

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

ESTUDO DE ALTERNATIVAS CONSTRUTIVAS PARA
PROJETOS DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL
UNIFAMILIARES CONSIDERANDO IMPACTO
AMBIENTAL NA TOMADA DE DECISÃO

Pollyanna Fernandes Bianchi

Passo Fundo

2021



CIP – Catalogação na Publicação

B577e Bianchi, Pollyanna Fernandes
Estudo de alternativas construtivas para projetos de habitações de interesse social unifamiliares considerando impacto ambiental na tomada de decisão [recurso eletrônico] / Pollyanna Fernandes Bianchi. – 2021.
2.2 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Moacir Kripka.
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Cezar Vitorio Junior.
Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo, 2021.

1. Construção civil – Sustentabilidade. 2. Habitação popular.
3. Impacto ambiental. I. Kripka, Moacir, orientador. II. Vitorio Junior, Paulo Cezar, coorientador. III. Título.

CDU: 624

Catalogação: Bibliotecária Juliana Langaro Silveira - CRB 10/2427

Pollyanna Fernandes Bianchi

ESTUDO DE ALTERNATIVAS CONSTRUTIVAS PARA
PROJETOS DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL
UNIFAMILIARES CONSIDERANDO IMPACTO
AMBIENTAL NA TOMADA DE DECISÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Moacir Kripka

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Cezar Vitorio Junior.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Zacarias M. Chamberlain Pravia

Prof^a. Dr^a. Vera Maria Cartana Fernandes

Prof^a. Dr^a. Maria Teresa Gomes Barbosa

Passo Fundo

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, minha mãe Fátima, meu pai Valdecir e minhas irmãs, Marina e Débora pelo apoio, carinho e por tudo o que me proporcionaram ao longo da vida.

Ao meu noivo Guilherme por estar ao meu lado sempre e pelo incentivo em todas as etapas desta dissertação, principalmente nos momentos mais difíceis sendo positivo e me encorajando para chegar ao fim.

Ao meu professor orientador, Moacir e meu coorientador Paulo, por toda a ajuda durante esta caminhada.

Aos colegas da turma do mestrado e do grupo de pesquisa pela troca de conhecimento.

Aos amigos Luana e Bruno pelas noites de ajuda com o software Revit e projetos em LSF.

À arquiteta Fabiani Franzen que colaborou com a disponibilização do projeto em LSF e sempre solícita respondeu a todos os meus questionamentos.

Ao engenheiro Gustavo da empresa CUBBO Construção Sustentável pela colaboração nos dados referente à construção em LSF.

À minha prima Vanessa pela ajuda na correção ortográfica desta dissertação.

À minha sócia e amiga Gabi que compreendeu meus momentos de ausência e sempre me apoiou.

À minha cunhada Laura pelas palavras de apoio e ajuda.

Aos amigos Mathias e Augusto com o apoio no programa excel.

A todos os amigos que responderam ao questionário e contribuíram com os resultados alcançados.

À Universidade de Passo Fundo e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Aos professores por todo o conhecimento passado, em especial à Vera Maria Cartana Fernandes, Zacarias Martin Chamberlain Pravia e Maria Teresa Gomes Barbosa pelas contribuições ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

“Trabalhe, sirva, seja forte e não encha o saco”

Ítalo Marsili

RESUMO

O alto déficit habitacional no Brasil contribui para o desenvolvimento da indústria da construção civil. Este setor desempenha um papel importante na evolução da economia mundial, mas, apesar disso, é responsável por utilizar recursos naturais não renováveis e por causar danos ambientais. No Brasil existem programas de Habitação de Interesse Social (HIS) para suprir a carência de moradias, e é fundamental que essas construções sejam projetadas de acordo com parâmetros de sustentabilidade e que a tomada de decisão nos projetos não seja apenas baseada no fator econômico. Assim, esta pesquisa tem o objetivo de avaliar e selecionar diferentes sistemas construtivos em projetos de habitação unifamiliar de interesse social, empregando a Avaliação de Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) no processo de tomada de decisão. Foram selecionados três projetos com diferentes sistemas construtivos, sendo: concreto armado e alvenaria em tijolos cerâmicos, alvenaria estrutural e light steel frame, para os quais foi efetuada a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e o Custo do Ciclo de Vida (CCV), aliados ao seu conforto térmico e ao seu cronograma de execução. Além disso, foi considerada, como fator subjetivo, a aceitação de projetistas e usuários perante os diferentes sistemas construtivos. Para a modelagem dos projetos foi utilizado o software Autodesk Revit e o plugin Tally no desenvolvimento da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A seleção do projeto mais sustentável deu-se com o uso do Processo Analítico Hierárquico (AHP), sendo os pesos dos critérios definidos por meio da aplicação de um questionário. Os resultados indicam que o projeto em Light Steel Frame (LSF) apresentou melhor comportamento com a aplicação da Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida. Além disso, concluiu-se que a integração do Building Information Modeling (BIM) com a ACV e CCV ainda na fase inicial do projeto podem colaborar para a construção de residências mais sustentáveis.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV). Custo do Ciclo de Vida (CCV). Habitação de Interesse Social (HIS). Processo Analítico Hierárquico (AHP).

ABSTRACT

The high housing deficit in Brazil contributes to the development of the construction industry. This sector performs an important role in the global economy Evolution, but, besides that, it is responsible for using non-renewable natural resources and to cause environmental damages. In Brazil, there are Social Interest Housing (SIH) programmes to meet the housing deficiency, and it is fundamental that these construction buildings are projected according to the sustainability parameters and that the decision making are not only based on the economic factor. Therefore, this research has the objective to evaluate and select different constructive systems in projects of single-family social interest houses, using the Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) in the decision-making process. Three projects with different construction systems were selected: reinforced concrete with ceramic brick wall, structural masonry and light steel frame, which were selected considering the Life Cycle Assessment (LCA) and the Life Cycle Cost (LCC), combined with thermal comfort and construction time. In addition, the acceptance of the designers and users in front of the different construction systems were considered as a subjective factor. For the projects modelling, the Autodesk Revit software and Tally application for the development of the Life Cycle Assessment (LCA) was used. The selection of the most sustainable project was defined by Analytic Hierarchy Process (AHP) and the range were defined by an online questionnaire. The results indicate that Light Steel Frame (LSF) project presented a better behaviour with the application of the Life Cycle Sustainability Assessment. Besides that, this research concludes that the integration of BIM, LCA and LCC together, in the initial phase of project, contributes to more sustainable houses.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA). Life cycle sustainability assessment (ASCV). Life cycle cost (CCV). Social Interest Housing (HIS). Hierarchical Analytical Process (AHP).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de Avaliação do Ciclo de Vida.....	18
Figura 2 - Estrutura Hierárquica do método AHP.....	29
Figura 3 - Fluxograma geral das atividades realizadas na dissertação.....	41
Figura 4 - Cidade de construção das residências.....	42
Figura 5 - Planta baixa do projeto 1.	43
Figura 6 - Planta baixa do projeto 2.	45
Figura 7 - Planta baixa do projeto 3.	47
Figura 8 – Sistema de produto e fronteira do sistema de estudo.	49
Figura 9 - Estrutura hierárquica da tomada de decisão.	57
Figura 10 - Impactos ambientais dos projetos estudados.	61
Figura 11 - Impacto ambiental por categoria de material – Projeto 1.	62
Figura 12 - Impacto ambiental por categoria de material – Projeto 2.	63
Figura 13 - Impacto ambiental por categoria de material – Projeto 3.	64
Figura 14 - Preferência dos projetistas quanto ao sistema construtivo.....	69
Figura 15 - Preferência dos usuários quanto ao sistema construtivo.....	69
Figura 16 - Modelo de aplicação da pesquisa.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação	35
Tabela 2 - Transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico para algumas paredes	53
Tabela 3 - Impactos ambientais por metro quadrado de construção.	60
Tabela 4 - Resultados do CCV.	65
Tabela 5 - Valores de transmitância térmica das vedações verticais externas	66
Tabela 6 - Cronograma de duração média de construção.....	67
Tabela 7 - Prioridades relativas de acordo com o critério "Impacto ambiental".	76
Tabela 8 - Pesos atribuídos aos critérios.	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Escala Fundamental de Comparação por pares.....	30
Quadro 2 - Índice Aleatório RI.....	31
Quadro 3 - Características do projeto 1.....	44
Quadro 4 - Características do projeto 2.....	46
Quadro 5 - Características do projeto 3.....	48
Quadro 6 - Lista de materiais e base de dados do Tally (Continua).....	50
Quadro 7 - Valores de transmitância térmica para o projeto 1.....	53
Quadro 8 - Valores de transmitância térmica para o projeto 2.....	54
Quadro 9 - Valores de transmitância térmica para o projeto 3.....	54
Quadro 10 - Indicadores de duração média em dias para construção de residências.....	55
Quadro 11- Duração média em dias para os sistemas construtivos estudados.....	56
Quadro 12 - Inventário dos projetos (Continua).....	58
Quadro 13 - Matriz de decisão - critério aceitação cultural (Projetistas e usuários).....	70
Quadro 14 - Matriz de decisão - critério aceitação cultural (Projetistas).....	71
Quadro 15 - Matriz de decisão - critério aceitação cultural (Usuários).....	71
Quadro 16 - Resultados gerais ACV.....	72
Quadro 17 - Resultados gerais CCV.....	72
Quadro 18 - Resultados gerais critérios adicionais.....	73
Quadro 19 - Resultados gerais dos critérios considerados.....	75
Quadro 20 - Prioridades relativas dos projetos em relação aos critérios considerados.....	76
Quadro 21 - Matriz de decisão - projetistas.....	78
Quadro 22 - Matriz de decisão - usuários.....	78
Quadro 23 - Matriz de decisão – projetistas e usuários.....	79
Quadro 24 - Resumo dos resultados.....	80
Quadro 25 – Análise de sensibilidade - Matriz de decisão considerando pesos iguais para todos os critérios.....	81
Quadro 26 – Análise de sensibilidade - Priorizando o critério impacto ambiental.....	81
Quadro 27 – Análise de sensibilidade - Priorizando o critério custo.....	81
Quadro 28 - Resumo geral dos resultados (Continua).....	82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos específicos	14
1.3	Estrutura da dissertação	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida	16
2.1.1	Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	17
2.1.1.1	Definição do objetivo e escopo	18
2.1.1.2	Análise do inventário	19
2.1.1.3	Avaliação de impactos	20
2.1.1.4	Interpretação	22
2.1.2	Custo do Ciclo de Vida (CCV)	22
2.1.3	Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS)	24
2.2	Building Information Modelling (BIM)	24
2.2.1	BIM e ACV	24
2.3	Habitação de Interesse Social	25
2.4	Técnicas de tomada de decisão	27
2.4.1	Processo Analítico Hierárquico (AHP)	28
2.4.2	Tomada de Decisão em Grupo	32
2.5	Critérios adicionais considerados na pesquisa	34
2.5.1	Conforto térmico	34
2.5.2	Cronograma de execução	36
2.5.3	Aceitação Cultural	36
2.6	Estado da arte	37
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	41
3.1	Seleção dos projetos	41
3.1.1	Projeto 1	43
3.1.2	Projeto 2	45
3.1.3	Projeto 3	47
3.2	Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	49
3.3	Custo do Ciclo de Vida (CCV)	52
3.4	Critérios adicionais	52
3.4.1	Conforto térmico	52
3.4.2	Cronograma de execução	54
3.4.3	Aceitação cultural	56
3.5	Método de tomada de decisão	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1	Resultados por critérios	58
4.1.1	Avaliação do ciclo de vida	58
4.1.2	Custo do ciclo de vida	65
4.1.3	Critérios adicionais	66
4.1.3.1	Conforto térmico	66
4.1.3.2	Cronograma de execução	67

4.1.3.3	Aceitação cultural.....	68
4.1.4	Resumo dos resultados	71
4.2	Avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida	73
4.2.1	Projetistas	77
4.2.2	Usuários	78
4.2.3	Projetistas e usuários.....	79
4.2.4	Resumo dos resultados	79
4.2.5	Análise de sensibilidade	80
5	CONCLUSÃO	85
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO APLICADO	96

1 INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva da construção civil é um dos setores mais importantes na economia nacional. Em termos econômicos, o Brasil está em desenvolvimento, com um setor de construção que deverá expandir 100% entre 2010 e 2022 (PAULSEN; SPOSTO, 2013). Em média, a construção para fins habitacionais é responsável por cerca de 26% do total de dinheiro circulando no ramo da construção no Brasil. O setor de construção que inclui elaboração de projetos, fornecedores de materiais e construção geralmente fornece de 5 a 10% dos empregos diretos e indiretos no mundo e gera de 5 a 15% do PIB, em média. Em países em desenvolvimento o setor da construção pode representar até 40% do PIB (GIANNETTI et al., 2018).

Um dos fatores que contribui para a movimentação do setor da construção no Brasil é o crescente índice do déficit habitacional. Segundo dados da Fundação João Pinheiro (2018), em 2015 o déficit habitacional correspondia a 6,355 milhões de domicílios no Brasil. Para atender às necessidades de moradia da população, existem programas de habitação, criados para atender famílias de baixa renda, com o objetivo de viabilizar o acesso à moradia adequada a esta categoria. Um destes programas é o Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) que visa atender às famílias cuja renda limita-se a até dez salários-mínimos (BLUMENSCHNEIN et al., 2015). Em 2021, foi instituído o programa Casa Verde e Amarela, com a finalidade de garantir o acesso à moradia para a população, promovendo o financiamento da construção e pequenas reformas de residências para famílias com até R\$ 7 mil de renda mensal na área urbana e com até R\$ 84 mil de renda ao ano na área rural (BRASIL, 2021).

O setor da construção é responsável por uma grande geração de impactos negativos no meio ambiente, desde a concepção de um projeto até a demolição e ou a restauração de uma construção. Números fornecidos pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente apresentam que, ao longo de seu ciclo de vida, os edifícios demandam cerca de 40% do uso total de energia global, 60% de eletricidade global, 25% de água global, 40% de todos os recursos e liberam cerca de 1/3 dos gases de efeito estufa globais (GIANNETTI et al, 2018).

Impactos ambientais, quando negativos, podem causar risco aos seres humanos e ao meio ambiente. Por conta disso, estudos relativos à sustentabilidade são cada vez mais evidentes. Uma construção sustentável é aquela que busca o consumo controlado de recursos naturais e reduz os impactos negativos sobre o meio ambiente, sobre o bem estar social e sobre

a economia (JANJUA; SARKER; BISWAS, 2019). A consideração de materiais alternativos, em comparação com materiais tradicionais, pode contribuir com a construção de edificações com menor impacto ambiental (SVAJLENKA; KOZLOVSKÁ; POSIVAKOVÁ, 2018).

O desenvolvimento sustentável sugere a capacidade de suprir as necessidades do presente garantindo que as gerações futuras consigam suprir suas próprias necessidades (KEEBLE, 1988). A partir da Conferência das Nações Unidas, realizada no Rio de Janeiro em 1992, e da Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, realizada em Johannesburg, em 2002, conclui-se que o desenvolvimento sustentável é construído sobre três pilares interdependentes: desenvolvimento econômico, desenvolvimento social e proteção ambiental (LOPES, 2010).

Tendo em vista a garantia do desenvolvimento do país e os desafios da engenharia e arquitetura em proporcionar soluções construtivas alternativas, o estudo e a aplicação de novas técnicas construtivas são importantes para desenvolver projetos de habitações, garantindo a sua sustentabilidade e segurança. Porém, a tomada de decisão para escolha do projeto é feita quase que exclusivamente por fatores econômicos, aliados ao prazo de execução, e as questões ambientais são, muitas vezes, ignoradas. Apesar da alta importância das dimensões social e econômica das construções, os graves impactos ao meio ambiente também devem ser abordados.

Com o avanço tecnológico, novos materiais são introduzidos no mercado, e a indústria da construção civil tem sido beneficiada com a produção de elementos pré-fabricados e de maquinários que potencializam o trabalho no canteiro de obras e reduzem a produção de resíduos. Hoje o uso de técnicas construtivas que geram menores custos, agilidade e menos desperdícios nos canteiros de obra e garantem o melhor desempenho térmico e acústico estão sendo mais valorizadas por construtoras como uma alternativa de qualificação e competitividade de mercado.

A escolha de soluções de projetos na construção tem influência no resultado da análise do desempenho ambiental dos edifícios (INVIDIATA; LAVAGNA; GHISI, 2018). O sistema construtivo predominante no mercado brasileiro é o concreto armado como estrutura e fechamento em blocos cerâmicos. Novas técnicas construtivas industrializadas, como o Light Steel Frame (LSF), surgem como uma alternativa a esse sistema convencional. O LSF estimulou grande interesse no mercado brasileiro, mas é relativamente novo, foi introduzido no final dos anos 1990 para a construção de residências. É um sistema que emprega os princípios

da industrialização da construção, incluindo racionalização, padronização, coordenação modular e transformação do canteiro de obras em uma linha de montagem (GOMES; SOUZA; TRIBESS, 2013). Por mais que no Brasil seja uma técnica relativamente nova, o LSF é muito difundido em vários países, especialmente nos Estados Unidos, Inglaterra e Chile (MARTINS et al., 2019).

Em 2015, a comunidade internacional junto às Nações Unidas adotou 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, e entre eles destacam-se o objetivo 11, “Construindo comunidades sustentáveis”; o objetivo 12, “Alcançar consumo e produção sustentáveis”; e o objetivo 13, “Ação Contra a Mudança Global do Clima” (ONU, 2019). Para atingir esses objetivos, é preciso que sejam adotadas soluções estratégicas de gerenciamento, bem como projetos que visem à otimização do uso de recursos e a redução na produção de resíduos, com o auxílio de ferramentas para avaliação e quantificação dos impactos ambientais ainda na fase de projeto. No entanto, o estado atual da Ciência carece de uma metodologia objetiva e universal para avaliar adequadamente a sustentabilidade de um projeto de infraestrutura específico (NAVARRO; YEPES; MARTÍ, 2019).

Como ferramenta de gestão ambiental, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) desenvolveu-se rapidamente nas últimas décadas e é uma metodologia de estudo internacionalmente reconhecida de avaliação do desempenho de material, produto ou edifício (GUINEÉ, 2016). A ACV é cada vez mais aplicada para avaliar o desempenho ambiental dos edifícios (HOLLBERG; GENOVA; HABERT, 2020), sendo uma técnica para avaliar os aspectos associados ao desenvolvimento de um produto e seu impacto potencial ao longo da sua vida útil, desde a aquisição de matéria-prima, processamento, fabricação, uso até seu descarte (SHARMA et al., 2011; ABNT NBR ISO 14040, 2009).

Baseando-se no modelo de sustentabilidade, considerando os pilares ambiental, social e econômico, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi ampliada para uma Avaliação de Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV ou LCSA – Life Cycle Sustainability Assessment). A ASCV inclui o Custo do Ciclo de Vida (CCV) e a Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS) (GUINEÉ, 2016).

O estudo de todo o ciclo de vida de uma edificação não é algo simples, o que dificulta o trabalho dos projetistas. Além disso, são vários os desafios encontrados na implementação da avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida, devido à existência de uma variedade de métricas e de diferentes níveis de maturidade na consideração do conjunto da avaliação do ciclo de vida,

custo do ciclo de vida e avaliação social do ciclo de vida (COSTA; QUINTEIRO; DIAS, 2019). Quando é necessário comparar soluções a partir de vários critérios, é necessário adotar uma estratégia específica, como métodos de Tomada de Decisão com Múltiplos Critérios (TDMC). As técnicas de TDMC permitem ao tomador de decisão avaliar problemas complexos que envolvem critérios múltiplos e divergentes com base nos julgamentos subjetivos de um painel de especialistas ou de partes interessadas (NAVARRO; YEPES; MARTÍ, 2019). O método conhecido como AHP (Analytic Hierarchy Process) é o mais utilizado para tomada de decisão (NAVARRO; YEPES; MARTÍ, 2019), sendo largamente empregado para resolver problemas em projetos de sustentabilidade na engenharia e indústria da construção (ZAMARRÓN-MIEZA; YEPES; MORENO-JIMÉNEZ, 2017; PRASCEVIC; PRASCEVIC, 2017).

Com base nessas colocações, na necessidade de novas habitações no Brasil, na importância de considerar a avaliação da sustentabilidade dos projetos e na necessidade de avanço no estudo de ferramentas para a seleção do projeto mais sustentável, este trabalho tem como objetivo estudar alternativas de sistemas construtivos, integrando a avaliação do ciclo de vida ao processo de tomada de decisão. Foram selecionados e avaliados projetos de Habitações de Interesse Social (HIS) tendo em vista diferentes sistemas construtivos: projeto em alvenaria convencional com estrutura de concreto armado e vedação em blocos cerâmicos, projeto em alvenaria estrutural e projeto em Light Steel Frame (LSF). Os sistemas construtivos foram avaliados com base nos seguintes aspectos quantitativos: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e Custo do Ciclo de Vida (CCV), considerando a fronteira do berço ao portão. Esses critérios foram aliados ao conforto térmico e ao tempo de construção. Além disso, foi considerado um fator subjetivo, que é a aceitação cultural dos sistemas construtivos.

Com este estudo, pretende-se responder à seguinte questão: Como selecionar alternativas de sistemas construtivos para habitações de interesse social, considerando o processo de tomada de decisão envolvendo a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), o Custo do Ciclo de Vida (CCV), o conforto térmico, o prazo de execução e a aceitabilidade dos sistemas construtivos?

Vale ressaltar que, embora as três dimensões possam ser avaliadas ao longo de todo o ciclo de vida de uma estrutura, o presente trabalho é limitado à fase conhecida como "do berço ao portão", principalmente devido à importância dessa etapa no desempenho da estrutura durante toda a sua vida útil. As fases de uso, manutenção, pós-uso e descarte do produto não foram consideradas.

Como ferramentas para a condução deste estudo, foi considerado o software Autodesk Revit, versão estudantil 2018, que trabalha com a tecnologia do Building Information Modeling (BIM), e o plugin Tally, versão educacional 2019 no Autodesk Revit como ferramenta de ACV para avaliar os impactos ambientais dos materiais de construção. Essa potencial integração BIM-ACV em projetos de construção pode resultar em uma medida eficaz para abordar os aspectos de sustentabilidade (NAJJAR et. al, 2019).

Dito isso, este trabalho busca contribuir com o avanço das pesquisas de melhoria da sustentabilidade de projetos da construção civil, colaborando na aplicação da sustentabilidade, integrando o BIM com a ACV e CCV ainda nas fases iniciais do projeto. A integração das ferramentas BIM com a metodologia ACV é considerada um caminho otimista para proteger o meio ambiente, avaliando a sustentabilidade e colaborando com a tomada de decisão no setor de construção (NAJJAR et. al, 2017).

1.1 Justificativa

A indústria da construção tem grande participação na emissão de CO₂, sendo responsável por 38% de todas as emissões no mundo (UNEP, 2020). Por mais que seja alta a contribuição do setor de construção e da urbanização para as emissões de CO₂, a indústria da construção tem o potencial de mitigar essas emissões por meio de tecnologias de eficiência energética que estão em desenvolvimento (AHMAD; ZHAO; LI, 2019). A Agência Internacional de Energia (AIE) estima que as emissões diretas de CO₂ dos edifícios precisam cair em 50%, e as emissões indiretas do setor de construção em 60% até 2030 (UNEP, 2020).

Estratégias de projeto para melhorar a eficiência energética podem diminuir os impactos negativos de um edifício (INVIDIATA; LAVAGNA; GHISI, 2018), havendo alternativas de materiais e concepção de projetos que, consideradas conforme a avaliação dos impactos, tornam possível a construção de edifícios com melhor desempenho ambiental e econômico (SHARMA et al, 2011). Para avaliar e selecionar as estratégias de projeto mais apropriadas para edifícios, elas devem ser analisadas por meio de uma abordagem multidisciplinar baseada no desenvolvimento sustentável (INVIDIATA; LAVAGNA; GHISI, 2018). Sendo assim, na escolha do sistema construtivo a ser considerado em um projeto, o profissional precisa de ferramentas que mostrem quais as vantagens de selecionar um sistema em detrimento de outro.

No entanto, existe uma quantidade extensa de dados que tornam complexa a análise da sustentabilidade de projetos o que prejudica o trabalho dos projetistas envolvidos (COSTA; QUINTEIRO; DIAS, 2019). O método AHP pode contribuir na resolução de problemas, reduzindo a complexidade destes (NAVARRO; YEPES; MARTÍ, 2019) e, tratando-se da indústria da construção civil, o AHP é um dos métodos mais eficientes (PRASCEVIC; PRASCEVIC, 2017).

Como parte inovadora desta pesquisa, os diferentes sistemas construtivos são avaliados e priorizados de acordo com a metodologia AHP, além da consideração de critérios adicionais, que vão além dos pilares do desenvolvimento sustentável, porém agem de forma indireta no custo e eficiência ambiental de construções. A combinação da Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida com o método de tomada de decisão AHP, proposta nesta dissertação, tem o objetivo de apoiar profissionais na definição de soluções de projetos mais sustentáveis. Também é importante destacar os projetos estudados nesta pesquisa. São projetos unifamiliares de Habitação de Interesse Social (HIS) que por apresentarem baixa complexidade, possuem quantidade reduzida de materiais de construção, facilitando a aplicação do modelo proposto e análise dos resultados, além disso, este trabalho contribuiu com melhorias nos projetos de HIS que precisam ser desenvolvidos para reduzir o elevado déficit habitacional no Brasil.

O presente trabalho busca dar continuidade aos estudos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa de estruturas na linha de Infraestrutura Sustentável do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Passo Fundo, contribuindo nos resultados obtidos por Milani (2020), que envolveram a sustentabilidade de pontes e naqueles obtidos por Medeiros (2012), Vitorio Jr. (2020) e Santoro (2015), que abordaram a sustentabilidade de edificações.

1.2 Objetivos

O objetivo geral e os objetivos específicos foram definidos com base no problema e na justificativa desta pesquisa apresentadas nas seções anteriores.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral consistiu em desenvolver um modelo para a comparação e seleção do método construtivo mais sustentável para a construção de projetos de habitação unifamiliar de interesse social, considerando aspectos da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e Custo do Ciclo de Vida (CCV) com base no AHP, aliados a aceitabilidade cultural dos diferentes sistemas construtivos.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- a) realizar a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e Custo do Ciclo de Vida (CCV) para a construção de habitações de interesse social considerando diferentes sistemas construtivos;
- b) aplicar um questionário para avaliar a importância relativa de cada um dos critérios e sistemas construtivos sob a perspectiva dos agentes envolvidos, sendo projetistas (engenheiros civis e arquitetos) e usuários;
- c) aplicar o processo analítico hierárquico aos resultados obtidos no questionário para os critérios avaliados;
- d) realizar uma análise dos resultados obtidos, variando os critérios considerados e sua importância relativa.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta de cinco capítulos. O primeiro é este, que introduz o tema de estudo, apresenta o problema relacionado à pesquisa, a justificativa e os objetivos do estudo, além da presente seção, que contém a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 contém o referencial teórico, trazendo conceitos relacionados à sustentabilidade do ciclo de vida aplicados à construção civil, à utilização de ferramentas BIM para o auxílio da análise da sustentabilidade em projetos, aos métodos de tomada de decisão, especificamente com destaque ao processo analítico hierárquico aplicado à construção civil.

Além disso, são expostos conceitos básicos relativos aos critérios adicionais que foram considerados nesta pesquisa, quais sejam: o conforto térmico, o cronograma de execução aplicado a projetos da construção civil e a aceitação de projetistas e usuários quanto ao método construtivo.

O capítulo 3 apresenta os procedimentos metodológicos considerados no desenvolvimento desta pesquisa. No capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões do estudo e, no capítulo 6 são expostas sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A avaliação da sustentabilidade na construção civil pode ser utilizada quando na comparação de soluções de projetos. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para levantamento dos impactos ambientais é utilizada em diversas indústrias de produtos e serviços e há alguns estudos de ACV sendo desenvolvidos no ramo da construção civil, assim como estudos envolvendo a Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS) e o Custo do Ciclo de Vida (CCV). Nas seções seguintes as pesquisas serão apresentadas, e servem de referencial teórico aos assuntos abordados.

2.1 Avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), surgiu primeiro como uma ferramenta para análise do impacto ambiental de produtos e serviços, os primeiros estudos eram voltados para a quantificação da energia e dos materiais utilizados e dos resíduos lançados no meio ambiente ao longo do ciclo de vida (SHARMA et al., 2011). Levando em consideração que o desenvolvimento sustentável é alcançado com a associação dos pilares ambiental, social e econômico, existem estudos na literatura envolvendo a integração destes três, esta integração como uma perspectiva do ciclo de vida é conhecida como Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) (COSTA; QUINTEIRO; DIAS, 2019). A ASCV, inclui, além da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), o Custo do Ciclo de Vida (CCV) e a Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS) (GUINEÉ, 2016).

Da mesma forma que a ACV em seus primeiros anos, que passou por uma fase de concepção quando abordagens divergentes coexistiram, a ASCV está atualmente passando por uma fase semelhante em direção à construção de uma metodologia mais relevante. Porém, ainda falta um procedimento padronizado sobre como conduzi-la (GUINEÉ, 2016). Além disso, são várias as dificuldades encontradas pelos pesquisadores, como por exemplo, o elevado número de indicadores que os estudos adotam para abordar os três pilares da sustentabilidade em uma perspectiva de ciclo de vida. Entre os desafios enfrentados pelos estudos que adotam poucos indicadores estão a ampliação do número de indicadores. E para os estudos que adotam um grande número de indicadores está a comunicação dos resultados aos tomadores de decisão, a

ponderação e agregação dos resultados e aplicação da análise de decisão multicritério (GUINEÉ, 2016).

2.1.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta usada para a avaliação quantitativa de um material, seus fluxos de energia e impactos ambientais (SHARMA et al, 2011). Os primeiros estudos de ACV datam do final dos anos 1960 e início dos anos 1970, período em que questões ambientais como eficiência de recursos e energia, controle de poluição e resíduos sólidos tornaram-se questões de grande preocupação pública (GUINEÉ, 2016).

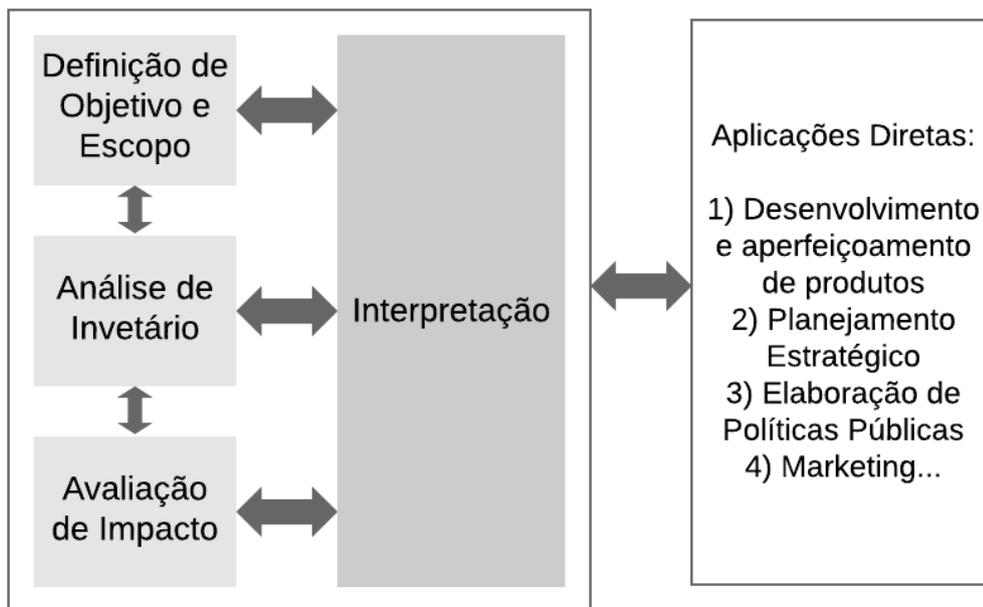
Com o início da concepção do termo da ACV, surgiram abordagens, terminologias e resultados divergentes, pois não havia uma plataforma científica, portanto, as análises iniciais foram realizadas considerando técnicas diferentes sem o uso de um referencial teórico comum. Os resultados obtidos eram diferentes entre si, mesmo quando os objetos do estudo eram os mesmos (GUINEÉ, 2016).

As normas internacionais ISO 14040 (1997) e ISO 14044 (2006), traduzidas no Brasil pela ABNT, sendo denominada NBR ISO 14040:2009 e NBR ISO 14044:2009, fornecem orientações gerais para a implementação da ACV e estabelecem uma metodologia padronizada e sistemática para avaliar os impactos ambientais do ciclo de vida de produtos e serviços (ABNT NBR ISO 14040, 2009; ABNT NBR ISO 14044, 2009). Embora os padrões ISO descrevam a estrutura global de uma ACV, a técnica exata para calcular os impactos ambientais não está definida (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013). Os desafios encontrados pelos pesquisadores, dizem respeito à necessidade de exemplos mais práticos de aplicação da ACV e maneiras eficientes de comunicar os resultados (GUINEÉ, 2016).

Durante muito tempo, os estudos de ACV dos edifícios concentraram-se principalmente na eficiência energética e nas emissões associadas à fase de uso da edificação. Devido a um foco recente de pesquisa no estágio pré-operacional dos edifícios, a atenção se voltou para a extração e fabricação de materiais de construção e a etapa de construção. Materiais de construção, energia incorporada, energia operacional e resíduos de construção e demolição são os indicadores de sustentabilidade mais comuns usados nas avaliações de sustentabilidade da indústria da construção (JANJUA; SARKER; BISWAS, 2019).

Um estudo de ACV é composto por 4 fases, que são inter-relacionadas e passam por um processo iterativo (ABNT NBR ISO 14040, 2009), o esquema está representado na figura 1, e cada uma das etapas estão descritas nas subseções 2.1.1.1 à 2.1.1.4.

Figura 1 - Esquema de Avaliação do Ciclo de Vida.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR ISO 14040:2009.

2.1.1.1 Definição do objetivo e escopo

A primeira fase da ACV trata-se da definição do objetivo e do escopo, estabelecendo a finalidade, unidade funcional e limites do sistema. Por se tratar de uma avaliação de um produto com base em sua função e não com base em suas características físicas, os produtos podem ser comparados, mesmo sendo diferentes, mas tendo a mesma função (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013). O objetivo de uma ACV declara qual a aplicação pretendida e porque está sendo realizado o estudo. O escopo detalha a abrangência do estudo e depende do objetivo definido (ABNT NBR ISO 14044, 2009), inclui itens como o sistema de produto a ser estudado, as funções, a unidade funcional e as fronteiras do sistema. A unidade funcional quantifica as funções identificadas (características de desempenho) do produto. O propósito primário de uma unidade funcional é fornecer uma referência à qual as entradas e saídas são relacionadas. Quando dois sistemas de produto são avaliados, é importante determinar o fluxo de referência

em cada sistema para satisfazer a função determinada, ou seja, a quantidade de produto necessária para desempenhar a função definida (ABNT NBR ISO 14040, 2009). É necessário também, incluir quais as categorias de impacto e indicadores destas categorias serão objetos de estudo da ACV.

A fronteira do sistema define os processos elementares a serem incluídos. Ao se estabelecer a fronteira do sistema, convém que diversos estágios do ciclo de vida, processos elementares e fluxos sejam levados em consideração. No entanto, não é necessário despendere recursos na quantificação daquelas entradas e saídas que não irão alterar de forma significativa as conclusões gerais do estudo (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

A ACV que analisa todas as fases do ciclo de vida de um produto, é conhecida pelo termo “*from cradle to grave*”, esta engloba desde a extração e aquisição de matérias-primas (berço), através da produção de energia e materiais, manufatura, uso, tratamento de fim de vida até a disposição final (túmulo) (COSTA, 2012). Há algumas variações complementares do ciclo de vida, por exemplo, se os estágios do destino final do produto são considerados, como a reciclagem, transformando o produto em uma nova matéria-prima, a abordagem é conhecida como “*cradle-to-cradle*” (berço ao berço) (PIEKARSKI, 2015).

Dependendo dos objetivos estabelecidos e/ou da quantidade de informações disponíveis, é possível realizar a avaliação do ciclo de vida parcial de um produto, como a abordagem “*cradle-to-gate*” (do berço ao portão), que compreende da extração de matérias-primas ao portão da fábrica do produto (SVAJLENKA; KOZLOVSKA; POSIVÁKOVÁ, 2018), ou a abordagem “*gate-to-gate*” (do portão ao portão da fábrica), que considera o ciclo de vida dentro da fábrica, e há ainda a abordagem “*gate-to-crave*” (do portão ao túmulo), que considera da fase de uso ao descarte do produto (PIEKARSKI, 2015).

2.1.1.2 Análise do inventário

A análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) envolve a coleta de dados necessários para a análise e o cálculo de entrada e saída de um sistema de produto (ABNT NBR ISO 14040, 2009). Esta fase consiste em coletar, descrever e verificar todos os dados relativos às entradas, aos processos e às emissões ao longo do ciclo de vida (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013). O inventário deve ser preliminarmente estabelecido para assegurar que o fluxo de entrada de matéria encontre uma saída quantificada como unidade funcional, rejeitos e

subprodutos. A descrição desse fluxo permite colocar em evidência certos fatores de alterações ambientais (fatores de impacto) como, por exemplo, o consumo de recursos naturais e outras emissões (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006). A partir do inventário, identificam-se as cargas ambientais entre os estágios do ciclo de vida ou entre processos individuais (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

2.1.1.3 Avaliação de impactos

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) tem o objetivo de prover informações adicionais para ajudar na avaliação dos resultados do ICV, os recursos e impactos ambientais são quantificados (BUYLE, BRAET, AUDENAERT, 2013). Na avaliação dos impactos, buscase analisar o inventário com base nas categorias de impacto (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

A avaliação do impacto ambiental pode ser feita com base em dois tipos de abordagem, sendo a abordagem por pontos médios ou problema orientado (*midpoint*) e / ou a abordagem por pontos finais ou dano orientado (*endpoint*) (ISMAEEL, 2018; COSTA, 2012). Em uma abordagem *midpoint*, os fluxos são classificados em temas ambientais de impactos potenciais (COSTA, 2012) e é possível expressar as emissões com um maior nível de certeza e confiabilidade, mas inclui processos de cálculo mais complexos (BARE; GLORIA, 2008). Nessa abordagem, os impactos são classificados em temas ambientais como potencial de aquecimento global, potencial de acidificação e potencial de destruição da camada de ozônio, entre outros, apesar do quadro completo dos impactos, é complexa a comparação entre as categorias (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013). Na abordagem por *endpoints* os fluxos ambientais são separados em vários temas (COSTA, 2012). Ela depende do tipo de receptor (saúde humana, ecossistemas, recursos), escala geográfica (global, regional e local), magnitude e prioridade da redução (alta, média e baixa prioridade), bem como do meio de impacto (ar, água, solo e recursos). Não há uma categoria de dano dominante, é importante lidar com diferentes categorias (ISMAEEL, 2018). Essas duas abordagens são complementares, por isso é recomendável integrá-los em uma estrutura comum para avaliar o impacto ambiental. Os indicadores *midpoints* podem ser extrapolados e quantificados em *endpoints* (BARE et al., 2000). Estas duas abordagens fornecem muitas informações para o tomador de decisão, porém, para calcular os resultados é necessário atribuir pesos para combinar as categorias de impacto, o que torna o processo subjetivo (DOSSCHE; BOEL; DE CORTE, 2017)

Como etapas opcionais da AICV, estão a normalização ou ponderação. A normalização expressa as pontuações em uma escala comum e correlaciona as pontuações dos indicadores de impacto caracterizados como um sistema de referência. Isso visa colocar os resultados obtidos em uma perspectiva mais ampla que permita uma melhor interpretação e comunicação (ISMAEEL, 2018). A ponderação indica a relevância das diferentes categorias de impacto (MENDES, 2013).

Não há uma metodologia única para a avaliação dos impactos, há muitos métodos de AICV desenvolvidos em diferentes países de acordo com suas respectivas bases de dados. Dentro de cada método existem ferramentas direcionadas para aplicação que servem de base para o desenvolvimento de aplicativos (softwares). Os aplicativos mais usados no Brasil são o BEES, SimaPro e o GaBi (COSTA, 2012). Alguns métodos mais utilizados são o CML 2002, Ecoindicator 99, EDIP e IMPACT 2002. No Brasil, os métodos mais utilizados são o CML 2002 (midpoint) e o Eco-indicador 99 (endpoint). Além disso, existem alguns mais específicos por região como nos Estados Unidos, existe o TRACI, no Canadá existe o LUCAS e no Japão, o LIME e o JEPIX (COSTA, 2012).

Algumas bases de dados utilizadas para a avaliação ambiental são: CML, DEAM TM, Ecoinvent Dados, GaBi 4 Professional, IO-base de dados para Dinamarca 1999, SimaPro base de dados e o Modelo BOUSTEAD 5.0 (COSTA, 2012).

O GaBi Database e o Ecoinvent são dois bancos de dados europeus que se destacam por sua ampla gama de dados de materiais, usabilidade e integridade (ROCAMORA; GUZMÁN; MARRERO, 2016). O Ecoinvent foi considerado o banco de dados mais adequado para projetos de construção, para todas as categorias de materiais de construção (JANJUA; SARKER; BISWAS, 2019). A existência de uma grande quantidade de bancos de dados, pode gerar uma diferença entre análises e dificuldade na comparação entre diferentes avaliações do ciclo de vida. O Ecoinvent e o Gabi database, quando comparados resultados encontram-se diferenças considerando cada um dos bancos de dados (DOSSCHE; BOEL; DE CORTE, 2017).

O avaliador deve determinar qual a base de dados adequada para a pesquisa. Quando se trata da comparação entre um material de construção com outro, necessita-se um banco de dados contendo o máximo de informações sobre os materiais deve ser usado. Agora, se o avaliador pretende estudar um edifício completo, um banco de dados contendo tantos produtos de construção quanto possível, deve ser considerado (MARTÍNEZ-ROCAMORA; SOLÍS-GUZMÁN; MARRERO, 2016).

2.1.1.4 Interpretação

A interpretação é o estágio final de uma ACV (SALEEM et al, 2018). Trata-se da sumarização dos resultados de um ICV ou AICV, buscando conclusões, recomendações e tomada de decisão (ABNT NBR ISO 14040, 2009). A fase de interpretação fornece resultados consistentes com os objetivos e escopo definidos (SALEEM et al, 2018).

2.1.2 Custo do Ciclo de Vida (CCV)

A análise de alternativas de projeto de construção com foco na otimização do desempenho econômico é melhor realizada utilizando o Custo do Ciclo de Vida (CCV). O CCV conduz análises econômicas avaliando a relação custo-eficácia de sistemas alternativos de construção civil (ABOUHAMAD; ABU-HAMD, 2019). Normalmente, o CCV é para avaliar vários projetos alternativos e ajuda a decidir qual deles tem o menor custo do ciclo de vida (ABOUHAMAD; ABU-HAMD, 2019), também determina qual fase da construção apresenta custos mais elevados (INVIDIATA; LAVAGNA; GHISI, 2018)

O CCV é uma técnica para a comparação de custos considerando todos os fatores econômicos relevantes, tanto em termos de custo inicial quanto de custo operacional futuro (ABOUHAMAD; ABU-HAMD, 2019). No CCV, o custo total está associado ao custo inicial, custo operacional, custo de manutenção e custo de descarte de um produto (GOPANAGONI; VELPULA, 2020).

O CCV é empregado quando alternativas de projeto que atendem aos mesmos requisitos de desempenho, mas diferem em relação aos custos associados a diferentes estágios da vida útil do edifício, e precisam ser comparadas para selecionar aquele com o menor custo do ciclo de vida ou aquele que maximiza o lucro líquido. O CCV deve ser aplicado no início do projeto para permitir que os tomadores de decisão obtenham uma compreensão mais profunda das estratégias de projeto de longo prazo e para otimizar a eficiência do edifício (ABOUHAMAD; ABU-HAMD, 2019). O método mais apropriado para a realização do CCV é o do valor presente líquido (GOPANAGONI; VELPULA, 2020), ou seja, o CCV é a soma de todos os custos incorridos durante o período do estudo, calculados para o valor presente (YOUNIS; EBEAD; JUDD, 2018). A relação entre os diferentes custos que formam o custo do ciclo de vida é apresentada na equação 1 (SANTOS, 2007).

$$CCV = CA + CI + \sum \frac{CO}{(1+r)^n} + \sum \frac{(CR - VR)}{(1+r)^n} + \sum \frac{CP}{(1+r)^n} \quad (1)$$

onde:

CCV Custo do Ciclo de Vida;

CA Custo de Aquisição para o material ou produto;

CI Custo de fabricação ou Instalação;

n Duração do ciclo de vida (em anos);

r Taxa real de juros para o período de tempo considerado (n);

CO Custo Operacional da unidade no ano n (somatório dos custos de operação, inspeção e manutenção);

CR Custo de Reposição do objeto de estudo. É o custo para remoção, transporte e instalação de um novo material ou produto. Quando o material dura todo o ciclo de vida do sistema, CR é igual a zero e permanece a receita líquida obtida pela venda do material (ou valor residual);

VR Valor Residual do objeto de estudo, é o valor da sucata do material ou produto utilizado;

CP Custo da Produção perdida no ano n, está relacionado ao que se deixou de ganhar devido às horas paradas para manutenção, reposição ou limpeza.

Diferentes valores da duração do ciclo de vida (n) poderão influir na indicação do material ou produto mais adequado (SANTOS, 2007).

A taxa de juros diz respeito ao valor do dinheiro no tempo. É usada para determinar os custos futuros em termos de valor presente, e varia de acordo com o tempo, local e período do investimento (YOUNIS; EBEAD; JUDD, 2018). A taxa de juros é calculada a partir do custo de capital (c) e da inflação (i) esperados para o período considerado (t) (SANTOS, 2007), como pode ser visto na equação 2.

$$r = \frac{c - i}{1 + i} \quad (2)$$

2.1.3 Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS)

A Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS) determina o objetivo social da sustentabilidade, envolvendo todas as partes interessadas de um projeto, como o usuário final, a comunidade vizinha, os construtores e os projetistas. A ACVS segue as quatro etapas da ACV, incluindo definição de objetivo e escopo, compilação de inventário, avaliação de impacto e interpretação dos resultados. A ACVS não costuma ser utilizada no setor de construção, um número limitado de estudos envolvendo ACVS foi realizado em edifícios residenciais (JANJUA; SARKER; BISWAS, 2019).

2.2 Building Information Modelling (BIM)

O Building Information Modelling (BIM) é definido como uma tecnologia de modelagem associado a processos de produção, comunicação e análise de modelos de construção (LARIVOIR, 2017), trata-se de uma representação virtual das características de uma edificação, aplicada ao longo de todo seu ciclo de vida (CRIPPA, 2019). É uma tecnologia que integra as informações da construção e desenvolve o campo do conhecimento no planejamento, design, construção, gerenciamento e reciclagem durante as diferentes fases do ciclo de vida de um projeto de construção. Os modelos BIM são utilizados na construção a fim de aumentar o desempenho e a qualidade dos projetos, aumentar a produtividade, reduzir custos e desperdícios, minimizar erros futuros e melhorar as condições de trabalho e de vida aos usuários (NAJJAR et al., 2017).

2.2.1 BIM e ACV

O BIM é uma ferramenta de projeto que facilita a aplicação da ACV no setor da construção (NAJJAR et al., 2017; ANAND; AMOR, 2017). O uso do BIM no estágio inicial do projeto de construção auxilia o processo de tomada de decisão (NAJJAR et al., 2017; PENG, 2016). A integração das ferramentas BIM com a metodologia da ACV é considerada um passo importante para auxiliar os projetistas nos processos de tomada de decisão no setor de construção, no que diz respeito à sustentabilidade dos projetos de construção (NAJJAR et al., 2017).

O nível de integração entre ferramentas BIM e ACV pode ser dividido em estágios, sendo o primeiro, nível zero ou convencional, caracterizado pela geração de relatórios e utilização de ferramentas ACV com o apoio de planilhas. O próximo, se caracteriza por integrações unidirecionais (BIM+ACV e BIM4ACV), considerando o uso de software BIM para extração de quantitativos e a inserção dos dados é feita manualmente. Por fim, as integrações em nível direcional, inserindo-se os dados de impactos ambientais dentro do próprio software de modelagem (GOMES; BARROS, 2018; CRIPPA, 2019). O nível mais avançado é a utilização de recursos ou plugins executados dentro da própria ferramenta de modelagem BIM, como o Tally (CRIPPA, 2019).

O plugin Tally é uma ferramenta de avaliação do ciclo de vida que visa calcular os impactos ambientais dos materiais de construção selecionados (TALLY, 2020). O Tally utiliza as informações geométricas do modelo BIM, junto com o seu inventário para calcular as quantidades de materiais e os impactos do ciclo de vida (HASIK et al, 2019), e permite que arquitetos e engenheiros quantifiquem o impacto ambiental e tomem decisões sustentáveis durante o desenvolvimento do projeto (CRIPPA, 2019). Enquanto se trabalha em um modelo Revit, o usuário pode inserir informações dos materiais de construção no banco de dados Tally (TALLY, 2020). Utilizar plugins ou software que possuem essa relação direta com uma ferramenta BIM pode economizar tempo e contribuir para escolha da melhor solução em uma maneira mais assertiva (CRIPPA, 2019).

Os dados para quantificação do impacto ambiental são encontrados no próprio plugin Tally, que considera como referência o banco de dados GaBi (HASIK et al, 2019; NAJJAR, et al, 2017) e segue a lista de categorias de impactos ambientais com base no método de caracterização de impacto TRACI 2.1, um método midpoint que considera as características dos Estados Unidos. A versão original do TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts) é utilizada em pesquisas ao redor de todo o mundo (BARE; GLORIA, 2008).

2.3 Habitação de Interesse Social

Habitação é sinônimo de abrigo. O homem teve necessidade de se abrigar desde o início da civilização e os povos primitivos utilizavam como abrigo as cavernas e as árvores. Com o seu desenvolvimento, o homem começou a empregar diferentes materiais para construir os

abrigo, como a pedra, as peles, a madeira, a terra e a cerâmica. Por mais que esse abrigo se tornasse cada vez mais elaborado, mantinha a sua função básica, que é um espaço para proteger o homem de intrusos e das intempéries (ABIKO, 1995).

A Constituição Federal do Brasil, afirma que a moradia é um direito de todo o cidadão, assim como a educação, a saúde, a alimentação, o trabalho, o transporte, entre outros (BRASIL, 1988). Porém, no Brasil nem todos têm acesso à moradia. A Fundação João Pinheiro (2018), conceitua déficit habitacional como deficiências do estoque de moradias, sendo verificado quando: as moradias não têm condições de serem habitadas, há coabitação familiar forçada, moradores de baixa renda com dificuldades de pagar aluguel e os que alugam casas e apartamentos para um grande número de pessoas morarem.

A demanda por moradias cria e apoia novas possibilidades de mercado para o setor de construção, principalmente para os chamados projetos de habitação de interesse social. Os programas de habitação de interesse social no Brasil visam permitir o acesso das populações mais pobres às terras urbanas, fornecendo moradia sustentável e digna, promovendo políticas de subsídios econômicos relacionados à implementação de habitação social, projetos e instituições de apoio diretamente conectadas ao setor de habitação social (GIANNETTI et al., 2018).

No fim do século XIX e início do século XX, quando o Brasil transitava da economia agrícola para a industrial, a segregação socioespacial nas cidades traduziu-se pela expulsão da população pobre para as periferias não urbanizadas. Somente a partir de 1930, o Estado iniciou ações visando à produção de moradias (BLUMENSCHNEIN et al., 2015).

Em 1964, ocorreu a primeira iniciativa brasileira para a criação de uma política habitacional de abrangência nacional, com a edição da lei nº 4.380/64 (BRASIL, 1964). Esta lei instituiu o Sistema Financeiro de Habitação (SFH), o Banco Nacional da Habitação (BNH) e a correção monetária nos contratos imobiliários de interesse social (CAIXA, 2012). A política habitacional executada pelo BNH teve por objetivo viabilizar o acesso à moradia às diferentes classes sociais com foco nas famílias de baixa e média renda.

No final dos anos 70, a crise econômica enfrentada pelo país levou à extinção do BNH pelo Decreto-Lei 2.291 de novembro de 1986, cujas funções foram redistribuídas por vários órgãos de governo. A partir de então, a Caixa Econômica Federal assumiu a condição de maior executor das políticas habitacionais do Governo Federal (CAIXA, 2012).

Os problemas de moradia agravaram-se em função do empobrecimento da população e da drástica redução dos financiamentos habitacionais. A partir daí, os programas governamentais enfrentaram diversas dificuldades, mas uniram esforços para garantir o desenvolvimento urbano integrado. A situação começou a mudar a partir de 2003, com a criação do Ministério das Cidades e a aprovação da Política Nacional de Habitação (PNH) em 2004. E novamente, em 2008, com o agravamento da crise financeira internacional, o governo federal adotou medidas mitigadoras do impacto na economia nacional, entre essas medidas, encontrava-se o lançamento do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) (CAIXA, 2012).

Os projetos de habitação social do Brasil estão focados em oferecer abrigo para famílias de baixa renda e garantir moradia para toda a população, como o PMCMV (BLUMENSCHNEIN et al., 2015) e o programa Casa Verde e Amarela, lançado em 2021 (BRASIL, 2021).

A escolha do método construtivo de projetos de habitação de interesse social, geralmente se baseia pela questão econômica. A ideia é que, em vez de escolher projetos tendo como base exclusivamente questões econômicas, outros indicadores também devem ser considerados na decisão de quais projetos de habitação social são mais adequados para cada região brasileira. A escolha de um projeto exclusivamente com base em considerações econômicas pode ser prematura, pois pode abrir mão da oportunidade de maximizar a sustentabilidade do programa nacional de habitação social (GIANNETTI et al., 2018).

2.4 Técnicas de tomada de decisão

Os estudos para a sustentabilidade devem se basear na consideração simultânea das consequências econômicas, ambientais e sociais ao longo do tempo. O setor da construção civil está entre os maiores consumidores de recursos naturais, contudo a construção de infraestruturas promove o bem-estar econômico e o desenvolvimento social dos países, pois contribui para a estruturação territorial das regiões e para a prestação de serviços. Portanto, é importante o desenvolvimento de projetos de infraestrutura, visto que a maioria deles é projetada para atender um grupo significativo de pessoas por um longo período de tempo, e sabe-se que a avaliação das diferentes dimensões da sustentabilidade relacionadas ao projeto de infraestrutura está em andamento (NAVARRO; YEPES; MARTÍ, 2019).

Embora existam ferramentas padronizadas para avaliar os diferentes impactos do ciclo de vida dos produtos, não há consenso sobre como lidar com a consideração simultânea dos três

pilares que definem a sustentabilidade, nem sobre quais critérios específicos devem ser considerados na tomada de decisão. Quando se envolve múltiplos critérios para a avaliação das dimensões conflitantes da sustentabilidade, o uso de Técnicas de Tomada de Decisão Multicritério (TDMC) revelou-se a abordagem mais adequada em comparação com outros métodos, como otimização simples ou multiobjetivo. As TDMC permitem ao tomador de decisão avaliar problemas complexos que envolvem critérios múltiplos e divergentes com base nos julgamentos subjetivos de um painel de especialistas ou de partes interessadas afetadas pela decisão (NAVARRO; YEPES; MARTÍ, 2019).

2.4.1 Processo Analítico Hierárquico (AHP)

A resolução de um problema de tomada de decisão com vários critérios começa com a definição do problema, identificação das restrições e critérios e, finalmente, a descoberta de alternativas a serem avaliadas e selecionadas pelo tomador de decisão. Como ferramenta de auxílio para resolver esse tipo de problema, o professor Thomas Lorie Saaty desenvolveu um método chamado Analytic Hierarchy Process (AHP), traduzido para o português como um Processo Analítico Hierárquico, entre 1971 e 1975 (SAATY, 1987).

Dentre os métodos de tomada de decisão, o AHP é o método mais utilizado para tomada de decisão (NAVARRO; YEPES; MARTÍ, 2019). Além disso, o método AHP é considerado o mais utilizado quando o objetivo é resolver problemas diferentes na realização de projetos de sustentabilidade na engenharia e indústria da construção (ZAMARRÓN-MIEZA; YEPES; MORENO-JIMÉNEZ, 2017; PRASCEVIC; PRASCEVIC, 2017).

O método começa com uma decomposição do problema em problemas menores hierarquicamente independentes, e os critérios alocados no mesmo nível, são comparados em pares e pesos relativos são atribuídos a cada critério em cada nível. Para fazer as comparações, uma escala de números indica quantas vezes mais importante ou dominante um elemento está com relação ao critério com o qual eles estão sendo comparados. Essa escala é conhecida como escala fundamental de Saaty (KRIPKA; YEPES; MILANI, 2019).

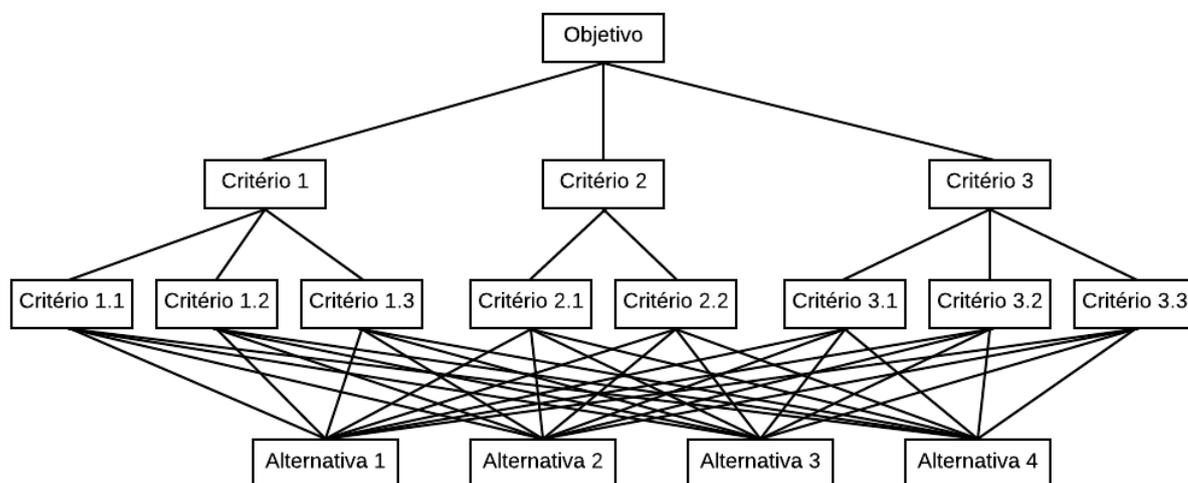
O AHP é uma teoria geral de medição. É um método utilizado para realizar comparações, que podem ser obtidas de medições reais ou de uma escala fundamental que reflete a força relativa de preferências e sentimentos. O AHP tem uma preocupação especial

com a consistência, sua mensuração e dependência dentro e entre os grupos de elementos de sua estrutura (SAATY, 1987).

A medição de eventos físicos, pode ser explicada como o domínio do que é tangível, pois se refere a algum tipo de realidade objetiva fora do indivíduo que conduz a medição. Já a medição de eventos sociais, pode ser entendido como o domínio intangível, pois se referem às ideias e crenças subjetivas do indivíduo sobre si mesmo e o mundo. É difícil saber se existe uma teoria que lide com esses dois mundos, e o AHP é um método que pode ser usado para estabelecer medidas nos domínios físico e social (SAATY, 1987).

A primeira etapa do método AHP consiste em escolher os fatores que são importantes para a tomada de decisão. No processo de hierarquia analítica, os fatores selecionados são organizados em uma estrutura hierárquica que parte de um objetivo geral a critérios, subcritérios e alternativas em níveis sucessivos (SAATY, 1990). A figura 2 apresenta a estrutura hierárquica do método AHP. O objetivo final fica no nível mais alto, e os critérios e subcritérios ficam nos níveis inferiores. O Primeiro passo é definir os critérios e subcritérios.

Figura 2 - Estrutura Hierárquica do método AHP.



Fonte: Adaptado de Saaty (1986).

Depois de definidos os critérios e a estrutura hierárquica, deve-se estabelecer prioridades para os principais critérios, julgando-os em pares por sua importância relativa, gerando assim uma matriz de comparação em pares. O método AHP utiliza uma escala

fundamental de 1 a 9, conforme apresenta o quadro 1. Essa escala não consiste em simplesmente atribuir números, os valores indicam a “força” da preferência por um sobre o outro (SAATY, 1990). O número de julgamentos necessários gera uma matriz de ordem “n” sendo que os elementos da diagonal principal são iguais à “1” (SAATY, 1987).

Quadro 1 - Escala Fundamental de Comparação por pares.

Valor	Definição	Comentários
1	Igual Importância	O critério A tem igual importância que o critério B
3	Importância Moderada	A experiência e o julgamento favorecem ligeiramente o critério A sobre o B
5	Grande Importância	A experiência e o julgamento favorecem fortemente o critério A sobre o B
7	Muito Grande Importância	O critério A é muito mais importante que o critério B
9	Extrema Importância	Sem dúvida o critério A está sobre o critério B
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários entres os julgamentos	Valores utilizados quando o decisor sentir dificuldade ao escolher entre dois graus de importância adjacentes.

Fonte: Adaptado de Saaty (1986).

Analisando as diferentes alternativas em relação aos critérios do nível inferior e a comparação dos critérios do mesmo nível hierárquico, chega-se a uma matriz quadrada denominada de matriz de decisão. Essa matriz é positiva e recíproca (se $a_{ij} = x$, então $a_{ji} = 1 / x$) (SAATY, 1990).

Saaty (1990) afirma que a matriz de decisão deve apresentar consistência (a matriz não deve conter contradições na avaliação realizada). Para se obter a consistência, deve-se verificar o Índice de Consistência (CI), demonstrado na equação 3, em que “ λ_{max} ” é o autovalor e “n” é a dimensão da matriz de decisão. Depois de obtido o CI, é obtida a Razão de Consistência (CR), conforme equação 4. Se esta razão for inferior a 0,1, os pesos aos critérios podem ser aceitos, caso contrário, os pesos deverão ser revistos.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

onde RI é o índice aleatório, que indica a consistência de uma matriz aleatória, obtido pelos valores do quadro 2.

Quadro 2 - Índice Aleatório RI

Tamanho da Matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatório	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de Saaty (1987).

O principal autovetor (w) de cada linha da matriz deve ser determinado, ele dá a ordem de prioridade dos critérios. O método da análise hierárquica busca o autovalor máximo, λ_{\max} (equação 5), que pode ser calculado pela multiplicação da matriz de decisão pelo vetor w , seguido da divisão desse novo vetor encontrado (SAATY, 1990).

$$A \times w = \lambda_{\max} \times w \quad (5)$$

onde A representa a matriz de decisão, w o autovetor ou vetor de preferência e λ_{\max} o autovalor.

Navarro, Yepes e Martí (2019) destacam a importância de realizar análises de sensibilidade em problemas envolvendo múltiplos critérios. Deve-se avaliar os aspectos que possam alterar significativamente as conclusões da avaliação, de modo a garantir a consistência da decisão final. São poucos os estudos que incluem uma análise de sensibilidade em suas avaliações. A atenção maior sempre é dada na sensibilidade dos resultados em relação aos pesos dos critérios escolhidos. Isso evidencia que a ponderação é considerada uma grande fonte de incerteza nos problemas de TDMC, geralmente derivada da subjetividade inerente à ponderação com base nos julgamentos de especialistas. A maneira usual de proceder é tornar predominante um dos critérios de decisão envolvidos em relação ao restante e comparar os resultados com os obtidos após a ponderação convencional. Isso permite que os tomadores de decisão identifiquem os critérios em que a subjetividade é maior e, portanto, mais sensível aos vieses dos especialistas (NAVARRO; YEPES; MARTÍ, 2019).

2.4.2 Tomada de Decisão em Grupo

Quando se trata de um grupo de pessoas para realizar os julgamentos, o problema está em sintetizar os julgamentos para que sejam encontradas as prioridades dos critérios e alternativas de um problema.

Quando muitos indivíduos geograficamente dispersos fornecem os julgamentos, a inconsistência (variação) entre os indivíduos é muito mais importante do que a inconsistência de um único deles. Sendo assim, é necessário um procedimento estatístico para lidar com a variação entre a opinião das pessoas, a fim de apresentar um único valor para os pesos das alternativas. Pode-se dividir os julgamentos em subgrupos, sendo que as matrizes de julgamento são obtidas para cada grupo nos casos em que os grupos são significativamente diferentes entre si. Caso contrário, uma única matriz de julgamento é desenvolvida para os julgamentos de todos os indivíduos (BASAK; SAATY, 1993).

Existem diferentes maneiras para agregar informações quando mais de um ou muitos indivíduos participam de um processo de decisão, sendo que as mais significativas para o método AHP são: (1) agregar os julgamentos individuais para cada conjunto de comparações pareadas em uma "hierarquia agregada" (Aggregating Individual Judgments – AIJ); e (2) sintetizando cada uma das hierarquias do indivíduo e agregando as prioridades resultantes (Aggregating Individual Priorities – AIP). Em qualquer umas das opções, a importância relativa dos tomadores de decisão pode ser considerada igual ou pode ser dada mais importância a um do que a outro (FORMAN; PENIWATI, 1998).

Quando é dada igual importância aos indivíduos de um grupo, a média geométrica é a maneira correta de sintetizar os julgamentos dados por diversas pessoas (ACZEL; SAATY, 1983). Ao calcular a média geométrica dos julgamentos (AIJ) ou das prioridades (AIP), geralmente assume-se que os indivíduos são de igual importância. Se, no entanto, os membros do grupo não forem igualmente importantes, forma-se uma média geométrica ponderada. A média geométrica e média geométrica ponderada são demonstradas nas equações 6 e 7, respectivamente (FORMAN; PENIWATI, 1998).

Média geométrica ponderada de julgamentos (AIJ):

$$J_g(k,l) = \prod_{i=1}^n J_i(k,l)^{w_i} \quad (6)$$

onde:

$J_g(k,l)$ refere-se ao julgamento do grupo sobre a importância relativa dos fatores k e l ;

$J_i(k,l)$ refere-se ao julgamento do indivíduo i sobre a importância relativa dos fatores k e l ;

w_i é o peso de indivíduo i ; sendo que: $\sum_{i=1}^n w_i = 1$;

E “ n ” o número de tomadores de decisão.

Média geométrica ponderada das prioridades (AIP):

$$P_g(A_j) = \prod_{i=1}^n P_i(A_j)^{w_i} \quad (7)$$

onde:

$P_g(A_j)$ refere-se à prioridade do grupo da alternativa j ;

$P_i(A_j)$ refere-se à prioridade do indivíduo i da alternativa j ;

w_i é o peso de indivíduo i ; sendo que: $\sum_{i=1}^n w_i = 1$;

e “ n ” o número de tomadores de decisão.

A questão agora, é como calcular os pesos atribuídos a cada tomador de decisão. Para determinar as prioridades dos tomadores de decisão Saaty (1994), sugere formar uma hierarquia de fatores como conhecimento, experiência, desempenho anterior, habilidades persuasivas, esforço no problema, entre outros. O problema é quem deve julgar essa hierarquia. Se não for possível que uma pessoa forneça os julgamentos, é possível pedir aos mesmos tomadores de decisão que forneceram julgamentos para a hierarquia original que também fornecerão julgamentos para essa hierarquia. Nesse caso, tem-se um problema de como ponderar seus julgamentos ou prioridades individuais no processo de agregação para determinar os pesos a serem designados pelos tomadores de decisão na agregação da hierarquia original. Uma possibilidade é assumir pesos iguais para todos os tomadores de decisão.

2.5 Critérios adicionais considerados na pesquisa

O objetivo desta pesquisa é desenvolver uma metodologia para a tomada de decisão quanto à seleção de sistemas para a construção de habitações unifamiliares de interesse social unifamiliares, com foco na sustentabilidade, considerando a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e o Custo do Ciclo de Vida (CCV). Além disso, serão adotados critérios adicionais, como o conforto térmico, cronograma de execução e aceitação cultural quanto aos diferentes sistemas construtivos. Uma breve revisão da literatura a respeito destes critérios adicionais está apresentada nos itens 2.5.1, 2.5.2 e 2.5.3.

2.5.1 Conforto térmico

O conforto térmico se relaciona com o estado que representa a satisfação do homem com o ambiente. Sendo uma sensação humana, está situado no campo subjetivo e depende, além de fatores físicos, de fatores fisiológicos e psicológicos. Além disso, como não são todos os ocupantes de um ambiente que se sentirão confortáveis termicamente, criam-se condições de conforto considerando um grupo de pessoas (LAMBERTS et al., 2016).

Um projeto de construção deve além de atender o conforto do usuário, garantir uma eficiência energética, sendo que o uso de estratégias de aquecimento e resfriamento em um projeto garante uma redução no tempo de utilização de sistemas artificiais para atingir o conforto térmico, consequentemente reduz o consumo de energia nas edificações (LAMBERTS et al., 2016). Apesar de o uso de sistemas de ar-condicionado para aquecimento e refrigeração ainda ser limitado no Brasil, seu uso representa cerca de 20% do consumo de eletricidade em residências (GHISI; GOSH; LAMBERTS, 2007). Devido a todos esses fatores, a entrega de residências termicamente confortáveis, que requerem menos uso de energia para obter conforto térmico, é desejada especialmente para famílias de baixa renda (TUBELO et al, 2018).

Triana, Lamberts e Sassi (2015) encontraram evidências da necessidade de melhorar o desempenho térmico e energético dos edifícios no setor de habitação social. O maior potencial de melhoria na redução da energia incorporada está relacionado à escolha de materiais de parede com menor energia incorporada e maior durabilidade, de modo a reduzir a necessidade de manutenção através da substituição de materiais. Foram feitas algumas pesquisas no Brasil sobre a adequação do uso de materiais isolantes, ou seja, com baixos valores de transmitância

térmica (TUBELO et al, 2018; PACHECO; LAMBERTS, 2013). Os materiais e elementos construtivos se comportam termicamente em função de suas propriedades térmicas. Valores mais baixos de transmitância térmica para telhados e paredes, resultam em menor consumo de energia (TUBELO et al., 2018; PACHECO, 2013).

A ABNT NBR 15220:2005 é a norma brasileira que estabelece as definições os requisitos para o desempenho térmico de edificações. A parte 2 da norma, fornece tabelas com as principais propriedades térmicas dos materiais que compõe os elementos construtivos, apresenta os métodos de cálculo, para elementos homogêneos e heterogêneos, de transmitância térmica, capacidade térmica, fator solar e atraso térmico (LAMBERTS et al., 2016).

A ABNT NBR 15220:2005 - Parte 3, apresenta recomendações quanto ao desempenho térmico de habitações unifamiliares de interesse social aplicáveis na fase de projeto. Ao mesmo tempo em que estabelece um zoneamento bioclimático brasileiro, são feitas recomendações de diretrizes construtivas e detalhamento de estratégias de condicionamento térmico, com base em parâmetros e condições de contorno fixados.

De acordo com a ABNT NBR 15220:2005 - Parte 3, o Brasil é dividido em Zonas Bioclimáticas, e cada uma dessas zonas necessita de diferentes estratégias de projetos para garantir o conforto térmico. A norma apresenta também, propriedades térmicas de alguns tipos de paredes e coberturas. A partir da divisão do Brasil em zonas bioclimáticas, a ABNT NBR 15220:2005 - Parte 3, determina as recomendações e diretrizes construtivas para adequação da edificação ao clima local. Essas recomendações estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 - Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação

Vedações Externas		Transmitância Térmica – U (W/m ² .K)	Atraso Térmico – φ (horas)	Fator Solar – FS _o (%)
Paredes	Leve	U ≤ 3,00	Φ ≤ 4,3	FS _o ≤ 5,0
	Leve refletora	U ≤ 3,60	Φ ≤ 4,3	FS _o ≤ 4,0
	Pesada	U ≤ 2,20	Φ ≥ 6,5	FS _o ≤ 3,5
Coberturas	Leve isolada	U ≤ 2,00	Φ ≤ 3,3	FS _o ≤ 6,5
	Leve refletora	U ≤ 2,30 FT	Φ ≤ 3,3	FS _o ≤ 6,5
	Pesada	U ≤ 2,00	Φ ≥ 6,5	FS _o ≤ 6,5

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15220:2005 – Parte 3.

Além das recomendações da ABNT NBR 15220:2005 sobre a eficiência energética e conforto térmico das edificações, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) estabelece por meio da portaria nº 50/2013, as regras zelando pela eficiência energética e considerando a importância de considerar requisitos de desempenho para os segmentos de projeto e construção de edificações. Esta portaria, apresenta as informações de transmitância e capacidade térmica de alguns modelos de vedações verticais.

2.5.2 Cronograma de execução

Uma das etapas de planejamento de uma construção é a elaboração do cronograma de execução. O cronograma físico é feito determinando-se as fases de execução da obra, com uma sequência das atividades. Além disso, estimam-se os gastos ao longo da realização das atividades (DAUMAS; NOGUEIRA; CELESTINO, 2010).

A elaboração de um cronograma de obra é variável, pois depende de diversas condições, como às características construtivas do projeto, às condições do canteiro, ao controle gerencial, aos sistemas construtivos, à estrutura organizacional do projeto e à produtividade da mão de obra (THOMAS et al., 1990).

Existem banco de dados nacionais que possuem o levantamento de alguns índices de produtividade de mão de obra, para a determinação do cronograma de execução, porém, nem sempre esses índices retratam a realidade. Diante disto, construtoras acabam por criar um banco de dados e estimar seus próprios indicadores de produção para a elaboração e controle dos cronogramas de suas obras.

2.5.3 Aceitação Cultural

O critério aceitação cultural representa o aspecto qualitativo no qual envolve a adaptabilidade dos usuários aos diferentes sistemas construtivos. O método construtivo convencional do Brasil, é artesanal (CAMPOS, 2014), com estrutura em concreto armado e com vedação em blocos cerâmicos (KLEIN; MARONESI, 2013).

Existem outros sistemas construtivos, como a alvenaria estrutural e o Light Steel Frame (LSF). A alvenaria estrutural é um sistema construtivo muito utilizado atualmente na construção

de casas populares, por se tratar de um sistema econômico, rápido e seguro quando comparado com a alvenaria convencional (KLEIN; MARONESI, 2013).

O LSF que é um método construtivo caracterizado por uma estrutura constituída de perfis de aço leve galvanizados formados a frio (KLEIN; MARONESI, 2013), tem sido empregado como forma de aumentar a sustentabilidade das construções e por ser um sistema industrializado, possibilita uma construção a seco com grande rapidez de execução (SANTIAGO; FREITAS; CASTRO, 2012). A aceitação cultural do LSF é o fator determinante para a pouca difusão desse sistema no ambiente brasileiro, seu uso em habitações populares apresenta menos aceitação quanto aos demais sistemas construtivos (CAMPOS, 2014).

2.6 Estado da arte

Dentre os estudos que envolvem a sustentabilidade aplicada em projetos da construção civil, a grande maioria das pesquisas leva em consideração apenas uma dimensão da sustentabilidade, principalmente a dimensão ambiental, sendo que alguns estudos levam em consideração a dimensão ambiental em conjunto com a dimensão econômica e poucos consideram também, a dimensão social. Bahramian e Yetilmezsoy (2020), analisaram uma amostra de publicações considerando o uso de ACV entre os anos de 1997 até 2018, encontrando mais de 9.000 publicações que referenciavam a “Avaliação do Ciclo de Vida” e “construções”. Algumas pesquisas sobre ACV na construção civil, levam em consideração a eficiência energética das construções (FOUQUET et. al, 2015) e outras focam na integração da ACV em sistemas de certificação de edifícios (ANAND; AMOR, 2017).

Esta pesquisa na literatura buscou artigos de revisão a respeito do estado da arte dos assuntos relacionados neste estudo. Na sequência, comenta-se sobre estes estudos e são apresentadas as principais conclusões destes autores com exemplos de trabalhos desenvolvidos correlacionados aos temas propostos nesta pesquisa.

Os estudos de ACV na construção civil, diferem pelo método construtivo, tipo de construção e fases do ciclo de vida considerados na pesquisa (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013). Algumas das pesquisas consideram bases de dados comuns e mais utilizados no mundo todo, enquanto outras adotam um banco de dados local (LU et. al, 2021). A consideração de diferentes métodos de ACV aplicados a um caso idêntico pode gerar resultados diferentes (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013). Quanto aos indicadores de

impacto ambiental analisados na ACV, a energia é o mais considerado, seguido pelas emissões de carbono (também chamadas de emissões de CO₂, potencial de aquecimento global, emissões de gases de efeito estufa e pegada de carbono) (LU et. al, 2021).

Estudos de ACV na construção civil consideram diferentes unidades funcionais, como por exemplo, o metro quadrado construído ou o edifício como um todo. Além disso, é possível encontrar pesquisas que consideram mais de uma unidade funcional em um mesmo estudo de caso (ANAND; AMOR, 2017).

Li e Altan (2011) avaliaram os impactos ambientais de uma estrutura de concreto armado, uma estrutura de aço e uma estrutura de madeira em termos de energia incorporada e emissões de CO₂ em Taiwan. Foram considerados os impactos do berço ao portão, incluindo o transporte das matérias primas. Os resultados mostraram que a estrutura de madeira apresenta impactos ambientais relativamente menores em termos de energia incorporada e emissões de CO₂ na construção civil em Taiwan. A estrutura de concreto armado consumiu maior energia e apresentou o maior potencial de aquecimento global.

Vitale et al. (2018) realizaram a quantificação e o estudo comparativo do desempenho ambiental na construção de uma residência unifamiliar com estrutura convencional de concreto armado com paredes de alvenaria e uma estrutura de aço conformado a frio com painéis de revestimento e isolamento, considerando a comparação do impacto ambiental causado em cada uma das fases da construção. Os autores abordaram três fases do ciclo de vida para a análise, a construção, a fase de uso e o fim da vida útil. As categorias de impacto consideradas para a avaliação foram: Inorgânicos Respiratórios (IR), Aquecimento Global (GWP) e Energia Não Renovável (NRE). A análise comparativa entre as duas residências mostrou que a residência com estrutura de perfis formados a frio apresentou melhor desempenho ambiental.

A preocupação com a grande quantidade de emissões de dióxido de carbono (CO₂) dos edifícios chineses fez com que Li et al. (2019) desenvolvessem um estudo para quantificar as emissões do ciclo de vida de estruturas de concreto armado, a fim de promover o desenvolvimento de edifícios de baixo carbono na China. Os resultados mostraram que a quantidade de emissões de CO₂ é, geralmente, 30% maior na fase de uso e manutenção do que na fase de construção, podendo atingir até 300% para edifícios hospitalares. Em contraste, as emissões de CO₂ durante a fase de demolição são relativamente pequenas, representando de 3% e 12% das emissões do ciclo de vida do edifício. Em termos do tipo de construção, as emissões de CO₂ dos edifícios hospitalares são maiores do que outros tipos de construção.

Tratando-se do CCV, alguns estudos consideram uma ou duas fases do ciclo de vida, enquanto poucos consideram todo o ciclo de vida na avaliação do CCV. O Valor Presente Líquido (VPL) é considerado para a determinação do CCV (LU et. al, 2021).

AbouHamad e Abu-Hamd (2019) realizaram um estudo com o objetivo de desenvolver uma estrutura para a seleção de sistemas de construção de edifícios utilizados em aplicações residenciais, comerciais e de escritórios, considerando os sistemas de construção com estruturas de Concreto Armado (CA), estruturas de Aço Estrutural (AE) e estruturas de aço com Perfil Formado a Frio (PFF). A análise se baseou no ciclo de vida da estrutura do berço ao túmulo, incluindo todos os componentes de custo do estágio de construção, estágio de uso e estágio de descarte, além de possíveis opções de reciclagem ou reutilização. Os resultados encontrados mostraram que o custo total é similar para as estruturas em CA e PFF, enquanto pode ser até 13,4% maior em estruturas em AE. Na análise da fase de reciclagem ou reutilização, o custo total do sistema em CA e do sistema em AE tornou-se quase o mesmo, enquanto o custo do ciclo de vida do sistema em PFF tornou-se 22% menor.

Castro (2012) realizou um estudo de comparação de dois materiais estruturais sendo o concreto armado e o aço, procurando atingir valores ou classificações objetivas que conseguissem traduzir as diferenças entre os dois materiais, na perspectiva da construção sustentável. Neste estudo, a autora introduziu indicadores relacionados com as dimensões econômica e social. Como resultado final do estudo, concluiu-se que a estrutura em concreto armado apresentou um melhor desempenho, porém salienta-se que para uma maior precisão nos resultados, seria necessário aumentar o número de exemplos.

Invidiata, Lavagna e Ghisi (2018) propuseram um método combinando conforto térmico, mudança climática, ACV, avaliação do CCV e tomada de decisão multicritérios para a seleção de projetos de edifícios. Os autores adotaram 6 projetos diferentes. O projeto que apresentou o maior nível de sustentabilidade foi o projeto com estrutura de concreto com tijolos, seguido pelo projeto em estrutura de concreto armado com blocos de concreto celulares e madeira laminada colada (X-Lam). O estudo mostrou que a tomada de decisão multicritérios, garante a seleção correta de estratégias de projeto para obter edifícios mais sustentáveis.

O volume de pesquisas relacionadas à integração da ACV e CCV usando o BIM aumentou entre 2013 e 2020 (LU et. al, 2021).

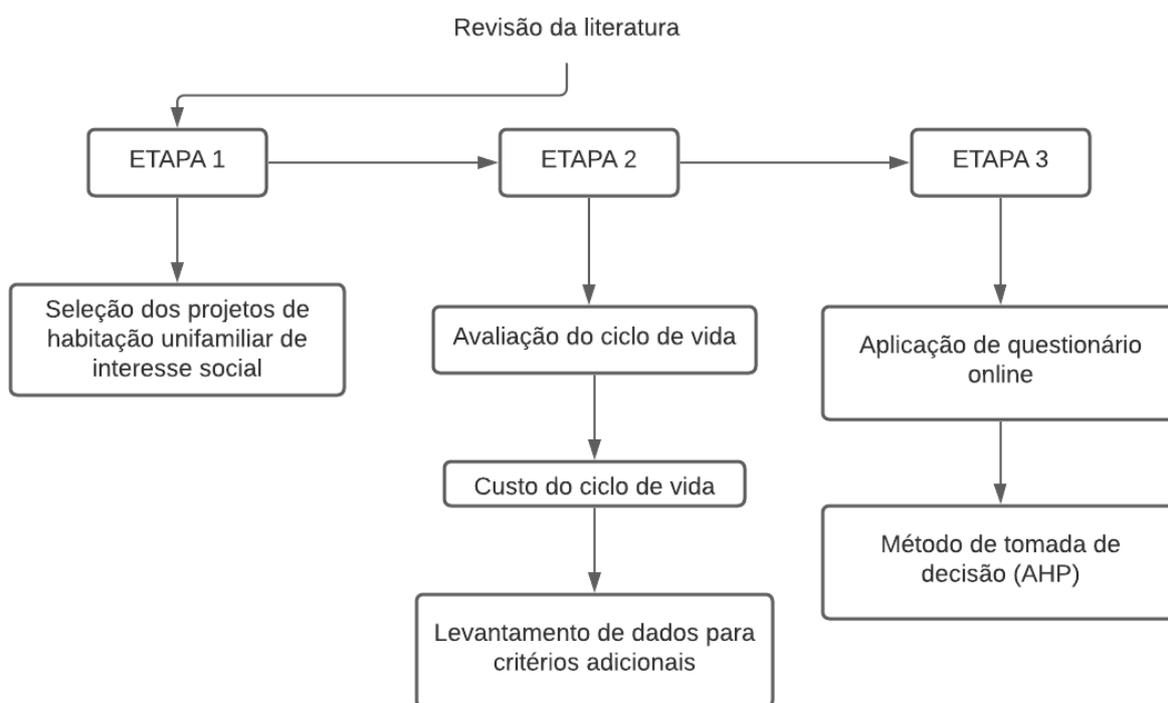
Najjar et al. (2017) desenvolveram um estudo de caso de um prédio comercial para validar o desenvolvimento de conceitos de projeto e discutir os resultados gerados pelas

ferramentas BIM e ACV. Foi empregado o software Autodesk Revit para modelagem do edifício e o plugin Tally como ferramenta para avaliar os impactos ambientais dos materiais de construção. A integração das ferramentas BIM com a metodologia ACV colabora para aumentar a sustentabilidade dos projetos e os processos de tomada de decisão no setor de construção.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para atender o objetivo geral deste trabalho, foram adotados os procedimentos apresentados neste capítulo. O referencial teórico abordou os conceitos importantes para a fundamentação desta pesquisa. O estudo foi dividido em 3 etapas: na etapa 1 foram selecionados os projetos de habitação unifamiliar de interesse social; na etapa 2 realizou-se a avaliação da sustentabilidade dos projetos e levantamento de critérios adicionais para a pesquisa e; na terceira etapa realizou-se a comparação entre os projetos selecionados. A figura 3 apresenta o fluxograma geral das fases do trabalho para o alcance dos objetivos propostos. As etapas são detalhadas nas subseções 3.1 a 3.5.

Figura 3 - Fluxograma geral das atividades realizadas na dissertação.



Fonte: Autora.

3.1 Seleção dos projetos

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram selecionados três projetos de habitação de interesse social unifamiliar com diferentes sistemas construtivos, sendo os dois primeiros

retirados do trabalho de Vitorio Jr. (2020). O local de construção dos três projetos foi considerado na cidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brasil, o mapa indicando a localização está apresentado na figura 4.

Figura 4 - Cidade de construção das residências



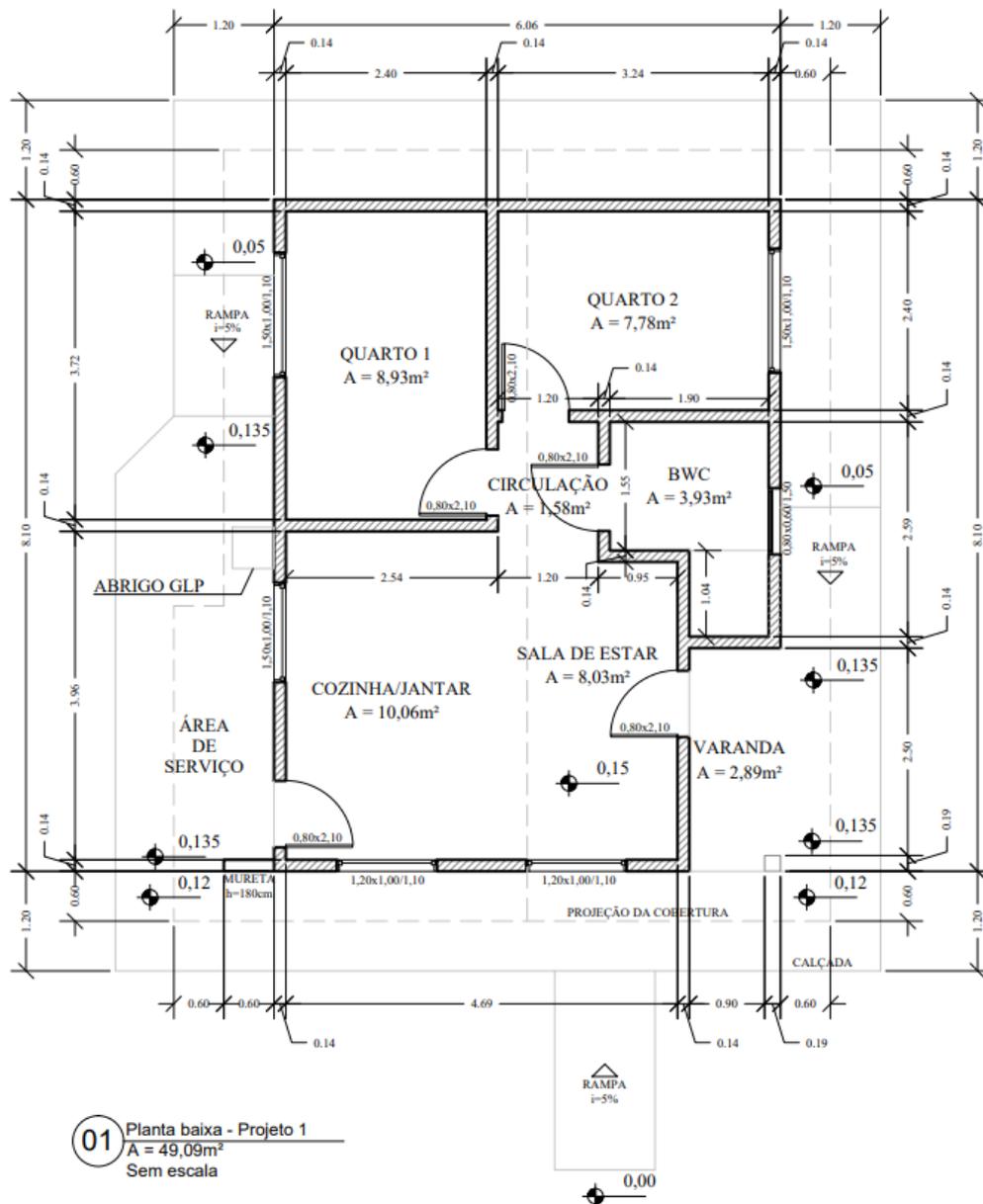
Fonte: Autora, com base em imagem do Google Maps.

O projeto 1 caracteriza-se pela construção em alvenaria convencional, sendo estrutura de concreto armado e vedação com blocos cerâmicos, o método construtivo predominante no Brasil, o projeto 2 caracteriza-se pela construção em alvenaria estrutural e o projeto 3 caracteriza-se pela construção em Light Steel Frame (LSF), perfis leves de aço com fechamento em placas cimentícias e gesso acartonado. Os sistemas construtivos dos projetos 1 e 2 foram selecionados em função da grande utilização dos mesmos em projetos de habitação de interesse social no Brasil e o projeto 3 foi selecionado visto ser um sistema construtivo industrializado, caracterizado pela menor consumo de materiais e apresentar rapidez de execução.

3.1.1 Projeto 1

O projeto 1 trata-se de uma residência unifamiliar com um único pavimento, de 49,09m² de área construída. A residência é composta por um ambiente de sala de estar, conjugada com a cozinha e sala de jantar, dois dormitórios, um banheiro, circulação, uma área de serviço externa e uma varanda. Na figura 5 está apresentada a planta baixa do projeto 1.

Figura 5 - Planta baixa do projeto 1.



Fonte: Autora, com base no projeto seleccionado.

As características construtivas do projeto 1 estão descritas no quadro 3.

Quadro 3 - Características do projeto 1.

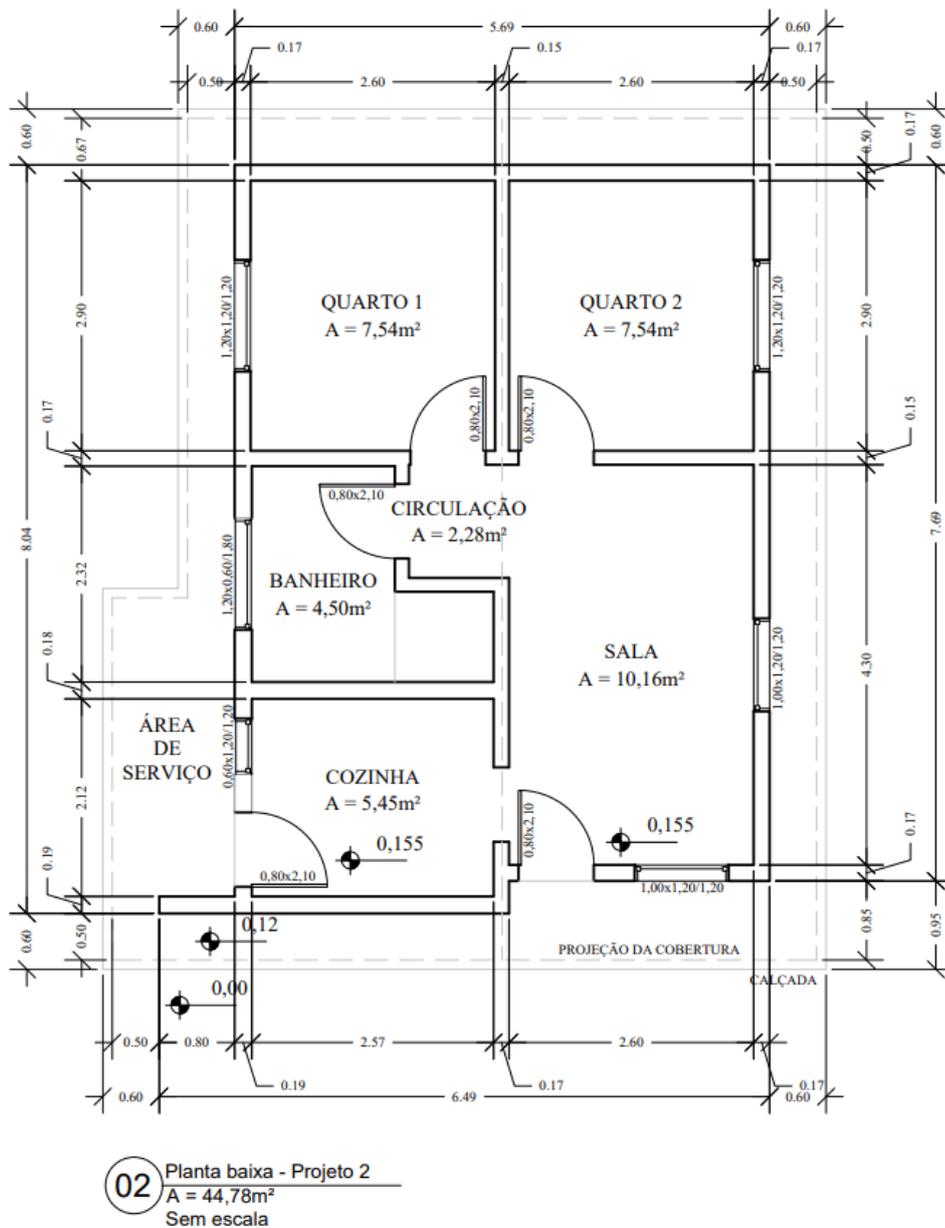
Fase da Obra	Características
Infraestrutura	Estacas brocas de concreto com 20cm de diâmetro, blocos de fundação e vigas baldrame em concreto armado ($f_{ck}=20\text{Mpa}$ e aço CA-50 e CA-60).
Superestrutura	Pilaretes, cinta de oitão, vigas de cobertura e pilares em concreto armado e lajes pré-moldadas. O concreto empregado tem resistência característica de 20Mpa e o aço empregado é o CA-50.
Vedação	Paredes de blocos cerâmicos furados (9cm \times 14cm \times 19cm) assentados com argamassa mista composta de cimento, cal e areia, vergas e contra-vergas em concreto armado moldadas in loco ($f_{ck}=20\text{Mpa}$ e aço CA-50); Portas em madeira e alumínio, janelas em alumínio.
Cobertura	Estruturas de madeira e telhas cerâmicas.
Revestimentos	Revestimentos internos: chapisco (argamassa composta de cimento e areia); emboço paulista (argamassa composta por cimento, cal e areia); emassamento com massa PVA; tinta látex; piso com revestimento cerâmico, com rodapés e soleiras cerâmicos; Revestimentos externos: chapisco (argamassa composta de cimento e areia); emboço paulista (argamassa composta por cimento, cal e areia); forro do beiral em PVC; fundo selador acrílico; textura acrílica; esmalte sintético fosco; soleiras de mármore nas portas externas. Regularizações: piso de cimento alisado (argamassa composta de cimento e areia).

Fonte: Autora, com base no projeto selecionado.

3.1.2 Projeto 2

O projeto 2 trata-se de uma residência unifamiliar com um único pavimento, de 44,78m² de área construída. A residência é composta por um ambiente de sala de estar/jantar, cozinha, dois dormitórios, um banheiro, circulação e uma área de serviço externa. Na figura 6 está apresentada a planta baixa do projeto 2.

Figura 6 - Planta baixa do projeto 2.



Fonte: Autora, com base no projeto selecionado.

As características construtivas do projeto 2 estão descritas no quadro 4.

Quadro 4 - Características do projeto 2.

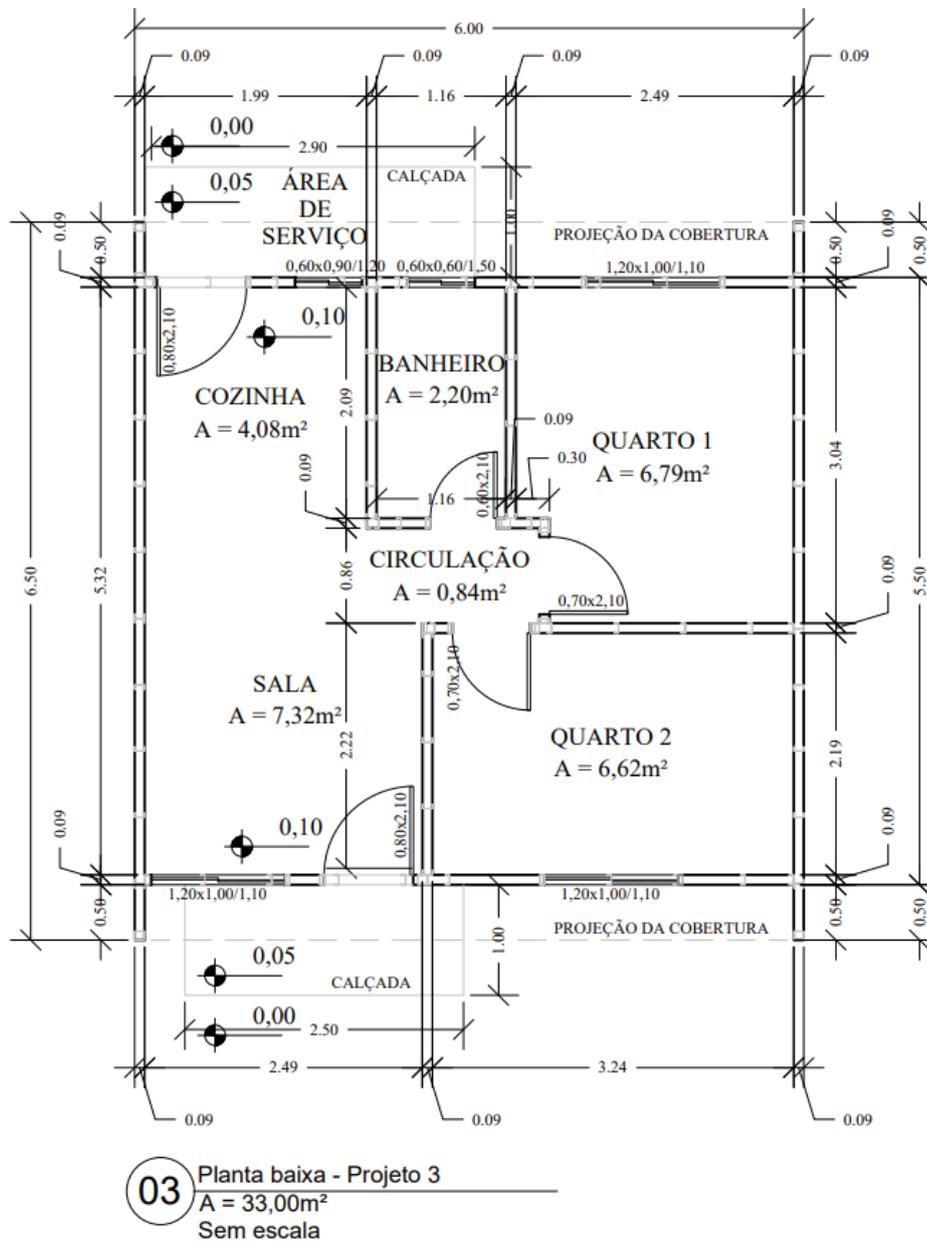
Fase da Obra	Características
Infraestrutura	Radier em concreto armado ($f_{ck}=25\text{MPa}$).
Superestrutura e Vedação	<p>Cintas de amarração em blocos de concreto, canaleta tipo J ou U ($14\text{cm} \times 19\text{cm} \times 19\text{cm} \times 31\text{cm}$) preenchidos com graute ($f_{ck}=20\text{ MPa}$); lajes pré-moldadas treliçadas em concreto armado, com espessura de 10cm ($f_{ck}=25\text{ MPa}$);</p> <p>Alvenaria de vedação com tijolo comum $5,7 \times 9 \times 19\text{cm}$ (espessura da parede de $5,7\text{cm}$). Alvenaria estrutural em blocos de concreto ($14\text{cm} \times 19\text{cm} \times 39\text{cm}$), assentados com argamassa composta por cimento, cal e areia; vergas e contra vergas em blocos canaleta de concreto ($14\text{cm} \times 19\text{cm} \times 19\text{cm}$) preenchidos com graute ($f_{ck}=20\text{ MPa}$); alvéolos dos blocos de concreto preenchidos com graute ($f_{ck}=20\text{ MPa}$); esquadrias de madeira e alumínio.</p>
Cobertura	Estruturas da cobertura com perfis metálicos e telhas cerâmicas.
Revestimentos	<p>Revestimentos internos: chapisco (argamassa de cimento e areia); reboco tipo paulista (argamassa de cimento, cal e areia); gesso desempenado aplicado nas paredes e teto; emboço (argamassa de cimento, cal e areia); revestimento cerâmico; tinta látex, rodapés em cerâmica; soleiras em granito.</p> <p>Revestimentos externos: chapisco (argamassa de cimento e areia); reboco tipo paulista (argamassa de cimento, cal e areia); emboço (argamassa de cimento, cal e areia); moldura para portas e janelas (em argamassa de cimento, cal e areia); revestimento cerâmico; tinta acrílica.</p> <p>Regularizações: contrapiso (argamassa composta por cimento e areia).</p>

Fonte: Autora, com base no projeto selecionado.

3.1.3 Projeto 3

O projeto 3, trata-se de uma residência unifamiliar com um pavimento, de 33,00m² de área construída. A residência é composta por um ambiente de sala de estar/jantar, cozinha, dois dormitórios, um banheiro, circulação e uma área de serviço externa. Na figura 6 está apresentada a planta baixa do projeto 3.

Figura 7 - Planta baixa do projeto 3.



Fonte: Autora, com base no projeto selecionado.

As características construtivas do projeto 3 estão descritas no quadro 5.

Quadro 5 - Características do projeto 3.

Fase da Obra	Características
Infraestrutura	Radier em concreto armado ($f_{ck}=25\text{MPa}$).
Superestrutura e Vedação	<p>A estrutura principal é composta por treliças de aço, formadas por perfis U enrijecidos conformados a frio, constituindo um sistema estrutural de pórticos por vigas e pilares. Sistema de contraventamento horizontal e vertical, formados por barras redondas de aço e fitas metálicas em chapa fina, fixadas aos elementos que compõe a estrutura de aço.</p> <p>A estrutura secundária para cobertura é formada por terças metálicas, compostas por perfis U enrijecidos conformados a frio.</p> <p>A estrutura para sustentação do fechamento lateral é formada por terças metálicas compostas por perfis U enrijecidos conformados a frio, com travamentos, espaçados a cada 0,6m.</p> <p>As paredes são revestidas externamente em placas cimentícias e internamente por placas de gesso acartonado.</p>
Cobertura	O sistema de cobertura é de 2 águas com inclinação de 48% e 69%, sendo formado por telhas de fibrocimento.
Revestimentos	<p>Revestimentos internos: aplicação de basecoat por cima das placas de fechamento e pintura em tinta acrílica fosca. Revestimento cerâmico e rodapés em cerâmica.</p> <p>Revestimentos externos: aplicação de basecoat por cima das placas de fechamento e pintura elastomérica ou textura rolada.</p> <p>O revestimento do forro internamente será em placas de gesso acartonado 12,5mm.</p>

Fonte: Autora, com base no projeto selecionado.

3.2 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

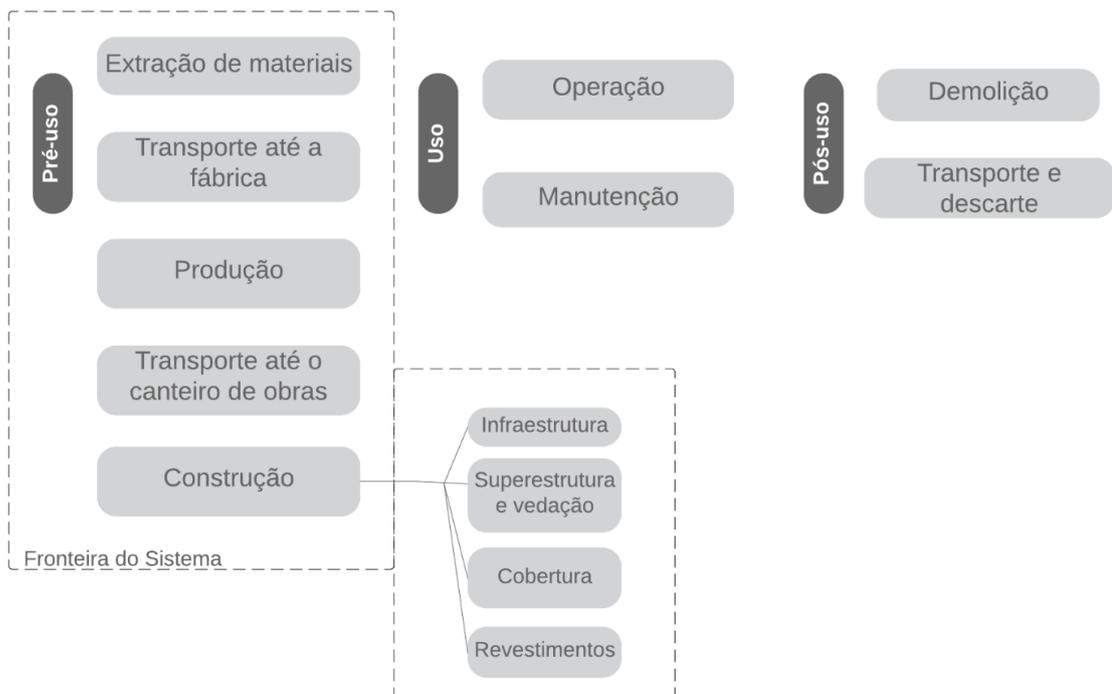
A ACV foi aplicada nos três projetos para identificar os impactos ambientais na construção desses, auxiliando projetistas (arquitetos e engenheiros civis) na tomada de decisão quanto a melhor alternativa de projeto do ponto de vista da sustentabilidade.

As habitações têm a função de proteger e dar conforto para famílias de até 4 pessoas. A unidade funcional considerada foi de 1m² de área construída.

A pesquisa compreendeu a fase do berço ao portão, ou seja, será analisada a fase de pré-uso, que envolve a extração e fabricação de materiais de construção, seu transporte até o local da obra e a construção da habitação. Este escopo foi escolhido, pois é nessa etapa que o projetista apresenta maior capacidade de intervenção no projeto. A

Figura 88 mostra a fronteira do sistema empregada para a ACV. O processo da construção da habitação compreende infraestrutura, superestrutura, vedações, revestimentos e cobertura. Os sistemas elétricos e hidrossanitários não foram considerados na análise, pois apresentam o mesmo peso nos diferentes sistemas construtivos.

Figura 8 – Sistema de produto e fronteira do sistema de estudo.



Fonte: Autora.

O inventário do ciclo de vida foi elaborado com base nos projetos arquitetônico e de serviços, com a quantificação dos materiais necessários por metro quadrado para a construção das residências.

Após o levantamento do inventário, realizou-se a avaliação do mesmo, com a quantificação do impacto ambiental para a construção das habitações. Esse processo foi realizado por meio do software Autodesk Revit, versão estudantil 2018, por trabalhar em plataforma BIM e possuir um suporte para a adição do plugin Tally, que realiza a ACV de forma integrada ao software (ISMAEEL, 2018). Por se tratar de uma grande quantidade de dados, o uso do software Revit e do plugin Tally, facilita a obtenção dos resultados.

Os dados para quantificação do impacto ambiental são encontrados no próprio plugin Tally, que considera a base de dados GaBi (HASIK et al, 2019; NAJJAR, et al, 2017) e emprega o TRACI 2.1 como método de caracterização de impactos ambientais. A base de dados GaBi é utilizada em modelos de ACV em todo o mundo, tanto em aplicações industriais quanto científicas (TALLY, 2020). O plugin Tally fornece resposta imediata da ACV na fase de projeto de uma edificação (NAJJAR et al., 2017). No quadro 6 é apresentada a lista dos materiais utilizados e sua associação com os materiais da base de dados do Tally.

Quadro 6 - Lista de materiais e base de dados do Tally (Continua).

Material	Tally
Aço (kg/m ²)	Steel, reinforcing rod
Concreto (kg/m ²)	Structural concrete, 2501-3000 psi, 0-19% fly ash and/or slag
Madeira (kg/ m ²)	Hickory lumber, 4 inch
Bloco cerâmico maciço (kg/m ²)	Brick, generic
Argamassa – cimento, cal e areia (kg/m ²)	Stucco, portland cement
Argamassa – cimento e areia (kg/m ²)	Mortar type N
Bloco cerâmico furado (kg/m ²)	Brick, generic
Vidro (kg/m ²)	Glazing, monolithic sheet, generic
Tinta (kg/m ²)	Paint, exterior and interior acrylic latex
Telha cerâmica (kg/m ²)	Ceramic tile, glazed
Piso cerâmico (kg/m ²)	Brick flooring
Graute (kg/m ²)	Structural concrete, 2501-3000 psi, 0-19% fly ash and/or slag
Bloco de concreto (kg/m ²)	Concrete masonry unit (CMU), hollow-core

Quadro 6 - Lista de materiais e base de dados do Tally (Conclusão).

Gesso (kg/m ²)	Stucco, synthetic
Argamassa colante (kg/m ²)	Thickset mortar
Mármore (kg/m ²)	Stone slab, granite
Brita (kg/m ²)	Coarse aggregate
PVC (kg/m ²)	PVC membrane, sheet
Manta asfáltica (kg/m ²)	SBS modified bitumen, cap sheet, ARMA - EPD
Placa cimentícia (Kg/m ²)	Cement bonded particle board
Placa OSB (kg/m ²)	Oriented strandboard (OSB), AWC - EPD
Placa de gesso acartonado (kg/m ²)	Fiberglass mat gypsum sheathing board
Fibra de vidro (kg/m ²)	Fiberglass blanket insulation, unfaced
Janela – alumínio (kg/m ²)	Window frame, aluminum, powder-coated, operable, insulated
Janela – ferro (kg/m ²)	Window frame, steel, galvanized, divided operable
Porta – alumínio (kg/m ²)	Hollow door, exterior, aluminum, anodized
Porta – ferro (kg/m ²)	Hollow door, exterior, steel, unfinished, medium vision panel
Porta – madeira (kg/m ²)	Door, interior, wood, hollow core and Door, exterior, wood, solid core
Ferragens Portas e janelas - Alumínio (Kg/m ²)	Hardware, aluminum
Ferragens Porta - Aço (Kg/m ²)	Hardware, brass
Fechaduras (Kg/m ²)	Integrated door closer, cast iron
Dobradiças (Kg/m ²)	Steel door hinge
Tinta esmalte (Kg/m ²)	Wood stain, water based
Estrutura telhado - aço (Kg/m ²)	Hot rolled structural steel, AISC - EPD
Aço galvanizado (Kg/m ²)	Galvanized steel

Fonte: Autora.

Foram calculadas as categorias de impacto de abordagem *midpoint*: potencial de aquecimento global (Global Warming Potential - GWP), potencial de acidificação (Acidification Potential – AP), potencial de eutrofização (Eutrophication Potential – EP), potencial de poluição (Smog Formation Potential – SFP), depleção de ozônio (Ozone Depletion Potential – ODP), demanda de energia primária (Primary Energy Demand – PED), demanda de energia não renovável e renovável. Por fim, os dados foram analisados e compilados para as conclusões deste estudo.

3.3 Custo do Ciclo de Vida (CCV)

O levantamento dos custos de cada habitação foi feito com base no inventário dos materiais. O estudo é realizado para a fase de pré-uso, portanto, calculam-se apenas os custos de aquisição e instalação, não sendo calculados os demais custos ao longo do ciclo de vida das habitações em estudo.

O inventário para a análise do custo foi obtido a partir dos projetos arquitetônicos e de serviços das habitações selecionadas. O levantamento de custos para a construção, foi feito com base em dados nacionais retirados do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), calculados pela Caixa Econômica Federal e IBGE. Esse sistema informa os custos e índices da construção civil no mercado brasileiro, por estado.

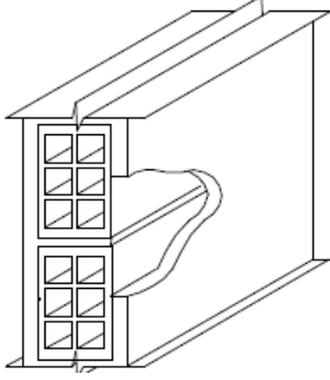
3.4 Critérios adicionais

Como forma de atender o objetivo desta dissertação, além dos critérios de sustentabilidade, foram considerados os critérios adicionais conforto térmico, prazo de execução e aceitabilidade dos diferentes sistemas construtivos das habitações unifamiliares de interesse social. A descrição destes critérios adicionais é apresentada nos subitens 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3.

3.4.1 Conforto térmico

Para a comparação do conforto térmico foram considerados os fatores térmicos e seus limites de acordo com a ABNT NBR 15220:2005 – Parte 2 e 3 e o anexo V da portaria nº50/2013 do INMETRO. Foram comparados os fatores térmicos das vedações verticais externas (paredes externas). A ABNT NBR 15220:2005 – Parte 3 apresenta propriedades térmicas de alguns modelos de construção de vedações verticais. Na tabela 2 são apresentados os fatores térmicos para a vedação vertical do projeto 1.

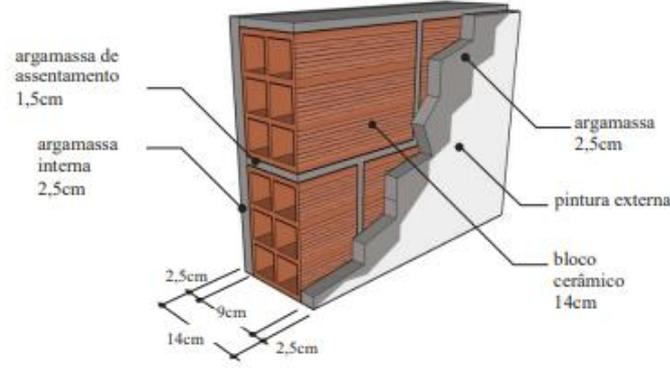
Tabela 2 - Transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico para algumas paredes

Parede	Descrição	U (W/m ² .K)	CT (KJ/(m ² .K))	φ (horas)
	<p>Parede de tijolos 6 furos, assentados na menor dimensão.</p> <p>Dimensões do tijolo: 9,0 x 14,0 x 19,0 cm.</p> <p>Espessura da argamassa de assentamento: 1,0cm.</p> <p>Espessura da argamassa de emboço: 2,50 cm.</p> <p>Espessura total da parede: 14,0 cm.</p>	2,48	159	3,3

Fonte: Adaptada de ABNT NBR 15220:2005 – Parte 3.

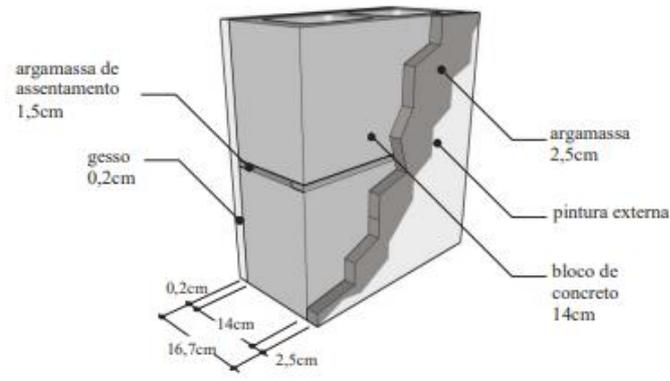
Para os demais modelos de vedações verticais, a norma apresenta o procedimento para o cálculo dos fatores térmicos. Ainda, é possível encontrar no anexo V da portaria do INMETRO n°50/2013, as propriedades térmicas calculadas de paredes, coberturas e vidros utilizadas em edificações unifamiliares. Os valores de transmitância térmica para os projetos 1, 2 e 3, conforme esta portaria, estão apresentados nos quadros 7, 8 e 9 respectivamente.

Quadro 7 - Valores de transmitância térmica para o projeto 1.

	Descrição
	<p>Argamassa interna (2,5cm)</p> <p>Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm)</p> <p>Argamassa externa (2,5cm)</p> <p>Pintura externa</p>
	Transmitância Térmica U (W/(m²k))
	2,46

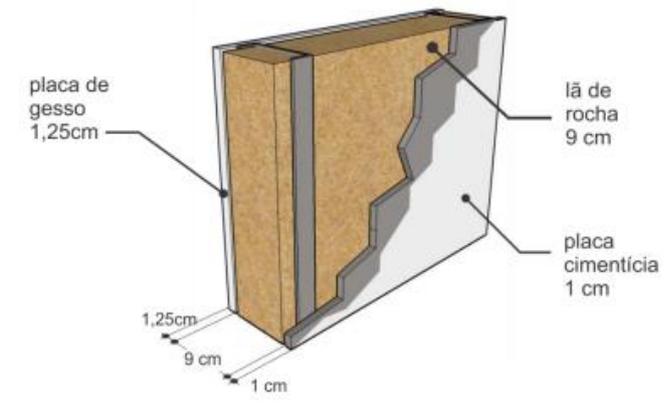
Fonte: Adaptada do anexo V da portaria do INMETRO n°50/2013.

Quadro 8 - Valores de transmitância térmica para o projeto 2.

	Descrição
	Gesso interno (0,2cm)
	Bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0 cm)
	Argamassa externa (2,5cm)
	Pintura externa
	Transmitância Térmica U (W/(m²k))
	2,86

Fonte: Adaptada do anexo V da portaria do INMETRO nº50/2013.

Quadro 9 - Valores de transmitância térmica para o projeto 3.

	Descrição
	Placa de gesso (1,25cm)
	Lã de rocha (9,00 cm)
	Placa cimentícia (1,0cm)
	Transmitância Térmica U (W/(m²k))
	0,45

Fonte: Adaptada do anexo V da portaria do INMETRO nº50/2013.

3.4.2 Cronograma de execução

Para a realização desta pesquisa, procurou-se dados da literatura e com construtoras locais, para estimar o tempo de construção das residências, considerando os diferentes sistemas construtivos. Por ser um dado variável, adotou-se o tempo médio encontrado nas fontes pesquisadas. Sabe-se que devido ao processo industrializado e coordenado, os prazos de construção de uma habitação em LSF, podem ser reduzidos em até um terço em relação aos métodos convencionais (CALEGARI, 2015).

Para uma habitação de interesse social de 31,90 m², o tempo necessário para execução considerando o sistema de alvenaria convencional, calculado conforme o índice de cada recurso disponíveis na Tabela de Composição de Preços para Orçamentos (TCPO) com a jornada de 8 horas de trabalho por dia, é de aproximadamente 94 dias. Para a mesma residência, em light steel framing o tempo de execução, calculado com índices dos recursos disponíveis na TCPO e dados fornecidos por profissionais que trabalham com o sistema, foi calculado em 33 dias. Para os dois sistemas (alvenaria convencional e light steel framing) não foi levado em consideração que alguns serviços poderiam ocorrer simultaneamente o que diminuiria o tempo final (GOMES, 2018). Para mais dados referente ao cronograma de construção de residências de habitação de interesse social considerando os sistemas construtivos convencional e em light steel frame, além do sistema construtivo em alvenaria estrutural, não estudado por Gomes (2018), foram obtidos dados em pesquisa local.

Os dados de duração média de cronograma para obras com os diferentes sistemas construtivos, foram obtidos em referências bibliográficas e através de pesquisa com construtoras locais e podem ser observados no quadro 10.

Quadro 10 - Indicadores de duração média em dias para construção de residências

	Área (m ²)	Cronograma (dias)	Fonte	Dias/m ²	Cronograma médio (dias/m ²)
Alvenaria convencional	31,90	94	Gomes, 2018	2,95	1,98
	56,76	68	Pesquisa local	1,20	
	50,00	90	Pesquisa local	1,80	
Alvenaria Estrutural	50,40	75	Pesquisa local	1,52	1,52
	174,80	270	Pesquisa local	1,54	
LSF	31,90	33	Gomes, 2018	1,03	1,34
	33,00	60	Pesquisa local	1,82	
	50,00	90	Pesquisa local	1,80	
	33,00	23	Pesquisa local	0,70	

Fonte: Autora.

Quando se trata da construção de diversas residências, o prazo de execução pode ser reduzido, pelo fato de que a equipe de trabalho consegue trabalhar na construção simultânea de mais de uma residência. Para um conjunto habitacional de 100 residências com 42,30m² cada uma, o tempo de construção considerando o método construtivo em concreto armado com

fechamento em bloco cerâmicos, analisando os serviços de superestrutura, cobertura e revestimento, é estimado em 267 dias. Considerando o mesmo projeto e etapas, em alvenaria estrutural, o tempo estimado é de 223 dias, e em Light Steel Frame o tempo fica em 108 dias (KLEIN, MARONESI, 2013). A partir dos resultados obtidos por Klein e Maronesi (2013), o cronograma considerando a construção simultânea de 100 residências de cada modelo construtivo, é obtido a partir dos indicativos do quadro 11.

Quadro 11- Duração média em dias para os sistemas construtivos estudados

	Cronograma (dias/m ²)
Alvenaria convencional	0,06
Alvenaria estrutural	0,05
LSF	0,03

Fonte: Autora com base em Klein e Maronesi (2013).

3.4.3 Aceitação cultural

Para a avaliação da aceitação cultural foi aplicado um questionário no qual projetistas (arquitetos e engenheiros civis) e usuários, atribuíram preferências mediante um método ao outro. Este mesmo questionário serviu para o levantamento dos pesos que foram atribuídos a cada critério considerado no método de tomada de decisão. O questionário aplicado encontra-se no apêndice 1. O questionário foi aplicado através do compartilhamento do link, sendo que a abrangência das respostas demonstra a realidade para a região da cidade de Passo Fundo/RS.

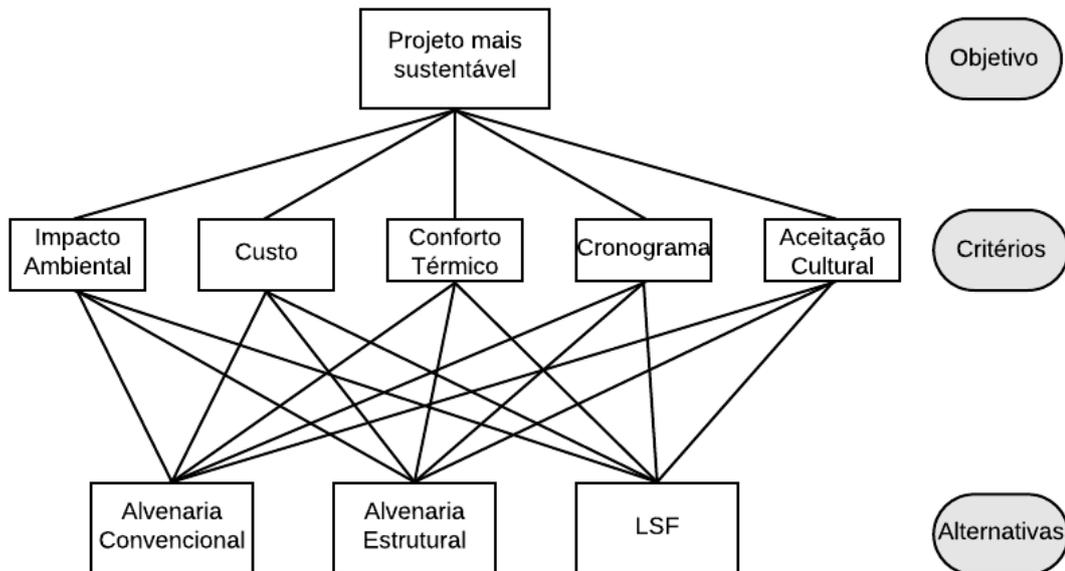
3.5 Método de tomada de decisão

O objetivo deste estudo é desenvolver um modelo de tomada de decisão identificando qual o projeto de habitação unifamiliar de interesse social é mais sustentável, sob a perspectiva da avaliação do ciclo de vida e custo do ciclo de vida, aliando ainda, critérios adicionais, como o conforto térmico, cronograma e um critério subjetivo, a aceitação cultural sob a ótica do método de tomada de decisão multicritério AHP.

A estrutura hierárquica para a tomada de decisão, está apresentada na figura 9, onde o objetivo geral é definir qual o projeto mais sustentável entre as alternativas: projeto em alvenaria convencional, projeto de alvenaria estrutural ou projeto em LSF, com base nos

critérios de julgamento, que são a ACV, CCV, conforto térmico, cronograma e aceitação cultural.

Figura 9 - Estrutura hierárquica da tomada de decisão.



Fonte: Autora.

É necessário que sejam atribuídos pesos aos critérios considerados, que representam a importância de cada um na análise. A atribuição dos pesos aos critérios é subjetiva, pois depende das preferências de quem está analisando. Para definir os cenários foi aplicado um questionário considerando a avaliação de projetistas (engenheiros civis e arquitetos) e usuários, este mesmo questionário serviu para a determinação do critério aceitação cultural, citado na subseção 3.4.3.

Após a análise inicial, foram adotados diferentes pesos relativos para cada, buscando observar as variações nos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para identificar o modelo construtivo mais sustentável em projetos de habitação unifamiliar de interesse social considerando a avaliação do ciclo de vida, custo do ciclo de vida, conforto térmico, cronograma de execução e aceitabilidade dos sistemas construtivos por meio do AHP. Primeiramente, os três projetos foram analisados individualmente, na sequência realizou-se a análise do levantamento dos dados provenientes do questionário e por fim, reuniu-se os resultados com a aplicação do método AHP empregando os pesos dos critérios obtidos no questionário.

4.1 Resultados por critérios

As subseções 4.1.1 até 4.1.4 apresentam os resultados obtidos a partir da análise individual dos projetos.

4.1.1 Avaliação do ciclo de vida

A avaliação ambiental considerou os impactos: potencial de aquecimento global, potencial de acidificação, potencial de eutrofização, potencial de poluição, depleção de ozônio, demanda de energia primária e energia não renovável e renovável. Para quantificar o impacto ambiental, o inventário dos projetos estudados considerou o peso dos materiais por metro quadrado de cada habitação. No quadro 12 estão apresentados os inventários dos projetos 1, 2 e 3, contendo a quantidade de material para um metro quadrado de área construída.

Quadro 12 - Inventário dos projetos (Continua).

Inventário dos projetos	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3
Área (m ²)	49,09	44,78	33,00
Material	Total	Total	Total
Aço (kg/m ²)	8,82	16,30	11,40
Concreto (kg/m ²)	716,76	451,48	315,82
Madeira (kg/ m ²)	153,14	15,90	0,00
Bloco cerâmico maciço (kg/m ²)	0,00	7,87	0,00

Quadro 12 - Inventário dos projetos (Conclusão).

Argamassa – cimento, cal e areia (kg/m ²)	454,43	246,01	73,73
Argamassa – cimento e areia (kg/m ²)	68,11	38,66	0,00
Bloco cerâmico furado (kg/m ²)	123,55	0,00	0,00
Vidro (kg/m ²)	2,68	3,54	2,81
Tinta (kg/m ²)	6,83	9,23	8,69
Telha cerâmica (kg/m ²)	87,29	90,61	73,76
Piso cerâmico (kg/m ²)	35,51	17,99	34,55
Graute (kg/m ²)	0,00	67,29	0,00
Bloco de concreto (kg/m ²)	0,00	452,93	0,00
Gesso (kg/m ²)	0,00	55,84	0,00
Argamassa colante (kg/m ²)	7,76	13,08	6,20
Mármore (kg/m ²)	1,53	0,24	0,15
Brita (kg/m ²)	125,96	112,11	145,71
PVC (kg/m ²)	2,37	0,00	4,55
Manta asfáltica (kg/m ²)	4,18	6,73	15,38
Placa cimentícia (Kg/m ²)	0,00	0,00	53,74
Placa OSB (kg/m ²)	0,00	0,00	81,68
Placa de gesso acartonado (kg/m ²)	0,00	0,00	36,55
Fibra de vidro (kg/m ²)	0,00	0,00	3,13
Janela – alumínio (kg/m ²)	1,04	1,71	0,00
Janela – ferro (kg/m ²)	0,00	0,00	3,35
Porta – alumínio (kg/m ²)	0,91	0,53	0,00
Porta – ferro (kg/m ²)	0,00	0,00	1,90
Porta – madeira (kg/m ²)	4,43	7,29	6,65
Ferragens Portas e janelas - Alumínio (Kg/m ²)	0,13	0,10	0,00
Ferragens Porta - Aço (Kg/m ²)	0,20	0,33	0,51
Fechaduras (Kg/m ²)	0,35	0,46	0,44
Dobradiças (Kg/m ²)	0,32	0,42	0,40
Tinta esmalte (Kg/m ²)	1,10	0,15	0,14
Estrutura telhado - aço (Kg/m ²)	0,00	12,84	0,00
Aço galvanizado (Kg/m ²)	1,46	0,00	33,32

Fonte: Autora.

Tabela 3 - Impactos ambientais por metro quadrado de construção.

Categoria de impacto	Unidade	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3
Potencial de aquecimento global (GWP)	(kg CO ₂ eq)/m ²	417,7336502	391,0598988	246,2348727
Depleção do ozônio (ODP)	(kg CFC-11 eq)/m ²	0,0000001	0,00000009	0,00000342
Potencial de acidificação (AP)	(kg SO ₂ eq)/m ²	1,2689751	1,1898379	1,3320984
Potencial de eutrofização (EP)	(kg N eq)/m ²	0,1059507	0,0900320	0,1015046
Potencial de poluição (SFP)	(KgO ₃ eq)/m ²	27,0935152	24,0807081	21,5648946
Demanda de energia primária	MJ/m ²	7.560,09	7.003,02	5.230,66
Demanda de energia não renovável	MJ/m ²	5.667,00	5.847,14	4.314,74
Demanda de energia renovável	MJ/m ²	1.892,24	1.153,36	918,44

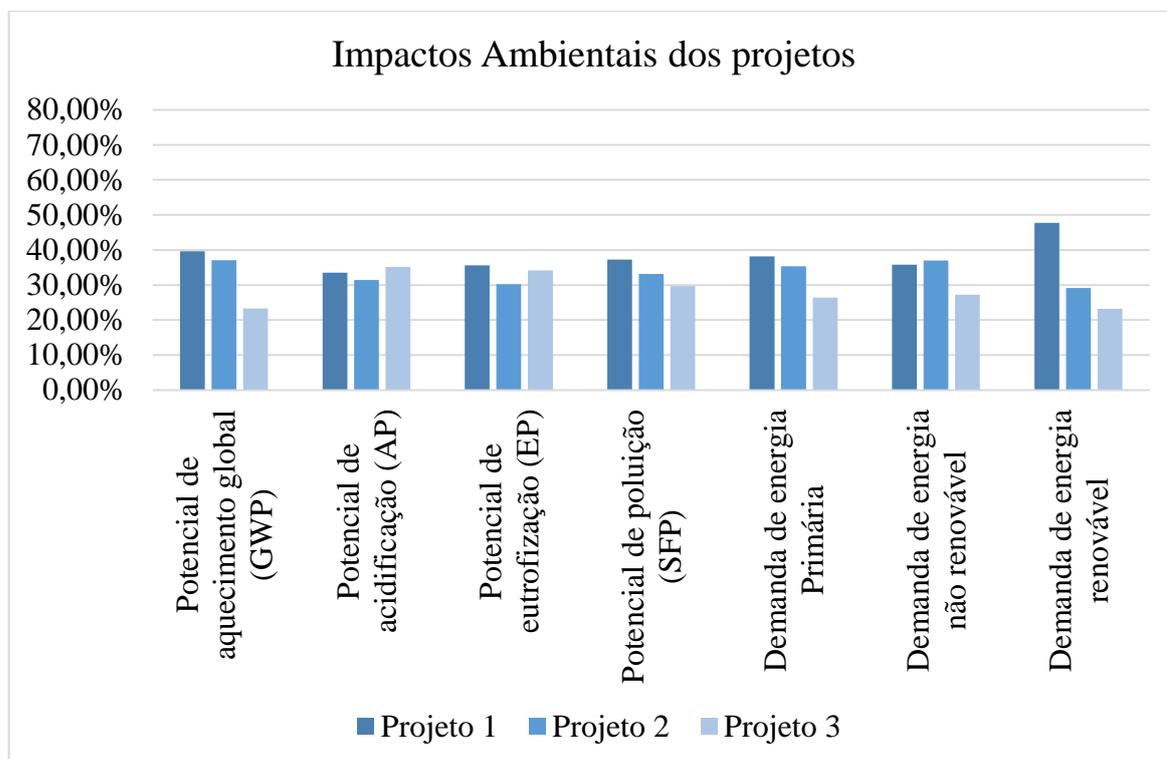
Fonte: Autora.

Na categoria mudanças climáticas, que é a medida de emissões de CO₂ para o meio ambiente, o projeto 3 apresentou um valor de impacto 42% menor que o projeto 1, enquanto os projetos 2 não apresentou uma diferença significativa quando comparado com o projeto 1. Nas demais categorias de impacto analisadas, as diferenças entre os resultados mostram-se pequenas. Porém o projeto 1 apresenta maiores impactos ambientais que o projeto 2 e 3 em quase todas as categorias, exceto na categoria de consumo de energia não renovável, na qual o projeto 2 apresenta maior impacto. Nas categorias de depleção de ozônio estratosférico e potencial de acidificação o projeto 3 apresenta maiores impactos. A figura 10 mostra a comparação em porcentagem, entre os resultados dos impactos ambientais dos projetos estudados.

Na categoria de impacto depleção de ozônio estratosférico, o projeto 3 apresenta um valor significativamente maior que os demais projetos, porém, os resultados tendem a ser muito

pequenos, são difíceis de calcular e estão sujeitos a uma margem de erro maior do que as outras categorias (TALLY, 2020), por esse motivo, essa categoria não foi considerada para a análise e resultados desta pesquisa.

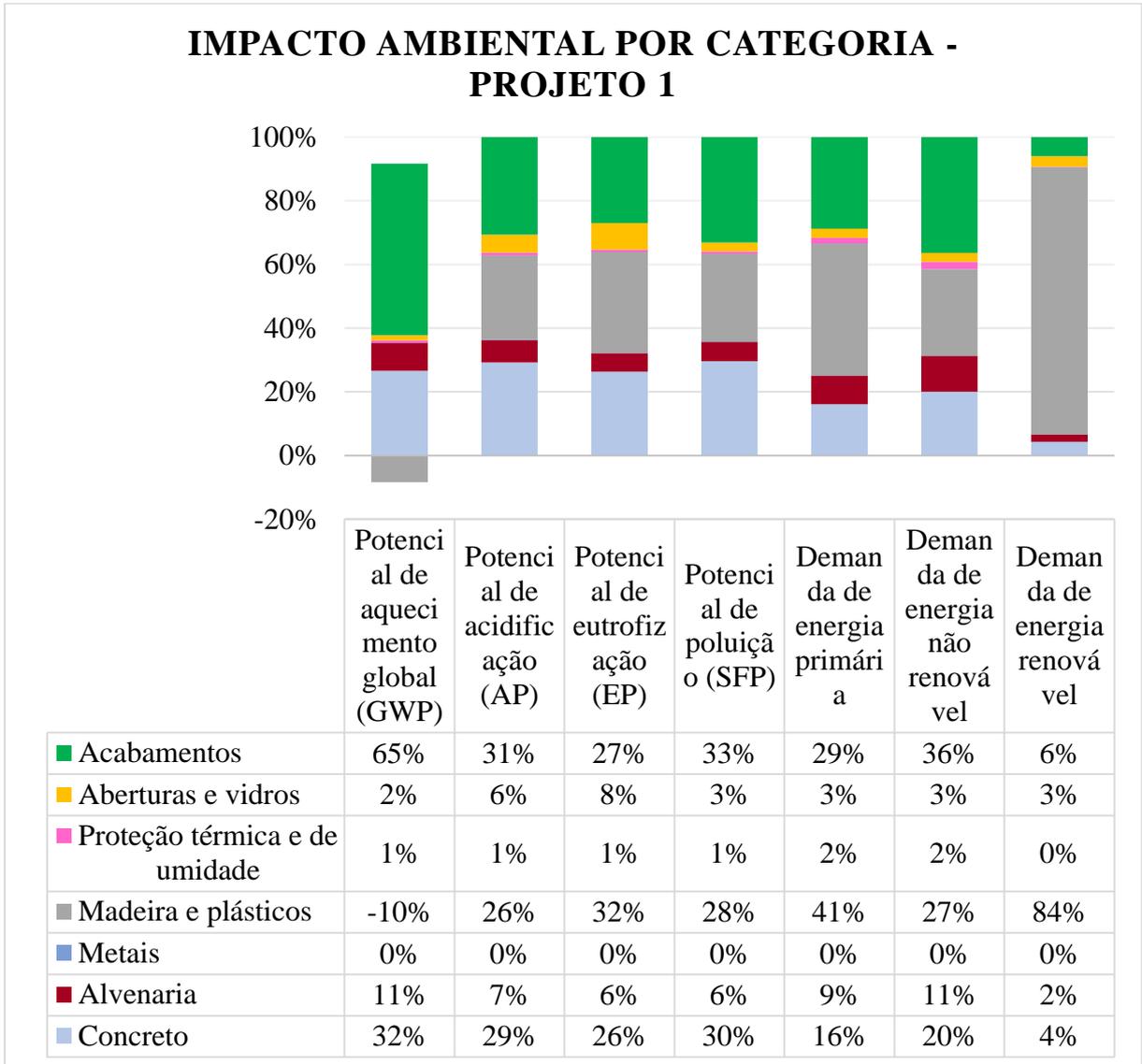
Figura 10 - Impactos ambientais dos projetos estudados.



Fonte: Autora.

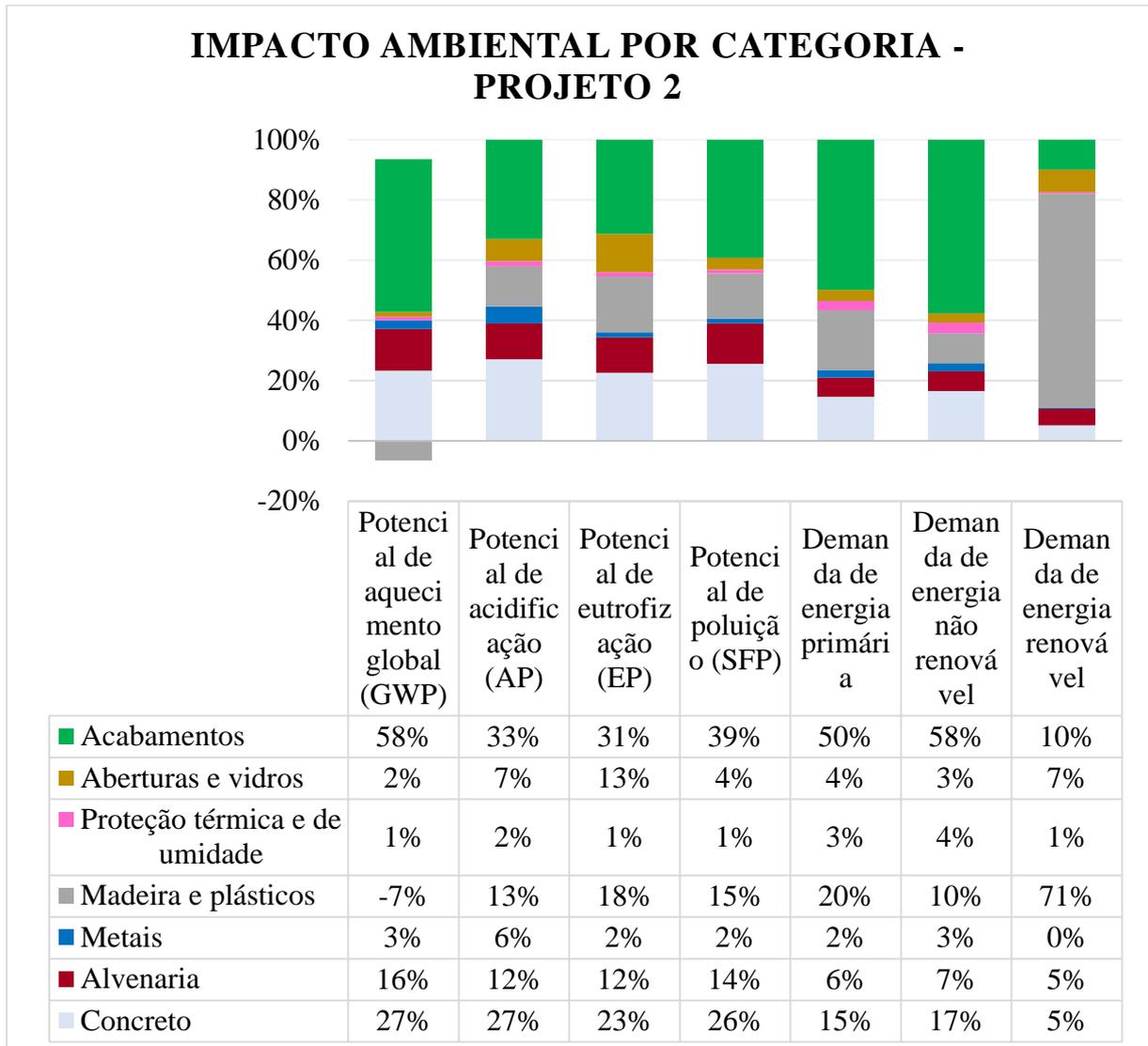
Os impactos ambientais foram divididos por categoria de material empregado nos projetos, sendo concreto, alvenaria, metais, madeiras e plásticos, material para proteção térmica e umidade, aberturas e vidros e acabamentos. Os resultados podem ser vistos nas figuras 11, 12 e 13 para os projetos 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 11 - Impacto ambiental por categoria de material – Projeto 1.



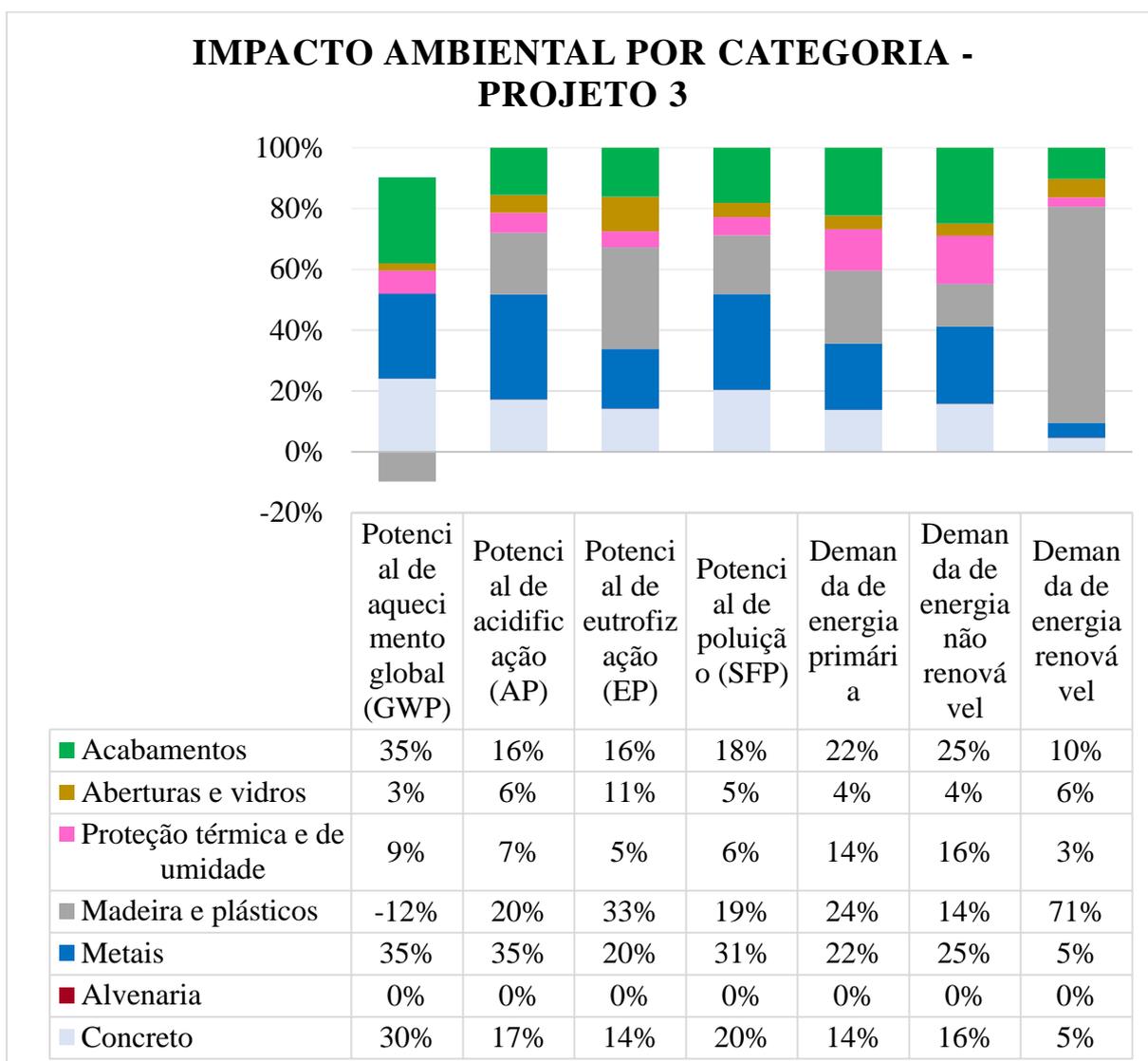
Fonte: Autora.

Figura 12 - Impacto ambiental por categoria de material – Projeto 2.



Fonte: Autora.

Figura 13 - Impacto ambiental por categoria de material – Projeto 3.



Fonte: Autora.

Na análise da categoria de impacto mudanças climáticas, os materiais de acabamento e concreto são os que mais geram impactos ambientais nos projetos 1 e 2, enquanto para o projeto 3, a categoria dos metais assume uma maior participação na geração de impactos ambientais, dado que para este projeto o consumo de aço galvanizado é maior do que o restante dos materiais. Nas demais categorias, de maneira geral, os materiais que mais contribuem para a geração de impactos ambientais são os materiais de acabamento, madeiras e plásticos e concreto para todos os projetos, e os metais também se destacam como os materiais que mais geram impactos no sistema construtivo do projeto 3.

4.1.2 Custo do ciclo de vida

Para a análise do CCV dos projetos, foram considerados os custos de aquisição e instalação, englobando os valores referentes aos materiais, mão de obra e equipamentos extraídos do SINAPI. Para a composição dos custos do projeto habitacional em light steel frame, além dos materiais obtidos no SINAPI, consideraram-se os valores de fornecedores do sistema na cidade de Passo Fundo/RS. Na tabela 4 são apresentados os valores do CCV para os projetos 1, 2 e 3.

Tabela 4 - Resultados do CCV.

Projeto	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3
Área (m²)	49,10	44,80	33,00
Etapa da obra	R\$/m²	R\$/m²	R\$/m²
Infraestrutura	128,15	184,92	117,21
Superestrutura	156,59	108,36	1.571,57
Vedações	280,87	373,52	1.029,07
Coberturas	276,74	267,48	730,10
Revestimentos, forros e pinturas	423,38	314,01	247,24
TOTAL	1.265,73	1.248,28	3.695,19

Fonte: Autora.

O projeto 2 apresentou o menor custo total, sendo considerado o melhor do ponto de vista da análise do custo do ciclo de vida, enquanto o projeto 3 apresentou o maior custo. Na análise por etapa da construção, o projeto 3 apresenta-se mais barato nas fases de infraestrutura e acabamentos (revestimentos, forros e pinturas), o projeto 2 é economicamente mais vantajoso na fase da superestrutura e cobertura, ficando o projeto 1 mais barato apenas na etapa de vedação.

O custo do projeto 3 é significativamente maior, especialmente por ser um método construtivo relativamente novo no Brasil e os materiais utilizados no método construtivo LSF para casas de baixo padrão de acabamento, são os mesmos considerados em projetos de médio e alto padrão de acabamento. Além disso, a CCV dos projetos 1 e 2 foi realizada com base no SINAPI e não com base de dados de construtoras locais, o que pode acarretar uma certa diferença de valores. Vale destacar também o alto preço do aço no mercado brasileiro.

4.1.3 Critérios adicionais

Como critérios adicionais, foram considerados cronograma de execução, conforto térmico e aceitação cultural dos projetos estudados.

4.1.3.1 Conforto térmico

O valor de transmitância térmica da vedação vertical externa do projeto 1 é obtida conforme a ABNT NBR 15220:2005 e conforme a tabela do anexo V da portaria nº 50/2013 do INMETRO. Como as características da vedação externa identificadas na ABNT NBR 15220:2005 assemelham-se mais às características do projeto 1, foi adotado o valor de 2,48 W/(m²K). E os valores de transmitância térmica dos projetos 2 e 3, foram obtidos a partir dos dados do anexo V da portaria nº 50/2013 do INMETRO. Portanto, os valores de transmitância térmica dos materiais de vedação vertical externa utilizados em cada um dos projetos, encontram-se descritos na tabela 5.

Tabela 5 - Valores de transmitância térmica das vedações verticais externas

Projeto	Característica da vedação vertical	Transmitância térmica – U W/(m²K)
Projeto 1	Tijolo de 6 furos	2,48 (ABNT NBR 15220:2005)
Projeto 2	Bloco estrutural de concreto	2,86 (anexo V da portaria nº 50/2013 do INMETRO)
Projeto 3	Placa cimentícia/Lã de vidro/Placa de gesso acartonado	0,45 (anexo V da portaria nº 50/2013 do INMETRO)

Fonte: Autora.

O material utilizado na vedação vertical do projeto 3 apresenta o menor índice de transmitância térmica, 0,45 W/(m²k), mostrando que o projeto 3 se apresenta mais favorável no critério conforto térmico.

4.1.3.2 Cronograma de execução

Para obtenção de um índice comparativo entre os projetos, a duração média para a construção das habitações estudadas foi estimada com a pesquisa em construtoras locais sobre o tempo médio de duração para a construção de residências considerando os sistemas construtivos dos projetos 1, 2 e 3. Porém, os índices encontrados são variáveis, pois levam em consideração o rendimento específico da equipe de trabalho e período do ano em que foi realizada a construção.

Foram considerados também os resultados obtidos por Klein e Maronesi (2013), este estudo considerou a elaboração do cronograma para a construção de habitações unifamiliares de interesse social, avaliando os sistemas construtivos tratados nessa dissertação.

Os resultados demonstrados nos quadros 10 e 11 foram compilados na tabela 6. Os resultados foram considerados para a unidade dias por metro quadrado de área construída.

Tabela 6 - Cronograma de duração média de construção.

Cronograma (dias/m ²)		
Projeto	Construção de uma residência	Construção simultânea de 100 residências
Projeto 1	1,98	0,06
Projeto 2	1,52	0,05
Projeto 3	1,34	0,03

Fonte: Autora.

Considerando a construção de uma residência e comparando os resultados para a construção de cada método construtivo, o projeto 3 é cerca de 30% mais rápido que o projeto 1, e cerca de 10% mais rápido que o projeto 2. Quando se compara os resultados de cronograma para a construção simultânea de 100 residências com os mesmos sistemas construtivos, o projeto 3 é construído na metade do tempo em que a habitação do projeto 1 e é 40% mais rápida que a habitação do projeto 2.

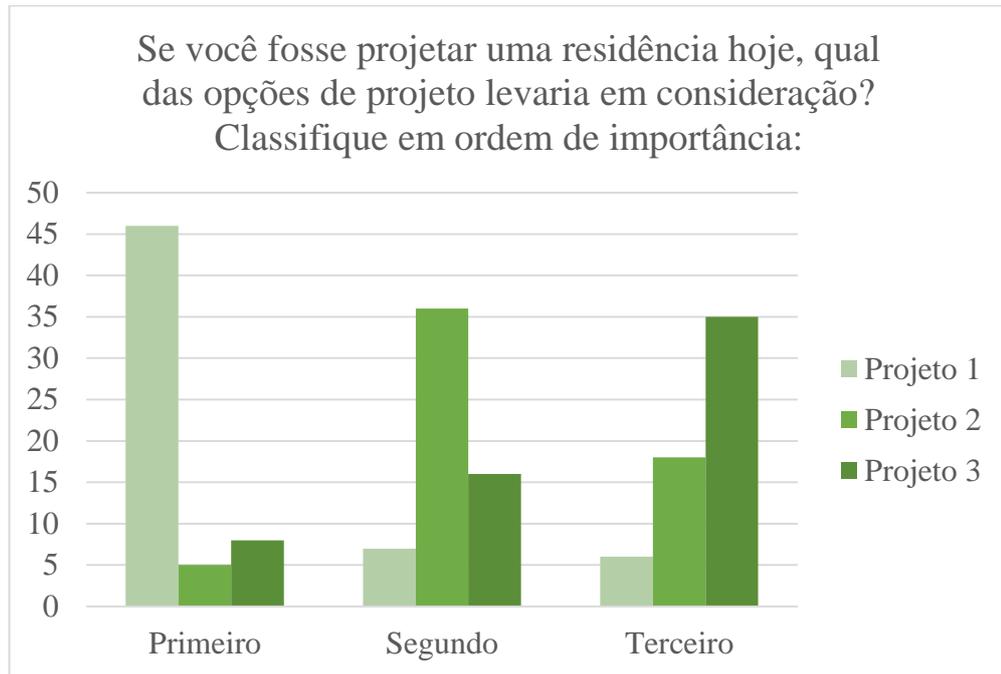
4.1.3.3 Aceitação cultural

Como forma de determinar qual método construtivo é mais aceito do ponto de vista cultural, aplicou-se um questionário, no qual os três sistemas construtivos estudados nesta dissertação foram comparados. O questionário aplicado está no apêndice 1 e os resultados apresentados aqui estão sintetizados.

A questão a ser respondida pelos projetistas foi “Se você fosse projetar uma residência hoje, qual das opções de projeto levaria em consideração? Classifique em ordem de importância:”. Para os usuários, a pergunta feita foi: “Se você fosse construir uma residência hoje, qual das opções de projeto levaria em consideração? Classifique em ordem de importância”. Nas figuras 14 e 15 é possível observar os resultados das respostas dos projetistas e dos usuários, respectivamente.

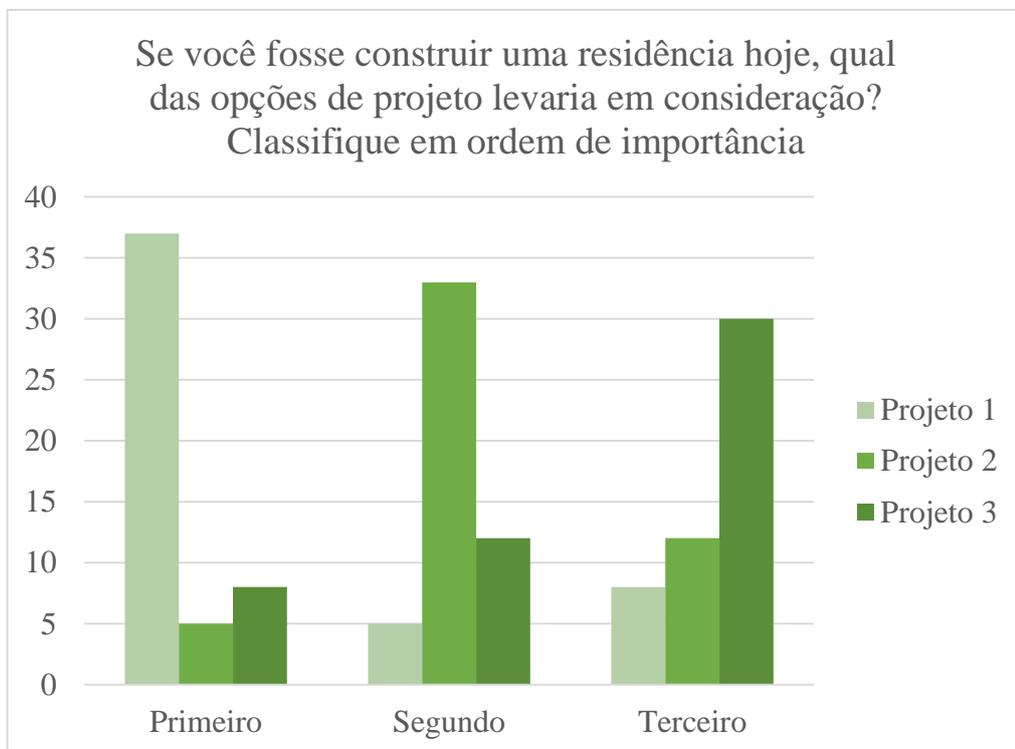
O questionário foi elaborado por meio da plataforma Google Forms, e o mesmo foi aplicado através do compartilhamento do link, através das plataformas Gmail, LinkedIn e WhatsApp. Como amostra, foram obtidas 109 respostas, sendo 59 respostas de projetistas e 50 respostas de usuários. Tanto para projetistas quanto para os usuários a preferência se mantém no projeto considerando o método construtivo do projeto 1, com preferência de mais de 70% tanto para projetistas quanto para os usuários. Em segundo lugar, está o projeto 2 e em terceiro lugar o projeto 3. Estes resultados mostram-se consistentes com a realidade, sendo o sistema construtivo em concreto armado e alvenaria predominante nas construções no Brasil.

Figura 14 - Preferência dos projetistas quanto ao sistema construtivo.



Fonte: Autora.

Figura 15 - Preferência dos usuários quanto ao sistema construtivo.



Fonte: Autora.

Também foi solicitado aos usuários e aos projetistas, que realizassem a comparação par a par entre os sistemas construtivos propostos, sendo questionado qual método construtivo o respondente considera melhor ou mais importante comparando os três métodos entre si, para isso foi considerada a escala fundamental de Saaty.

A partir das respostas obtidas na comparação par a par, foi calculada a média geométrica dos julgamentos individuais, considerando a resposta de projetistas e usuários, originando uma matriz de ordem 3, pois trata-se de 3 alternativas a serem comparadas, perante o critério analisado. No quadro 15, está apresentada a matriz de decisão conforme o critério aceitação cultural considerando a opinião conjunta de projetistas e usuários. De acordo com a prioridade relativa apresentadas na última coluna do quadro 13, o projeto 1 apresentou maior aceitação (40,51%), o que se mostra consistente com o sistema construtivo usual no Brasil. É importante salientar que por mais que o método construtivo em LSF seja relativamente novo no Brasil, este sistema foi bem aceito tanto pelos usuários quanto pelos projetistas, ficando em segundo lugar (31,45%) e por fim o projeto 2 (28,04%).

Quadro 13 - Matriz de decisão - critério aceitação cultural (Projetistas e usuários).

Projetos	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3	Prioridade relativa
Projeto 1	1	1 3/8	1 1/3	40,51%
Projeto 2	5/7	1	6/7	28,04%
Projeto 3	3/4	1 1/6	1	31,45%
			CR	0,00

Fonte: Autora.

A razão de consistência (CR) resultou em zero (menor do que o limite de 10%), logo a matriz sendo caracterizada como consistente e os pesos aos critérios podem ser aceitos.

Nos quadros 14 e 15, são apresentados os resultados das prioridades relativas do critério aceitação cultural, considerando a opinião de projetistas e usuários, respectivamente.

Quadro 14 - Matriz de decisão - critério aceitação cultural (Projetistas).

Projetos	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3	Prioridade relativa
Projeto 1	1	1 1/2	1 1/2	42,66%
Projeto 2	2/3	1	5/6	26,91%
Projeto 3	2/3	1 1/5	1	30,42%
			CR	0,00

Fonte: Autora.

Quadro 15 - Matriz de decisão - critério aceitação cultural (Usuários).

Projetos	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3	Prioridade relativa
Projeto 1	1	1 1/4	1 1/5	38,00%
Projeto 2	4/5	1	7/8	29,36%
Projeto 3	5/6	1 1/7	1	32,64%
			CR	0,00

Fonte: Autora.

Os resultados para a prioridade relativa de cada projeto têm pouca variação considerando a opinião de projetistas e usuários, mostrando que o projeto 1 apresenta maior aceitação perante os dois grupos que responderam ao questionário. Porém, os projetos 2 e 3 apresentam uma aceitação ligeiramente maior por parte dos usuários.

4.1.4 Resumo dos resultados

Os resultados da ACV e do CCV possibilitam comparações entre os projetos, além disso, com os critérios adicionais aumentam o número de combinações possíveis para a tomada de decisão. No quadro 16 estão apresentados os resultados da ACV, onde é apresentado o melhor projeto para as oito categorias de impacto consideradas. Como já mencionado anteriormente, o projeto 3 apresenta os melhores resultados da ACV.

Quadro 16 - Resultados gerais ACV.

Categoria de impacto	Unidade	Melhor projeto
Potencial de aquecimento global (GWP)	(kg CO ₂ eq)/m ²	Projeto 3
Potencial de acidificação (AP)	(kg SO ₂ eq)/m ²	Projeto 2
Potencial de eutrofização (EP)	(kg N eq)/m ²	Projeto 2
Potencial de poluição (SFP)	(KgO ₃ eq)/m ²	Projeto 3
Demanda de energia primária	MJ/m ²	Projeto 3
Demanda de energia não renovável	MJ/m ²	Projeto 3
Demanda de energia renovável	MJ/m ²	Projeto 3

Fonte: Autora.

O quadro 17 apresenta o melhor projeto, considerando o CCV, por fase de construção e pelo custo total. O projeto 2 apresenta o menor custo total e menor custo nas fases de superestrutura e coberturas.

Quadro 17 - Resultados gerais CCV.

Etapa da obra	Melhor projeto
Infraestrutura	Projeto 3
Superestrutura	Projeto 2
Vedações	Projeto 1
Coberturas	Projeto 2
Revestimentos, forros e pinturas	Projeto 3
Total	Projeto 2

Fonte: Autora.

O quadro 18 apresenta os resultados do melhor projeto considerando cada um dos critérios adicionais. O projeto 3 apresenta-se melhor nos critérios conforto térmico e cronograma de execução, e o projeto 1 apresenta maior aceitação.

Quadro 18 - Resultados gerais critérios adicionais.

Critério	Melhor projeto
Conforto térmico	Projeto 3
Cronograma	Projeto 3
Aceitação cultural (Projetistas)	Projeto 1
Aceitação cultural (Usuários)	Projeto 1
Aceitação cultural (Projetistas e usuários)	Projeto 1

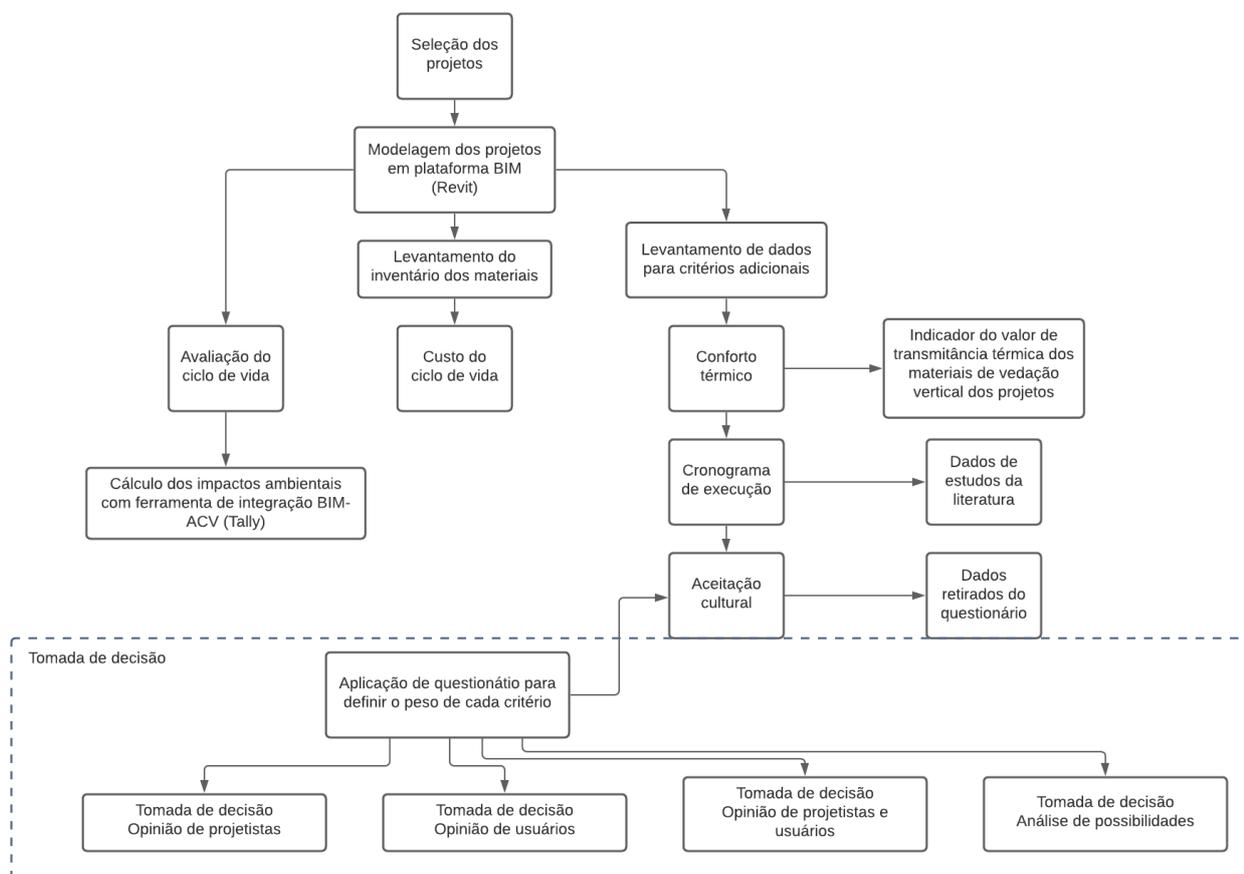
Fonte: Autora.

4.2 Avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida

A partir dos resultados apresentados anteriormente, o modelo apresentado nesta subseção seleciona o projeto com o método construtivo do ponto de vista da sustentabilidade e dos critérios adicionais conforto térmico, cronograma de execução e aceitação cultural. A tomada de decisão é dificultada pela quantidade de variáveis e critérios existentes.

Os resultados obtidos na ACV, no CCV, conforto térmico, cronograma de execução e aceitação cultural, foram relacionados entre si, por meio do método AHP, sendo que os critérios de análise tiveram seu peso de acordo com a opinião de 59 projetistas e 50 respostas dos usuários, com total de 109 respostas, a partir de um questionário aplicado. O projetista terá como avaliar os projetos sob a ótica de profissionais da construção, usuários e pela combinação dos dois grupos. O modelo de aplicação é apresentado pela figura 16.

Figura 16 - Modelo de aplicação da pesquisa.



Fonte: Autora.

No presente estudo, foram considerados os resultados da categoria de impacto: potencial de aquecimento global (GWP) para a dimensão ambiental. Esta escolha evidencia a busca para alcançar o Objetivo do Desenvolvimento Sustentável (ODS) 13 “Ação Contra a Mudança Global do Clima”, visto que a indústria da construção tem grande participação na emissão de CO₂, sendo responsável por 38% de todas as emissões no mundo (UNEP, 2020). O potencial de aquecimento global está associado à poluição e o efeito estufa, o mais sério do impacto ambiental atual (SVAJLENKA, KOZLOVSKÁ, POSIVAKOVÁ, 2018).

A dimensão econômica é dada pelo custo total por metro quadrado, o conforto térmico considera a transmitância térmica do material de vedação vertical dos projetos, o cronograma de execução é dado pela duração em dias por metro quadrado de área construída e a aceitação cultural é medida pelos pesos obtidos a partir do questionário aplicado.

O quadro 19 apresenta os resultados dos critérios considerados para a avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida, os resultados destacados em negrito representam o melhor projeto em cada critério considerado. Para os critérios ACV, CCV, conforto térmico e cronograma, quanto menor for o resultado, melhor será o projeto quando na análise do critério, por exemplo, quanto menor for o valor do impacto ambiental que o projeto gera no meio ambiente, mais sustentável será este projeto. Já para o critério aceitação cultural, quanto mais alto for o valor, mais esse critério é considerado importante, do ponto de vista dos respondentes do questionário.

Quadro 19 - Resultados gerais dos critérios considerados.

Projeto	Mudanças climáticas (GWP)	Custo (R\$/m ²)	Transmitância térmica do material de vedação vertical (W/(m ² K))	Cronograma de execução (dias/m ²)	Cronograma de execução considerando a repetitividade (dias/m ²)	Aceitação cultural (Projetistas)	Aceitação cultural (Usuários)	Aceitação cultural (Projetistas + Usuários)
Projeto 1	417,73	1265,73	2,48	1,98	0,06	42%	38%	40%
Projeto 2	391,06	1248,28	2,86	1,52	0,05	27%	29%	28%
Projeto 3	246,23	3695,19	0,45	1,34	0,03	31%	33%	32%

Fonte: Autora.

Em uma análise individual dos critérios, apesar do alto custo e de não ser considerado o projeto mais aceito culturalmente, o projeto 3 apresenta-se mais vantajoso nas categorias de conforto térmico, cronograma de execução e mudanças climáticas.

Foram definidas as prioridades relativas de cada projeto em relação a cada critério para aplicar o método de tomada de decisão. Para os critérios em que quanto menor o valor, melhor, os resultados precisam ser harmonizados para então encontrar a prioridade relativa de cada projeto em relação ao critério considerado. Na tabela 7 estão apresentadas as prioridades relativas de cada projeto em relação ao critério “Impacto ambiental”, categoria de mudanças climáticas.

Tabela 7 - Prioridades relativas de acordo com o critério "Impacto ambiental".

Projetos	Impacto ambiental - Mudanças climáticas (GWP)	Harmonização	Prioridade Relativa
Projeto 1	417,73	2,53	0,27
Projeto 2	391,06	2,70	0,28
Projeto 3	246,23	4,28	0,45
TOTAL	1055,02	9,51	1,00

Fonte: Autora.

A partir da definição das prioridades relativas, define-se o quanto um projeto é considerado melhor que o outro do ponto de vista do critério de avaliação considerado. Para o critério impacto ambiental, o projeto 3 apresenta o melhor resultado, com uma prioridade relativa de 45%, enquanto os projetos 1 e 2 ficam com resultados muito próximos, apresentando prioridade relativa de 27% e 28%, respectivamente. As prioridades relativas dos projetos em relação aos critérios considerados nesta pesquisa estão apresentadas no quadro 20, em porcentagem, com os melhores valores destacados em negrito.

Quadro 20 - Prioridades relativas dos projetos em relação aos critérios considerados.

Projeto	Mudanças climáticas (GWP)	Custo	Conforto térmico	Cronograma de execução	Cronograma de execução considerando a repetitividade	Aceitação cultural (Projetistas)	Aceitação cultural (Usuários)	Aceitação cultural (Projetistas + usuários)
Projeto 1	26,56%	42,44%	13,55%	26,45%	23,81%	42,66%	38,00%	40,51%
Projeto 2	28,37%	43,03%	11,75%	34,46%	28,57%	26,91%	29,36%	28,04%
Projeto 3	45,06%	14,54%	74,69%	39,09%	47,62%	30,42%	32,64%	31,45%

Fonte: Autora.

Os resultados das prioridades relativas de cada projeto são relacionados com o peso atribuído a cada critério para definir qual o projeto é mais sustentável. Para a definição do peso de cada critério, foram consideradas as respostas obtidas a partir do questionário aplicado,

apresentado no apêndice 1. As análises realizadas consideram as respostas de projetistas e usuários de forma separada e uma combinação dos dois grupos. Os resultados estão apresentados nas subseções 4.2.1 a 4.2.5.

Os pesos relativos para os critérios, apresentados na tabela 8, foram calculados por meio da média geométrica dos julgamentos, considerando pesos iguais a todos os respondentes. O custo é apresentado como o critério mais importante, tanto do ponto de vista dos projetistas quanto dos usuários. É possível perceber que existe uma diferença na percepção sobre os pesos dos critérios quando na comparação da avaliação de projetistas e usuários. O impacto ambiental e o conforto térmico apresentam maior consideração por parte dos usuários, enquanto os projetistas priorizam o cronograma de execução e a aceitação cultural.

Tabela 8 - Pesos atribuídos aos critérios.

Critérios/ Respostas	Impacto ambiental (GWP)	Custo	Conforto térmico	Cronograma de execução	Aceitação cultural	Total
Projetistas	9,05%	32,57%	16,83%	14,83%	26,73%	100,00%
Usuários	20,30%	29,63%	27,96%	7,39%	14,71%	100,00%
Projetistas + Usuários	13,55%	32,32%	21,95%	11,15%	21,04%	100,00%

Fonte: Autora.

Enquanto os projetistas priorizaram o custo e a aceitação cultural, os usuários atribuíram maior peso ao custo e ao conforto térmico.

4.2.1 Projetistas

No quadro 21 é apresentada a matriz de decisão com os resultados do modelo considerando a opinião de projetistas.

Quadro 21 - Matriz de decisão - projetistas.

Critérios/ Alternativas	Impacto ambiental (GWP)	Custo	Conforto térmico	Cronograma de execução	Aceitação cultural	Vetor de Decisão
Pesos dos Critérios	9,05%	32,57%	16,83%	14,83%	26,73%	
Projeto 1	26,56%	42,44%	13,55%	26,45%	42,66%	33,83%
Projeto 2	28,37%	43,03%	11,75%	34,46%	26,91%	30,86%
Projeto 3	45,06%	14,54%	74,69%	39,09%	30,42%	35,31%

Fonte: Autora.

O custo foi o critério que recebeu o maior peso considerando a opinião de projetistas (32,57%), seguido pela aceitação cultural (26,73%). O impacto ambiental ficou com o menor peso (9,05%). O fato de o critério impacto ambiental ter apresentado o menor peso quando da opinião de projetistas, demonstra que ainda é um tema pouco explorado no meio acadêmico. A partir da relação dos resultados das prioridades relativas de cada projeto com os pesos atribuídos pelos projetistas aos critérios, o projeto 3 apresentou melhores resultados quanto à sustentabilidade, com peso final de 35,31% contra 33,83% para o projeto 1 e 30,86% para o projeto 2.

4.2.2 Usuários

No quadro 22 é apresentada a matriz de decisão com os resultados do modelo considerando a opinião dos usuários.

Quadro 22 - Matriz de decisão - usuários.

Critérios/ Alternativas	Impacto ambiental (GWP)	Custo	Conforto térmico	Cronograma de execução	Aceitação cultural	Vetor de Decisão
Peso dos Critérios	20,30%	29,63%	27,96%	7,39%	14,71%	
Projeto 1	26,56%	42,44%	13,55%	26,45%	38,00%	29,30%
Projeto 2	28,37%	43,03%	11,75%	34,46%	29,36%	28,66%
Projeto 3	45,06%	14,54%	74,69%	39,09%	32,64%	42,03%

Fonte: Autora.

O custo também foi o critério que recebeu o maior peso considerando a opinião da população (29,63%), em segundo ficou o conforto térmico (27,96%) e por último, o cronograma (7,39%). O impacto ambiental ficou em terceiro lugar (20,30%). Como resultado, o projeto 3 também apresentou melhores resultados quanto à sustentabilidade, com peso final de 42,03% contra 29,30% para o projeto 1 e 28,66% para o projeto 2.

4.2.3 Projetistas e usuários

No quadro 23 é apresentada a matriz de decisão com os resultados do modelo considerando a opinião dos projetistas em conjunto com a opinião dos usuários.

Quadro 23 - Matriz de decisão – projetistas e usuários.

Matriz de decisão – projetistas e usuários						
Critérios/ Alternativas	Impacto ambiental (GWP)	Custo	Conforto térmico	Cronograma de execução	Aceitação cultural	Vetor de Decisão
Peso dos Critérios	13,55%	32,32%	21,95%	11,15%	21,04%	
Projeto 1	26,56%	42,44%	13,55%	26,45%	40,51%	31,76%
Projeto 2	28,37%	43,03%	11,75%	34,46%	28,04%	30,07%
Projeto 3	45,06%	14,54%	74,69%	39,09%	31,45%	38,17%

Fonte: Autora.

Com os pesos atribuídos a partir das respostas de projetistas em conjunto com as respostas dos usuários, o projeto 3 continua apresentando os melhores resultados quanto à sustentabilidade, com peso final de 38,17% contra 31,76% para o projeto 1 e 30,07% para o projeto 2.

4.2.4 Resumo dos resultados

Os resultados obtidos a partir da opinião dos decisores estão apresentados no quadro 24.

Quadro 24 - Resumo dos resultados.

Decisor	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3	Melhor projeto
Projetistas	33,83 %	30,86 %	35,31 %	Projeto 3
Usuários	29,30 %	28,66 %	42,03 %	Projeto 3
Projetistas e usuários	31,76 %	30,07 %	38,17 %	Projeto 3

Fonte: Autora.

A partir dos resultados obtidos, o projeto 3 apresenta um melhor desempenho considerando a sustentabilidade em todas as análises realizadas. Os resultados mostram ao projetista que o projeto 3 pode ser selecionado como a melhor alternativa, ou, sabendo destes resultados, o projetista pode realizar alterações ainda na fase de projeto para melhorar os resultados dos projetos 1 e 2.

Para apontar qual o método construtivo é mais sustentável, deve-se salientar que quaisquer modificações nos projetos alteram os resultados obtidos, seja por aumento do consumo de materiais ou alteração do material utilizado. A aplicação do método AHP auxiliou na organização dos dados para a obtenção dos pesos dos critérios analisados e o questionário desenvolvido com base no método possibilitou que os decisores realizassem os julgamentos dos critérios pré-estabelecidos de maneira simplificada.

4.2.5 Análise de sensibilidade

A partir dos resultados apresentados nas subseções 4.2.1 a 4.2.4 pode-se observar que a aplicação de um método de tomada de decisão auxilia na seleção do melhor projeto. Porém, a determinação do peso relativo de cada critério é variável conforme os resultados que podem ser obtidos com base na opinião de projetistas e usuários. Dito isto, foram realizadas análises considerando diferentes pesos para os critérios. Em uma primeira análise, foram atribuídos pesos iguais para todos os critérios, ou seja, 20% para cada um, os resultados estão apresentados no quadro 25.

Quadro 25 – Análise de sensibilidade - Matriz de decisão considerando pesos iguais para todos os critérios

Critérios/ Alternativas	Impacto ambiental (GWP)	Custo	Conforto térmico	Cronograma de execução	Aceitação cultural	Vetor de Decisão
Peso dos Critérios	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	
Projeto 1	26,56%	42,44%	13,55%	26,45%	40,51%	29,90%
Projeto 2	28,37%	43,03%	11,75%	34,46%	28,04%	29,13%
Projeto 3	45,06%	14,54%	74,69%	39,09%	31,45%	40,97%

Fonte: Autora.

Com a consideração de pesos iguais a todos os critérios, o projeto 3 ainda se apresenta como a melhor alternativa. Foram feitas também, análises priorizando um critério perante os demais, sendo atribuído 50% do peso ao critério priorizado, e o restante foi distribuído entre os demais critérios. Nos quadros 26 e 27 estão apresentados os resultados priorizando os critérios impacto ambiental, considerando o impacto mudanças climáticas, e o critério custo, respectivamente.

Quadro 26 – Análise de sensibilidade - Priorizando o critério impacto ambiental

Critérios/ Alternativas	Impacto ambiental (GWP)	Custo	Conforto térmico	Cronograma	Aceitação do cliente	Vetor de Decisão
Peso dos Critérios	50,00%	12,50%	12,50%	12,50%	12,50%	
Projeto 1	26,56%	42,44%	13,55%	26,45%	40,51%	28,65%
Projeto 2	28,37%	43,03%	11,75%	34,46%	28,04%	28,85%
Projeto 3	45,06%	14,54%	74,69%	39,09%	31,45%	42,50%

Fonte: Autora.

Quadro 27 – Análise de sensibilidade - Priorizando o critério custo

Critérios/ Alternativas	Impacto ambiental (GWP)	Custo	Conforto térmico	Cronograma	Aceitação do cliente	Vetor de Decisão
Peso dos Critérios	12,50%	50,00%	12,50%	12,50%	12,50%	
Projeto 1	26,56%	42,44%	13,55%	26,45%	40,51%	34,60%
Projeto 2	28,37%	43,03%	11,75%	34,46%	28,04%	34,34%
Projeto 3	45,06%	14,54%	74,69%	39,09%	31,45%	31,06%

Fonte: Autora.

O projeto 3 apresenta-se como a pior alternativa somente quando o critério custo é priorizado, recebendo 50% do peso. Além dessas variações, foram feitas análises variando o critério considerado no impacto ambiental, desconsiderando o critério de aceitação cultural, desconsiderando o critério conforto térmico, uma análise considerando apenas os critérios ACV e CCV e ainda, uma análise considerando a repetitividade dos projetos, sendo variado os resultados dos projetos no critério cronograma de execução. O resumo dos resultados está apresentado no quadro 28.

Quadro 28 - Resumo geral dos resultados (Continua).

Modelo de atribuição de pesos aos critérios	Critério ambiental	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3	Melhor projeto
Variando o critério ambiental					
Análise global (Projetistas + Usuários)	Potencial de aquecimento global	31,76%	30,07%	38,17%	Projeto 3
	Potencial de acidificação	32,64%	31,01%	36,35%	Projeto 3
	Potencial de eutrofização	32,24%	31,21%	36,55%	Projeto 3
	Potencial de poluição	32,17%	30,73%	37,10%	Projeto 3
Análise a partir da opinião de projetistas	Potencial de aquecimento global	33,83%	30,86%	35,31%	Projeto 3
	Potencial de acidificação	34,42%	31,49%	34,09%	Projeto 3
	Potencial de eutrofização	34,15%	31,62%	34,23%	Projeto 3
	Potencial de poluição	34,10%	31,30%	34,59%	Projeto 3
Análise a partir da opinião dos usuários	Potencial de aquecimento global	29,30%	28,66%	42,03%	Projeto 3
	Potencial de acidificação	30,63%	30,07%	39,30%	Projeto 3
	Potencial de eutrofização	30,02%	30,37%	39,61%	Projeto 3
	Potencial de poluição	29,91%	29,66%	40,43%	Projeto 3

Quadro 28 - Resumo geral dos resultados (Conclusão).

Variando os pesos dos critérios					
Pesos iguais	Potencial de aquecimento global	29,90%	29,13%	40,97%	Projeto 3
Priorizando o Custo	Mudanças climáticas	34,60%	34,34%	31,06%	Projeto 1
Priorizando o Impacto ambiental	Potencial de aquecimento global	28,65%	28,85%	42,50%	Projeto 3
Considerando apenas ACV e CCV	Potencial de aquecimento global	37,29%	38,28%	24,43%	Projeto 2
Sem considerar a aceitação cultural					
Análise global (Projetistas + Usuários)	Potencial de aquecimento global	29,48%	30,61%	39,92%	Projeto 3
Análise a partir da opinião de projetistas	Potencial de aquecimento global	30,93%	32,73%	36,34%	Projeto 3
Análise a partir da opinião dos usuários	Potencial de aquecimento global	28,02%	28,77%	43,21%	Projeto 3
Sem considerar o conforto térmico					
Análise global (Projetistas + Usuários)	Potencial de aquecimento global	36,74%	35,21%	28,05%	Projeto 1
Análise a partir da opinião de projetistas	Potencial de aquecimento global	37,18%	33,72%	29,10%	Projeto 1
Análise a partir da opinião dos usuários	Potencial de aquecimento global	35,12%	34,57%	30,31%	Projeto 1
Considerando a repetitividade					
Análise global (Projetistas + Usuários)	Potencial de aquecimento global	31,46%	29,41%	39,12%	Projeto 3
Análise a partir da opinião de projetistas	Potencial de aquecimento global	33,44%	29,99%	36,57%	Projeto 3
Análise a partir da opinião dos usuários	Potencial de aquecimento global	29,11%	28,23%	42,66%	Projeto 3

Fonte: Autora.

O quadro 28 apresenta o resumo geral dos resultados de todas as simulações realizadas com os dados dos projetos 1, 2 e 3. O projeto 3 apresentou-se mais sustentável em quase todas as análises realizadas, exceto nas análises onde priorizou-se o critério CCV, na análise que levou em consideração apenas os critérios ACV e CCV e quando o conforto térmico não foi considerado. Cabe ressaltar que quaisquer alterações nos projetos, modificam os resultados da análise da sustentabilidade. Quando são alteradas as quantidades de materiais, na dimensão ambiental são alterados os impactos ambientais e na dimensão econômica são modificados os custos totais, o que interfere na análise da sustentabilidade. Os projetos 1 e 2 não apresentam diferença significativa entre si, apresentando pouca vantagem quando comparados com o projeto 3, esta vantagem mostra-se no custo e aceitação cultural dos projetos.

Nas análises considerando a alteração do impacto ambiental, os resultados apresentam pouca variação, sendo que o projeto 3 continua sendo o projeto considerado mais sustentável.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa apresentou uma metodologia para a avaliação de alternativas construtivas considerando a ACV, CCV, conforto térmico, cronograma de execução e aceitação cultural. Foram analisados três projetos com sistemas construtivos diferentes e, com os resultados, foi possível identificar quais sistemas e materiais apresentam maior sustentabilidade em projetos da construção civil. A ferramenta desenvolvida pode ser utilizada por projetistas na tomada de decisão durante a escolha do método construtivo. O modelo proposto incluiu as dimensões da sustentabilidade por intermédio da ACV e CCV, além da consideração de critérios adicionais: cronograma de execução, conforto térmico e aceitação cultural.

A modelagem dos projetos foi realizada no software Autodesk Revit, por trabalhar em plataforma BIM e facilitar o levantamento dos quantitativos de materiais. A ACV foi feita no plugin Tally, permitindo uma avaliação integrada ao software Revit sem a necessidade de exportar os dados do projeto para um software ACV.

Considerando a dimensão ambiental, a ACV é capaz de fornecer os resultados dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida das edificações. O projeto 1 apresenta maiores impactos ambientais que os projetos 2 e 3 em quase todas as categorias, exceto na categoria de consumo de energia não renovável, na qual o projeto 2 apresenta maior impacto, e nas categorias de depleção de ozônio estratosférico e potencial de poluição, nas quais o projeto 3 apresenta maiores impactos.

Na análise da ACV por categorias de materiais de construção, os materiais de acabamento e concreto são os que mais contribuíram para a geração de impactos ambientais nos projetos 1 e 2, enquanto que, para o projeto 3, os metais apresentam maior geração de impactos ambientais, já que para esse projeto o consumo de aço galvanizado é superior aos restantes dos materiais. De maneira geral, os materiais que mais contribuem para a geração de impactos ambientais são os materiais de acabamento, madeiras e plásticos e concreto para todos os projetos, e os metais se destacam como os materiais que mais geram impactos no sistema construtivo do projeto 3.

Considerando a dimensão econômica, a análise é realizada pelo CCV. O projeto 2 é economicamente mais atrativo, sendo que o projeto 3 apresenta os custos mais elevados. Na análise por fase da construção, o projeto 3 é mais econômico nas fases de infraestrutura e

acabamentos (revestimentos, forros e pinturas), o projeto 2 é mais econômico na fase da superestrutura e cobertura, o projeto 1 é mais econômico apenas na etapa de vedação.

Ao comparar os critérios adicionais, do ponto de vista do conforto térmico, por meio do fator de transmitância térmica dos materiais de vedação vertical, o projeto 3 é considerado o projeto com melhor desempenho térmico, seguido pelos projetos 1 e 2, respectivamente. Quanto à consideração do cronograma de execução, o projeto 3 ganha em agilidade de construção, enquanto o projeto 1 apresenta maior tempo de execução.

A aceitação cultural é um critério subjetivo, que foi medido com base na preferência de projetistas e usuários, aplicando-se a escala fundamental de Saaty, pela qual foram comparados os três projetos com sistemas construtivos diferentes. Em todas as análises realizadas, considerando a opinião de projetistas, de usuários e a compilação dos dois, o projeto 1 obteve a maior aceitação, seguido pelo projeto 2 e pelo projeto 3, o que se mostra coerente, visto que o projeto 1 é caracterizado pelo sistema construtivo usual no Brasil.

Em uma análise individual dos critérios, apesar de o projeto 3 ter ficado atrás dos projetos 1 e 2 no critério aceitação cultural e de apresentar um alto custo, é o projeto que se apresenta mais vantajoso nas categorias de conforto térmico, cronograma de execução e mudanças climáticas.

Relacionando os resultados obtidos na ACV, CCV, conforto térmico, cronograma de execução e aceitação cultural, por meio do método AHP, concluiu-se que o projeto 3 apresentou-se mais sustentável que os projetos 1 e 2 em quase todas as análises realizadas.

Apesar de o projeto 3 apresentar custo significativamente maior que os demais projetos e ser o sistema construtivo menos aceito com base nas respostas obtidas, ele gera os menores impactos para o meio ambiente, apresenta o menor cronograma de execução e a menor transmitância térmica. Quando o critério custo é priorizado, recebendo o maior peso que os demais critérios, e no caso em que o critério conforto térmico é desconsiderado, é que o projeto 1, caracterizado pela construção em alvenaria convencional, apresenta-se como a melhor alternativa de projeto. Quando se analisam os resultados apenas da ACV e CCV, o projeto 2 apresenta-se como o melhor projeto.

Reduzir a quantidade de materiais e recursos, alterar o tipo de material utilizado ou realizar a combinação de diferentes sistemas construtivos são estratégias de projeto que podem contribuir na redução dos impactos ambientais e no custo total dos projetos. Para a validação do método proposto foram estudados projetos de habitação unifamiliar de interesse social,

construindo diferentes cenários para a tomada de decisão com base nos resultados da ACV, CCV, conforto térmico, cronograma de execução e aceitação cultural.

Esta pesquisa se destaca por trazer um estudo sobre a sustentabilidade em projetos de construção aplicado a habitações de interesse social, incluindo também a análise de critérios adicionais. Além da ACV e CCV, foram considerados os critérios cronograma de execução, conforto térmico e aceitação cultural. Além disso, o estudo mostrou que a integração entre o BIM, ACV e CCV ainda na fase inicial do projeto colabora para a tomada de decisão na construção de residências mais sustentáveis. Nesse sentido, esta pesquisa evidencia a necessidade e incentiva o desenvolvimento de ferramentas para maximizar a sustentabilidade de projetos de construção.

Vale ressaltar que este estudo considerou bases de dados brasileiras para obtenção de resultados da CCV, conforto térmico e cronograma de execução e que a aceitação cultural foi medida por meio de um questionário aplicado representando a realidade da região da cidade de Passo Fundo, no estado do Rio Grande do Sul. Apenas a ACV ocorreu por meio do plugin Tally, que considera um banco de dados internacional. Apesar disso, entende-se que a metodologia proposta pode ser adaptada para aplicação em outros países e regiões.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para conseguir melhores resultados, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- realizar uma análise que leve em conta todas as etapas construtivas dos projetos, englobando os sistemas elétrico e hidrossanitário;
- considerar todas as etapas do ciclo de vida de um projeto realizando uma análise do berço ou túmulo, tendo em vista inclusive os custos envolvidos ao longo do ciclo de vida;
- adicionar a dimensão social como critério de análise;
- aumentar a amostra de respostas a partir da aplicação de um questionário;
- atribuir pesos diferentes aos tomadores de decisão, verificando as eventuais variações nos resultados;
- variar os valores dos parâmetros do critério conforto térmico, realizando uma análise mais completa das características térmicas dos materiais de construção de cada sistema construtivo;
- variar os parâmetros do cronograma de execução, elaborando um cronograma específico para os projetos considerados;
- empregar um outro método de tomada de decisão para verificar uma eventual interferência nos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- ABIKO, A. K. **Introdução à Gestão Habitacional**. Texto técnico – Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1995.
- ABOUHAMAD, M.; ABU-HAMD, M. Framework for construction system selection based on life cycle cost and sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production**. v. 241, 2019.
- ACZÉL, J.; SAATY, T. L. Procedures for Synthesizing Ratio Judgements. **Journal of Mathematical Psychology**. v. 27, p. 93-102, 1983.
- AHMAD, M.; ZHAO, Z.; LI, H. Revealing stylized empirical interactions among construction sector, urbanization, energy consumption, economic growth and CO2 emissions in China. **Science of the Total Environment**. v. 657, p. 1085-1098, 2019.
- ANAND, C. K.; AMOR, B. Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 67, p. 408-416, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- BAHRAMIAN, M.; YETILMEZSOY, K. Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995–2018). **Energy & Buildings**. v. 219, 2020.
- BARE, J. C.; GLORIA, T. P. Environmental impact assessment taxonomy providing comprehensive coverage of midpoints, endpoints, damages, and areas of protection. **Journal of Cleaner Production**. v. 16, p. 1021-1035, 2008.
- BARE J. C. et al. Life Cycle Impact Assessment Workshop Summary Midpoints versus Endpoints: The Sacrifices and Benefits. **State-of-the-Art: Life Cycle Impact Assessment**. v. 5(6), p. 319-326, 2000.
- BASAK, I.; SAATY, T. L. Group decision making using the analytic hierarchy process. **Mathl. Comput. Modelling**. v. 17, n. 4/5, p. 101-109, 1993.

BLUMENSCHNEIN, R. et. al. **Avaliação da qualidade da habitação de interesse social: projetos urbanístico e arquitetônico e qualidade construtiva**. 1 ed. Brasília, DF: UnB, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, 2015;

BRASIL. **Lei nº 4.380, de 21 de agosto de 1964**. Institui a correção monetária nos contratos imobiliários de interesse social, o sistema financeiro para aquisição da casa própria, cria o Banco Nacional da Habitação (BNH), e Sociedades de Crédito Imobiliário, as Letras Imobiliárias, o Serviço Federal de Habitação e Urbanismo e dá outras providências. Edição federal, Brasília, 1964.

BRASIL. **Constituição Federal, de 5 de outubro de 1988**. Constituição da República Federativa do Brasil. 4. ed. São Paulo: Saraiva, 1990.

BRASIL. **Lei nº 14.118, de 12 de janeiro de 2021**. Institui o Programa Casa Verde e Amarela. Brasília, DF: Presidência da República, 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/lei-n-14.118-de-12-de-janeiro-de-2021-298832993>. Acesso em: 17 mar. 2021.

BUYLE, M.; BRAET, J.; AUDENAERT, A. Life cycle assessment in the construction sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 26, p. 379-388, 2013.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Demanda Habitacional no País**. Brasília/DF, 2012.

CALEGARI, A. S. **Detalhes construtivos em obras térreas do sistema light steel framing**. Trabalho de conclusão de curso. Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Campo Mourão, 2015.

CAMPOS, P. F. **Light Steel Framing: Uso em construções habitacionais empregando a modelagem virtual como processo de projeto e planejamento**. Dissertação. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

CASTRO, R. R. T. L. de. **Análise da Sustentabilidade de Estruturas: Aço vs Betão**. 2012. Dissertação (Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 2012.

COSTA, K. A. **A utilização da avaliação do ciclo de vida no processo de tomada de decisão em sustentabilidade na indústria da construção no subsetor de edificações**. 2012. 217 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2012.

COSTA, D.; QUINTEIRO, P.; DIAS, A. C. A systematic review of life cycle sustainability assessment: Current state, methodological challenges, and implementation issues. **Science of the Total Environment**. v. 686, p. 774-787. 2019.

CRIPPA, J. **Integração BIM-ACV como apoio à tomada de decisão na fase de concepção de projeto**. Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração Ambiente Construído e Gestão, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019

DAUMAS, M. M.; NOGUEIRA, P. H. M.; CELESTINO, P. H. M. **Plano de negócio na área de habitação de interesse social: um estudo de caso**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

DOSSCHE, C.; BOEL, V.; DE CORTE, W. Use of Life Cycle Assessments in the Construction Sector: Critical Review. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 302–311, 2017.

FORMAN, E.; PENIWATI, K. Aggregating individual judgments and priorities with the Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**. v. 108, p. 165-169, 1998.

FOUQUET, M. et al. Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment. **Building and Environment**. v. 90, p. 51-59, 2015.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Déficit Habitacional no Brasil 2015**. Diretoria de Estatística e Informações. Belo Horizonte, 2018.

GHISI, E.; GOSH, S.; LAMBERTS, R. Electricity end-uses in the residential sector of Brazil. **Energy Policy**. v. 35, p. 4107-4120, 2007.

GIANNETI, B. F. et al. Towards more sustainable social housing projects: Recognizing the importance of using local resources. **Building and Environment**. v. 127, p. 187-203, 2018.

GOMES, A. P.; SOUZA, H. A. de.; TRIBESS, A. Impact of thermal bridging on the performance of buildings using Light Steel Framing in Brazil. **Applied Thermal Engineering**. v. 52, p. 84-89, 2013.

GOMES, M. S. **Análise técnica e econômica do sistema light steel framing e alvenaria convencional para edificações populares de loteamento**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, da IMED, Passo fundo, 2018.

GOMES, V.; BARROS, N. N. Contribuição da modelagem BIM para facilitar o processo de ACV de edificações completas. **Gestão e Tecnologia de Projetos**. v. 13, n. 2, p. 19-34, 2018.

GOPANAGONI, V.; VELPULA, S. L. An analytical approach on life cycle cost analysis of a green building. **Materials Today: Proceedings**. 2020.

GUINEÉ, J. Life Cycle Sustainability Assessment: What Is It and What Are Its Challenges?. CLIFT, R.; DRUCKMAN, A. **Taking Stock of Industrial Ecology**. Spring Open, p. 45-68, 2016.

HASIK, V. et al. Comparative whole-building life cycle assessment of renovation and new construction. **Building and Environment**. v. 161, 2019.

HOLLBERG, A.; GENOVA, G.; HABERT, G. Evaluation of BIM-based LCA results for building design. **Automation in Construction**. v. 109, 2020.

INMETRO. Portaria 50 - Anexo Geral V. **Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética de Edificações**. 2013.

INVIDIATA, A.; LAVAGNA, M.; GHISI, E. Selecting design strategies using multi-criteria decision making to improve the sustainability of buildings. **Building and Environment**. v. 139, p. 58-68, 2018.

ISMAEEL, W. S. E. Midpoint and endpoint impact categories in Green building rating Systems. **Journal of Cleaner Production**. v. 182, p. 783-793, 2018.

JANJUA, S. Y.; SARKER, P. K.; BISWAS, W. K. A Review of Residential Buildings' Sustainability Performance Using a Life Cycle Assessment Approach. **Journal of Sustainability Research**. 2019.

KEEBLE, B. R. The Brundtland report: "Our common future". **Medicine and War**. v. 4, n. 1, p. 17-25, 1988.

KLEIN, B. G.; MARONESI, V. **Comparativo orçamentário dos sistemas construtivos em alvenaria convencional, alvenaria estrutural e light steel frame para construção de conjuntos habitacionais**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.

KRIPKA, M.; YEPES, V.; MILANI, C. J. Selection of sustainable short-span bridge design in Brazil. **Sustainability**. vol. 11, n. 5, p. 1307, 2019.

LAMBERTS, R. et al. **Desempenho térmico de edificações**. Laboratório de eficiência energética em edificações, universidade federal de Santa Catarina, CTC - departamento de engenharia civil, Florianópolis, 2016.

LARIVOIR, L.C. B P. **A utilização de sistemas BIM na fase de projeto de edificações para análise de impactos ambientais dos materiais de Construção**. 2017. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

LI, H. et al. Assessing the life cycle CO2 emissions of reinforced concrete structures: Four cases from China. **Journal of Cleaner Production**. v. 210, p. 1496-1506, 2019.

LI, S.; ALTAN, H. Environmental impacts of building structures in Taiwan. **Procedia Engineering**. v. 21, p. 291 – 297, 2011.

LOPES, T. F. C. T. **Reabilitação sustentável de edifícios de habitação**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – perfil de Construção) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

LU, K. et al. Integration of life cycle assessment and life cycle cost using building information modeling: A critical review. **Journal of Cleaner Production**. v. 285, 2021.

MARTÍNEZ-ROCAMORA, A.; SOLÍS-GUZMÁN, J.; MARRERO, M. LCA databases focused on construction materials: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 58, p. 565-573, 2016.

MARTINS, J. A. et al. Comparative analysis on thermal performance of MgO and fiber cement boards applied to light steel frame building systems. **Journal of Building Engineering**. v. 21, p. 312 – 316, 2019.

MEDEIROS, G. F. **Método da busca harmônica aplicado na otimização de seções de pilares retangulares em concreto armado considerando custos econômicos e ambientais**. 2012. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2012.

MENDES, N. F. **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil**. 2013. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

MILANI, C. J. **Determinação de parâmetros ambientais para o dimensionamento otimizado de estruturas em concreto armado**. 2020. Tese (Programa de Pós-graduação em Engenharia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2020.

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL - ONU BR. **17 Objetivos para transformar o mundo**. Disponível:<<https://nacoesunidas.org/pos2015/>>. Acessado em: 22 nov. 2019.

NAJJAR, M. et al. Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building. **Journal of Building Engineering**. v. 14, p. 115-126, 2017.

NAJJAR, M. et al. Integrated optimization with building information modeling and life cycle assessment for generating energy efficient buildings. **Applied Energy**. p. 1366-1382, 2019.

NAVARRO, I.; YEPES, V.; MARTÍ, J. V. A Review of Multicriteria Assessment Techniques Applied to Sustainable Infrastructure Design. **Advances in Civil Engineering**. v. 2019, 2019.

PACHECO, M. T. G. **Ventilação natural e climatização artificial: crítica ao modelo superisolado para residência de energia zero em Belém e Curitiba**. 2013. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

PACHECO, M.; LAMBERTS, R. Assessment of technical and economical viability for large-scale conversion of single Family residential buildings into zero energy buildings in Brazil: Climatic and cultural considerations. **Energy Policy**. v. 63, p. 716-725, 2013.

PAULSEN, J.S., SPOSTO, R.M. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: case study for the program “MY HOUSE MY LIFE”. **Energy Build**. v. 57, p. 95-102, 2013.

PENG, C. Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling. **Journal of Cleaner Production**. v. 112, p. 453-465, 2016.

PIEKARSKI, C. M. **Modelo multicritério para apoio à tomada de decisão baseado em Avaliação do Ciclo de Vida e indicadores corporativos**. 2015. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.

PRASCEVIC, N.; PRASCEVIC, Z. Application of fuzzy ahp for ranking and selection of alternatives in construction project management. **Journal of Civil Engineering and Management**. v. 23, n. 8, p. 1123–1135, 20 nov. 2017.

ROCAMORA, A. M., GUZMÁN, J. S.; MARRERO, M. LCA databases focused on construction materials: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 58, p. 565-573, 2016.

SAATY, T. L. Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. **Management Science**. v. 32, n. 7, 1986.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**. v. 9, n. 3-5, p. 161-176, 1987.

SAATY, T. L. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**. v. 48, p. 9-26, 1990.

SAATY, T.L. **Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with The Analytic Hierarchy Process**. p. 204-220, 1994.

SALEEM M. et al. Life Cycle Thinking–Based Selection of Building Facades. **American Society of Civil Engineers**. 2018.

SANTIAGO, A. K.; FREITAS, A. M. S.; CRASTO, R. C. M. **Steel Framing: Arquitetura**. Instituto Aço Brasil. Centro brasileiro da construção em aço. Rio de Janeiro, 2012.

SANTORO, J. F. **Determinação de parâmetros ambientais para o dimensionamento otimizado de estruturas em concreto armado**. 2015. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2015.

SANTOS, L. J. C. **Avaliação do Ciclo de Vida e Custeio do Ciclo de Vida de Evaporadores para Usinas de Açúcar**. 2007. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SHARMA, A. et al. Life cycle assessment of buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 15, p. 871–875, 2011.

SINAPI. **SINAPI_ref_Insumos_Composicoes_RS_052020_NaoDesonerado**. Disponível em: < https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_660>. Acesso em: 13 de julho de 2020.

SOARES, S. R.; SOUZA, D. M.; PEREIRA, S. W. **A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil**. Coletânea Habitare - Construção e Meio Ambiente. v. 7, p. 96-127, 2006.

SVAJLENKA, J.; KOZLOVSKÁ, M.; POSIVÁKOVÁ, T. Analysis of Selected Building Constructions Used in Industrial Construction in Terms of Sustainability Benefits. **Sustainability**. v. 10, 2018.

TALLY. **Tally Methods**. Disponível em: <<http://choosetally.com/methods/>> Acesso em 17 de julho de 2020.

THOMAS, H. R. et al. Modeling Construction Labor Productivity. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 116, n. 4, p. 705-726, dec 1990.

TRIANA, M.A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterization of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**. v. 87, p. 524–541, 2015.

TUBELO, R. et al. Cost-effective envelope optimisation for social housing in Brazil's moderate climates zones. **Building and Environment**. v. 133, p. 213-227, 2018.

UNEP. **Comunicado de imprensa**. Disponível em: <<https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/emissoes-do-setor-de-construcao-civil-atingiram#:~:text=Isto%20equivale%20a%20uma%20queda,devido%20%C3%A0%20pandemia%20em%202020.>> Acesso em 21 de fevereiro de 2021)

VITALE, P. et al. Environmental performances of residential buildings with a structure in cold formed steel or reinforced concrete. **Journal of Cleaner Production**. v. 189, p. 839-852, 2018.

VITORIO JUNIOR, Paulo Cezar. **Avaliação de projetos para habitação de interesse social em foco na sustentabilidade**. 2020. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2020.

YOUNIS, A.; EBEAD, U.; JUDD, S. Life cycle cost analysis of structural concrete using seawater, recycled concrete aggregate, and GFRP reinforcement. **Construction and Building Materials**. v. 175, p. 152-160, 2018.

ZAMARRÓN-MIEZA, I.; YEPES, V.; MORENO-JIMÉNEZ, J.M. A systematic review of application of multi-criteria decision analysis for aging-dam management. **Journal of Cleaner Production**. v. 147, p. 217-230, 2017.

APÊNDICE A – Questionário aplicado

Pesquisa de mestrado - Pollyanna Bianchi

Olá!

Convido você para que participe de uma pesquisa, respondendo um questionário online, o qual constitui parte do meu trabalho de dissertação do mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGEng) da Universidade de Passo Fundo (UPF). O objetivo do questionário é elencar hierarquias de prioridades de critérios considerados na pesquisa.

A pesquisa está inserida no eixo de infraestrutura e meio ambiente e objetiva desenvolver uma metodologia para a comparação e seleção de métodos construtivos para a construção de habitações de interesse social, propondo um modelo de tomada de decisão entre diferentes sistemas construtivos.

Diante disto, para a definição da ponderação dos critérios para a escolha das alternativas, será aplicado o Analytic Hierarch Process (AHP), uma ferramenta de análise multicritérios, para fazer a avaliação hierárquica dos mesmos.

O método AHP considera o cálculo do Índice de consistência. Sendo assim, o usuário irá responder o questionário considerando uma escala de ponderações, considerando números ímpares de 1 a 9.

Espero poder contar com sua participação!

***Obrigatório**

Selecione a opção

1. Você é da área da construção civil (Engenheiro(a) civil, arquiteto(a), estudante de engenharia civil ou arquitetura ou construtor)? *

Marcar apenas uma oval.

Sim *Pular para a pergunta 2*

Não *Pular para a pergunta 7*

Área da Construção Civil

2. Você já utilizou o sistema de construção em light steel frame em seus projetos? *

Marcar apenas uma oval.

Sim

Não

3. Você já utilizou o sistema de construção em alvenaria estrutural com blocos de concreto em seus projetos? *

Marcar apenas uma oval.

Sim

Não

4. Qual o método construtivo mais usual em seus projetos? *

Marcar apenas uma oval.

Concreto armado + Alvenaria

Sistema Light Steel Frame

Alvenaria Estrutural

5. Quando você vai definir o sistema construtivo do seu projeto, qual desses itens leva em consideração? Classifique em ordem de importância: *

Marque todas que se aplicam.

	Conforto Térmico	Prazo de Execução	Custo	Impacto Ambiental	Aceitação dos usuários quanto ao método construtivo
Primeiro	<input type="checkbox"/>				
Segundo	<input type="checkbox"/>				
Terceiro	<input type="checkbox"/>				
Quarto	<input type="checkbox"/>				
Quinto	<input type="checkbox"/>				

6. Se você fosse projetar uma Residência hoje, qual das opções de projeto levaria em consideração? Classifique em ordem de importância: *

Marque todas que se aplicam.

	Concreto armado + Alvenaria	Sistema Light Steel Frame	Alvenaria Estrutural
Primeiro	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Segundo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Terceiro	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Pular para a pergunta 13

Para você!

7. Você já ouviu falar no sistema construtivo light steel frame (Estrutura em aço com fechamento em placas de gesso ou cimentícias)? *

Marcar apenas uma oval.

Sim

Não

8. Você já viu uma construção com esse sistema? *

Marcar apenas uma oval.

Sim

Não

9. Você já ouviu falar no sistema construtivo com blocos estruturais? *

Marcar apenas uma oval.

Sim

Não

10. Você já viu uma construção com esse sistema? *

Marcar apenas uma oval.

Sim

Não

11. Se você fosse construir uma Residência hoje, qual das opções de projeto levaria em consideração? Classifique em ordem de importância: *

Marque todas que se aplicam.

	Construção em concreto armado e fechamento em tijolos	Construção com blocos estruturais	Construção em Light Steel Frame (Estrutura em aço com fechamento em placas de gesso ou cimentícias)
Primeiro	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Segundo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Terceiro	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

12. Se você fosse construir uma Residência hoje, qual desses itens levaria em consideração? Classifique em ordem de importância: *

Marque todas que se aplicam.

	Conforto Térmico	Prazo de Execução	Custo	Impacto Ambiental
Primeiro	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Segundo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Terceiro	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Quarto	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Pular para a pergunta 39

O método AHP considera uma escala de ponderações. Quando na definição do sistema construtivo em seus projetos, classifique os seguintes itens, conforme a preferência entre um e outro, considerando a seguinte escala:

Escala AHP

Valor	Definição	Comentários
1	Igual Importância	O critério A tem igual importância que o critério B
3	Importância Moderada	A experiência e o julgamento favorecem ligeiramente o critério A sobre o B
5	Grande Importância	A experiência e o julgamento favorecem fortemente o critério A sobre o B
7	Muito Grande Importância	O critério A é muito mais importante que o critério B
9	Extrema Importância	Sem dúvida o critério A está sobre o critério B

13. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o conforto térmico ou o prazo de execução? *

Marcar apenas uma oval.

- Conforto térmico
- Prazo de execução

14. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

15. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o conforto térmico ou o custo? *

Marcar apenas uma oval.

- Conforto térmico
- Custo

16. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

17. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o conforto térmico ou o impacto ambiental? *

Marcar apenas uma oval.

- Conforto térmico
- Impacto ambiental

18. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

19. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o conforto térmico ou a aceitação do cliente quanto ao sistema construtivo? *

Marcar apenas uma oval.

- Conforto térmico
- Aceitação do cliente quanto ao sistema construtivo

20. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

21. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o prazo de execução ou o custo? *

Marcar apenas uma oval.

- Prazo de execução
- Custo

22. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

23. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o prazo de execução ou o impacto ambiental? *

Marcar apenas uma oval.

- Prazo de execução
- Impacto ambiental

24. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

25. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o prazo de execução ou a aceitação do cliente quanto ao sistema construtivo? *

Marcar apenas uma oval.

- Prazo de execução
- Aceitação do cliente

26. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

27. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o custo ou o impacto ambiental? *

Marcar apenas uma oval.

- Custo
- Impacto ambiental

28. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

29. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o custo ou o aceitação do cliente quanto ao sistema construtivo? *

Marcar apenas uma oval.

- Custo
- Aceitação do cliente quanto ao sistema construtivo

30. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

31. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o impacto ambiental ou o aceitação do cliente quanto ao sistema construtivo? *

Marcar apenas uma oval.

- Impacto ambiental
- Aceitação do cliente quanto o sistema construtivo

32. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

33. Qual modelo construtivo você considera melhor ou mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- Construção em concreto armado e fechamento em tijolos
- Construção com blocos estruturais

34. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

35. Qual modelo construtivo você considera melhor ou mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- Construção em concreto armado e fechamento em tijolos
- Light Steel Frame (Estrutura em aço com fechamento em placas de gesso ou cimentícias)

36. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

37. Qual modelo construtivo você considera melhor ou mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- Construção com blocos estruturais
- Light Steel Frame (Estrutura em aço com fechamento em placas de gesso ou cimentícias)

38. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

Pular para a seção 7 (Muito obrigada pela sua participação!)

O método AHP considera uma escala de ponderações. Se você fosse construir uma residência hoje, classifique os seguintes itens, conforme a preferência entre um e outro, considerando a seguinte escala:

Escala AHP

Valor	Definição	Comentários
1	Igual Importância	O critério A tem igual importância que o critério B
3	Importância Moderada	A experiência e o julgamento favorecem ligeiramente o critério A sobre o B
5	Grande Importância	A experiência e o julgamento favorecem fortemente o critério A sobre o B
7	Muito Grande Importância	O critério A é muito mais importante que o critério B
9	Extrema Importância	Sem dúvida o critério A está sobre o critério B

39. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o conforto térmico ou o prazo de execução? *

Marcar apenas uma oval.

- Conforto térmico
- Prazo de execução

40. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

41. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o conforto térmico ou o custo? *

Marcar apenas uma oval.

- Conforto térmico
- Custo

42. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

43. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o conforto térmico ou o impacto ambiental que a construção causa no meio ambiente? *

Marcar apenas uma oval.

- Conforto térmico
- Impacto ambiental

44. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

45. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o conforto térmico ou a sua preferência pelo sistema construtivo (Se sua casa vai ser em concreto armado, LSF ou Alvenaria Estrutural)? *

Marcar apenas uma oval.

- Conforto térmico
- Minha preferência

46. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

47. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o prazo de execução ou o custo? *

Marcar apenas uma oval.

- Prazo de execução
- Custo

48. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

49. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o prazo de execução ou o impacto ambiental? *

Marcar apenas uma oval.

- Prazo de execução
- Impacto ambiental

50. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

51. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o prazo de execução ou a sua preferência pelo sistema construtivo (Se sua casa vai ser em concreto armado, LSF ou Alvenaria Estrutural)? *

Marcar apenas uma oval.

- Prazo de execução
- Minha preferência

52. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

53. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o custo ou o impacto ambiental? *

Marcar apenas uma oval.

- Custo
- Impacto ambiental

54. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

55. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o custo ou a sua preferência pelo sistema construtivo (Se sua casa vai ser em concreto armado, LSF ou Alvenaria Estrutural)? *

Marcar apenas uma oval.

- Custo
- Minha preferência

56. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

57. Quando na construção de uma residência, você considera mais importante o impacto ambiental ou a sua preferência pelo sistema construtivo (Se sua casa vai ser em concreto armado, LSF ou Alvenaria Estrutural)? *

Marcar apenas uma oval.

- Impacto ambiental
- Minha preferência

58. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

59. Qual modelo construtivo você considera melhor ou mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- Construção em concreto armado e fechamento em tijolos
- Construção com blocos estruturais

60. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

61. Qual modelo construtivo você considera melhor ou mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- Construção em concreto armado e fechamento em tijolos
- Light Steel Frame (Estrutura em aço com fechamento em placas de gesso ou cimentícias)

62. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

63. Qual modelo construtivo você considera melhor ou mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

- Construção com blocos estruturais
- Light Steel Frame (Estrutura em aço com fechamento em placas de gesso ou cimentícias)

64. Quanto mais importante? *

Marcar apenas uma oval.

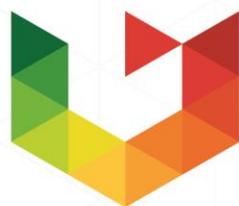
- 1 - Igual importância
- 3 - Importância moderada
- 5 - Grande importância
- 7 - Muito grande importância
- 9 - Extrema importância

Pular para a seção 7 (Muito obrigada pela sua participação!)

Muito obrigada pela sua participação!

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br