0,49 | 0,38 | 0,18 |
| Telha cerâmica paulista | un | 25,00 | 1,31 | 32,75 |
| | | | Σ= | 90,54 |

| | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|--------------|
| JANELAS | | | | |
| Serviço: Janela de alumínio padronizada, de correr colocação e acabamento de correr, dimensões 1,20m x 1,50m | | | | |
| Unidade: | un | | Código TCPO: | 08520.8.2.18 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Pedreiro | h | 1,80 | 18,46 | 33,23 |
| Servente | h | 0,83 | 13,23 | 10,91 |
| Areia | m ³ | 0,006 | 66,67 | 0,39 |
| Cimento Portland CP-IV E-32 | kg | 2,33 | 0,38 | 0,89 |
| Caixilho de alumínio | un | 1,00 | 392,8 | 392,80 |
| | | | Σ= | 438,21 |

| Serviço: Janela de aço padronizada, de correr, colocação e acabamento de correr, dimensões 1,20m x 1,50m | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|-------------|
| Unidade: | un | | Código TCPO: | 08530.8.1.1 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Pedreiro | h | 1,80 | 18,46 | 33,23 |
| Servente | h | 0,83 | 13,23 | 10,91 |
| Areia | m ³ | 0,006 | 66,67 | 0,39 |
| Cimento Portland CP-IV E-32 | kg | 2,33 | 0,38 | 0,89 |
| Caixilho de aço pintado | m ³ | 1,80 | 362,95 | 653,31 |
| | | | Σ= | 698,72 |

| Serviço: Janela de madeira de correr com duas folhas fixas, duas venezianas, duas de vidro, batente e guarnição, dimensões 1,20 x 1,60 m | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|-------------|
| Unidade: | un | | Código TCPO: | 08550.8.3.3 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Ajudante de carpinteiro | h | 9,00 | 13,23 | 119,07 |
| Carpinteiro | h | 9,00 | 16,56 | 149,04 |
| Pedreiro | h | 3,50 | 18,46 | 64,61 |
| Servente | h | 3,50 | 13,23 | 46,31 |
| Areia | m ³ | 0,012 | 66,67 | 0,81 |
| Cal hidratada | kg | 1,97 | 0,64 | 1,26 |
| Cimento Portland CP-IV E-32 | kg | 1,97 | 0,38 | 0,75 |
| Prego 16 x 24 com cabeça | kg | 0,23 | 10,84 | 2,48 |
| Parafuso madeira zincado | un | 8,00 | 0,04 | 0,32 |
| Taco de madeira para instalação | un | 8,00 | 0,00 | 0,00 |
| Dobradiça de latão para janela | un | 4,00 | 14,79 | 59,16 |
| Guarnição de madeira | m | 11,20 | 3,30 | 36,96 |
| Janela de madeira de correr | m ² | 1,92 | 616,15 | 1183,01 |
| | | | Σ= | 1663,77 |

| Serviço: Janela de PVC de correr, com vidro, colocação e acabamento | | | | |
|---------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|--------------|
| Unidade: | m ² | | Código TCPO: | 008560.8.1.4 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Pedreiro | h | 1,50 | 18,46 | 27,69 |
| Servente | h | 1,50 | 13,23 | 19,85 |
| Areia | m ³ | 0,01 | 66,67 | 0,67 |
| Cimento Portland CP-IV E-32 | kg | 2,00 | 0,38 | 0,76 |
| Janela de PVC | m ² | 1,00 | 1200 | 1200,00 |
| | | | Σ= | 1248,96 |

| REVESTIMENTOS | | | | |
|------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|--------------|
| Serviço: Chapisco com argamassa 1:3 e = 5 mm (interno, externo e teto) | | | | |
| Unidade: | m ² | | Código TCPO: | 09705.8.12.4 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Pedreiro | h | 0,10 | 18,46 | 3,69 |
| Servente | h | 0,15 | 13,23 | 3,97 |
| Areia | m ³ | 0,006 | 66,67 | 0,81 |
| Cimento Portland CP-IV E-32 | kg | 2,43 | 0,38 | 1,85 |
| | | | Σ= | 10,32 |

| Serviço: Emboço argamassa 1:2:8 e = 20 mm (interno e teto) | | | | |
|------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|--------------|
| Unidade: | m ² | | Código TCPO: | 09705.8.2.13 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Pedreiro | h | 0,60 | 18,46 | 5,54 |
| Servente | h | 0,80 | 13,23 | 5,29 |
| Areia | m ³ | 0,024 | 66,67 | 0,81 |
| Cal hidratada | kg | 3,64 | 0,64 | 1,16 |
| Cimento Portland CP-IV E-32 | kg | 3,64 | 0,38 | 0,69 |
| | | | Σ= | 13,50 |

| Serviço: Regularização sarrafeada de base para revestimento de piso com argamassa de cimento e areia 1:5, e = 3 cm | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|-------------|
| Unidade: | m ² | | Código TCPO: | 09605.8.1.6 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Pedreiro | h | 0,25 | 18,46 | 1,54 |
| Servente | h | 0,55 | 13,23 | 2,43 |
| Areia | m ³ | 0,037 | 66,67 | 0,81 |
| Cimento Portland CP-IV E-32 | kg | 8,76 | 0,38 | 1,11 |
| | | | Σ= | 5,89 |

| Serviço: Azulejo assentado com argamassa pré-fabricada de cimento colante | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|-------------|
| Unidade: | m ² | | Código TCPO: | 09706.8.1.7 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Azulejista | h | 0,36 | 20,17 | 7,26 |
| Servente | h | 0,20 | 13,23 | 2,65 |
| Azulejo cerâmico | m ² | 1,10 | 23,50 | 25,85 |
| Argamassa pré-fabricada | kg | 4,40 | 0,43 | 1,89 |
| | | | Σ= | 37,65 |

| Serviço: Taco de madeira assentado, assentado com argamassa de cimento e areia (1:4) | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|-------------|
| Unidade: | m ² | | Código TCPO: | 09640.8.6.1 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Servente | h | 1,30 | 13,23 | 17,20 |
| Taqueiro | h | 1,00 | 18,09 | 18,09 |
| Areia | m ³ | 0,028 | 66,67 | 1,87 |
| Cimento Portland CP-IV E-32 | kg | 10,95 | 0,38 | 4,16 |
| Taco de madeira | m ² | 1,05 | 121,88 | 127,97 |
| | | | Σ= | 169,29 |

| PORTAS | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|-------------|
| Serviço: Porta interna de madeira, colocação e acabamento, de uma folha com batente, guarnição e ferragem (0,80x2,10) | | | | |
| Unidade: | un | | Código TCPO: | 08210.8.3.3 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Ajudante de carpinteiro | h | 3,75 | 13,23 | 49,61 |
| Carpinteiro | h | 3,75 | 16,56 | 62,10 |
| Pedreiro | h | 1,40 | 18,46 | 25,84 |
| Servente | h | 1,40 | 13,23 | 18,52 |
| Areia | m ³ | 0,011 | 66,67 | 0,71 |
| Cal hidratada | kg | 1,72 | 0,64 | 1,10 |
| Cimento Portland CP-IV E-32 | kg | 1,72 | 0,38 | 0,65 |
| Prego 16 x 24 com cabeça | kg | 0,25 | 10,84 | 2,71 |
| Parafuso madeira zincado | un | 8,00 | 0,04 | 0,32 |
| Taco de madeira para instalação | un | 6,00 | 0,00 | 0,00 |
| Batente de madeira para porta | un | 1,00 | 119,38 | 119,38 |
| Guarnição de madeira | m | 10,00 | 3,30 | 33,00 |
| Porta lisa de madeira | un | 1,00 | 178,93 | 178,93 |
| Fechadura completa para porta | un | 1,00 | 30,64 | 30,64 |
| Dobradiça de ferro para porta | un | 1,00 | 12,87 | 12,87 |
| | | | Σ= | 536,39 |

| | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|-------------|
| Serviço: Porta de ferro sob encomenda, de abrir, em chapa dupla, colocação e acabamento com uma folha (considerar aço) | | | | |
| Unidade: | m ² | | Código TCPO: | 08110.8.3.1 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Pedreiro | h | 3,00 | 18,46 | 55,38 |
| Servente | h | 3,00 | 13,23 | 39,69 |
| Areia | m ³ | 0,008 | 66,67 | 0,53 |
| Cimento Portland CP-IV E-32 | kg | 2,03 | 0,38 | 0,77 |
| Porta de aço | m ² | 1,83 | 240,54 | 439,47 |
| | | | Σ= | 535,84 |

| | | | | |
|----------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------------|-------------|
| Serviço: Porta de PVC, inclusive colocação e acabamento (0,70x2,10m) | | | | |
| Unidade: | un | | Código TCPO: | 08220.8.1.1 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Pedreiro | h | 3,00 | 18,46 | 55,38 |
| Servente | h | 3,00 | 13,23 | 39,69 |
| Rebite de alumínio | un | 12,00 | 0,065 | 0,78 |
| Bucha de nylon | un | 10,00 | 3,25 | 32,50 |
| Espuma de poliuretano | L | 0,25 | 53,80 | 13,45 |
| Porta de PVC | un | 1,00 | 500,00 | 500,00 |
| | | | Σ= | 641,80 |

| | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|----------------|--------|
| Serviço: Porta em alumínio de abrir tipo veneziana com guarnição, fixação com parafusos - fornecimento e instalação (0,87 x 2,10m) | | | | |
| Unidade: | m ² | | Código Sinapi: | 91341 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Pedreiro | h | 0,38 | 18,46 | 7,06 |
| Servente | h | 0,19 | 13,23 | 2,53 |
| Selante elástico | ml | 273,70 | 0,064 | 17,52 |
| Bucha de nylon sem aba S10 | un | 4,82 | 0,36 | 1,73 |
| Guarnição para porta | m | 6,85 | 6,20 | 42,47 |
| Porta de alumínio | un | 0,55 | 563,71 | 308,52 |
| | | | Σ= | 379,83 |

| ESTRUTURA | | | | |
|---------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------|-------------|
| Serviço: Concreto Estrutural 25 MPa, concreto controle tipo A | | | | |
| Unidade: | m ³ | | Código TCPO: | 03310.8.1.9 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Servente | h | 6,00 | 13,23 | 79,38 |
| Areia | m ³ | 0,83 | 66,67 | 55,20 |
| Pedra britada I | m ³ | 0,84 | 70,02 | 58,54 |
| Cimento Portland CP-IV E-32 | kg | 367,00 | 0,38 | 139,46 |
| Betoneira elétrica | h prod | 0,31 | 1,62 | 0,50 |
| | | | Σ= | 333,08 |

| Serviço: Armadura de aço para estruturas em geral, CA-50, diâmetro de 12,5 mm | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------------|--------------|
| Unidade: | Kg | | Código TCPO: | 03210.8.1.10 |
| Quantidade: | 1,00 | | | |
| Insumo | Unidade | Consumo | Custo/unidade | Custo |
| Ajudante de armador | h | 0,06 | 13,86 | 0,86 |
| Armador | h | 0,06 | 18,34 | 1,14 |
| Espaçador circular de plástico | un | 4,70 | 0,14 | 0,66 |
| Aço CA 50 | kg | 1,10 | 4,72 | 5,19 |
| Arame recozido | kg | 0,02 | 13,18 | 0,26 |
| | | | Σ= | 648,80 |