



**UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE SANTA CATARINA**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

JULIA RATAICHESCK FIATES

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE DIFERENTES ENVOLTÓRIAS PARA  
INSTITUIÇÕES PÚBLICAS DE ENSINO NA GRANDE FLORIANÓPOLIS**

FLORIANÓPOLIS

2023

JULIA RATAICHESCK FIATES

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE DIFERENTES ENVOLTÓRIAS PARA  
INSTITUIÇÕES PÚBLICAS DE ENSINO NA GRANDE FLORIANÓPOLIS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientador: Prof. EneDir Ghisi, Ph.D

FLORIANÓPOLIS

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pela autora, através do Programa de  
Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Fiates, Julia Rataichesk

Avaliação do Ciclo de Vida de diferentes envoltórias para instituições públicas de ensino na Grande Florianópolis / Julia Rataichesk Fiates ; orientador, Enedir Ghisi, 2023.

130 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Avaliação do Ciclo de Vida. 3. Instituições públicas de ensino. 4. Simulação computacional de edificações. 5. Desempenho térmico. I. Ghisi, Enedir. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

**Julia Rataichesk Fiates**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE DIFERENTES ENVOLTÓRIAS PARA  
INSTITUIÇÕES PÚBLICAS DE ENSINO NA GRANDE FLORIANÓPOLIS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheira Civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 28 de novembro de 2023.

**Banca examinadora:**

Insira neste espaço  
a assinatura

Prof. EneDir Ghisi, PhD

Orientador

Profa. Liseane Padilha Thives, Dra.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Igor Catão Martins Vaz, Me.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2023.

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente, expresso minha gratidão à minha família. Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Giovanna e Fábio, minhas principais referências no âmbito pessoal, profissional e acadêmico. Sou grata por todos os aprendizados, apoio e incentivo ao longo de minha jornada. Agradeço também ao meu irmão, Pedro, pela amizade e compreensão. Por fim, manifesto meus agradecimentos às mulheres da minha família, que moldaram quem sou hoje. Minha mãe, Giovanna, minha tia e madrinha Márcia, e minhas avós Ana Janete e Risoleta, exemplos de força, amor e conhecimento.

Ao meu amado Davi, por todo o amor, companheirismo, compreensão e paciência durante nossos anos juntos. Contigo aprendi o que é intimidade, cumplicidade e felicidade.

Às minhas melhores amigas Bianca, Cristine, Giuliana e Júlia, que me acompanharam desde o início da jornada acadêmica, e que seguirão presentes por toda a vida. Crescemos juntas ao longo da graduação e sou eternamente grata pelo laço que criamos. *We were girls together.*

Ao professor Eneidir, pela orientação deste trabalho e pela contribuição com seu vasto conhecimento. A elaboração deste trabalho me proporcionou uma maior proximidade com a sustentabilidade dentro da engenharia, área de extrema identificação pessoal e profissional. Estendo também meus agradecimentos a todos os professores da graduação, que por meio das aulas e conversas, contribuíram com minha formação.

À UFSC por todas as oportunidades oferecidas. Agradeço ao EPEC, à ATEC, ao PET e ao LEE pelas experiências e pelo aprendizado. À CAPES por me proporcionar uma experiência internacional ao longo da graduação. Nunca teria tido contato com a sustentabilidade em edificações sem as aulas ministradas na JUNIA HEI e o estágio realizado na VSA, em Lille.

À Petinelli, especialmente à Nicole e Lorena, pelos conhecimentos adquiridos em *Green Building*, área pela qual vim a me apaixonar. Sou grata pela evolução pessoal e profissional adquirida ao longo do meu estágio.

## RESUMO

A construção civil desempenha papel crucial na economia de um país, mas suas atividades resultam em impactos ambientais significativos. No entanto, o setor tem vasto potencial para economia de energia. Com milhares de escolas na rede pública do país, a introdução de técnicas de eficiência energética nos seus projetos pode reduzir consideravelmente o consumo energético. Este trabalho tem como objetivo principal selecionar o conjunto de componentes construtivos com menor impacto ambiental para uso em instituições públicas de ensino na Grande Florianópolis por meio da avaliação do ciclo de vida. Foram avaliados dois componentes construtivos de parede, dois de esquadria e quatro de cobertura. Primeiramente determinaram-se o projeto arquitetônico modelo e os componentes construtivos adotados, considerando as instituições públicas de ensino na região. Para as paredes considerou-se o uso de blocos cerâmicos de dimensões 14x9x19cm e 9x19x19cm. Para as esquadrias adotou-se madeira e alumínio, e nas coberturas, foram utilizadas telhas de fibrocimento com forro de PVC, forro em *Drywall* e laje maciça de concreto, além de telhas cerâmicas com forro de PVC. Em seguida, realizou-se a simulação computacional por meio do programa *EnergyPlus* abrangendo as quatro orientações principais. As simulações foram inicialmente conduzidas considerando a ventilação natural, seguidas pela implementação de um sistema de condicionamento artificial. O conjunto de menor consumo energético foi o composto por parede de bloco cerâmico de dimensões 14x9x19, esquadrias em alumínio e cobertura composta por telha cerâmica e forro de PVC. Realizou-se também a avaliação do ciclo de vida por meio do programa *SimaPro*, contemplando três cenários: a construção da edificação, a construção da edificação e um ano de consumo energético para operação, e a construção da edificação e o consumo energético ao longo da vida útil de 50 anos. O segundo cenário foi utilizado para selecionar o conjunto de componentes construtivos com menor impacto no ciclo de vida. Como conclusão, identificou-se que o conjunto composto por paredes de bloco cerâmico de dimensões 9x19x19, esquadrias de madeira e vidro comum e cobertura com telha de fibrocimento e forro de PVC apresenta o menor impacto ambiental quando considerado o ciclo de vida.

**Palavras-chave:** Avaliação do Ciclo de Vida; Instituições públicas de ensino; Simulação computacional de edificações; Desempenho térmico.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Zoneamento bioclimático brasileiro.....	26
Figura 2 – Proposta de método para avaliação do ciclo de vida.....	31
Figura 3 – Esquema da metodologia “do berço ao túmulo” para o setor da construção civil.....	32
Figura 4 – Estrutura do programa <i>EnergyPlus</i> .....	41
Figura 5 – Fluxograma do método utilizado.....	45
Figura 6 – Planta baixa do projeto arquitetônico modelo.....	46
Figura 7 – Simplificação da planta baixa do projeto arquitetônico modelo.....	47
Figura 8 – Divisórias no eixo central das paredes do projeto arquitetônico.....	48
Figura 9 – Orientações e nomenclaturas adotadas para simulação da edificação.....	50
Figura 10 – Modelagem da edificação para a simulação computacional.....	52
Figura 11 – Identificação da interação dos elementos entre as zonas térmicas.....	53
Figura 12 – Modelagem final da cobertura no <i>SketchUp</i> .....	53
Figura 13 – Identificação da fronteira definida para a avaliação do ciclo de vida.....	59
Figura 14 – Estimativa das áreas para levantamento do quantitativo.....	61
Figura 15 – Etapas da modelagem da edificação.....	62
Figura 16 – Modelagem final da edificação no programa Revit.....	62
Figura 17 – Diferentes cenários analisados ao longo do trabalho.....	66
Figura 18 – Total anual de horas de desconforto para cada conjunto de componentes construtivos conforme a orientação da edificação.....	74
Figura 19 – Relação do total anual de horas de desconforto e o consumo energético anual.....	76
Figura 20 – Características das edificações com menor consumo energético anual....	77
Figura 21 – Características das edificações com maior consumo energético anual....	77
Figura 22 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção na categoria de dano de saúde humana.....	80
Figura 23 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção na categoria de dano de qualidade do ecossistema.....	81
Figura 24 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção na categoria de dano de mudanças climáticas.....	82
Figura 25 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção na categoria de dano de recursos.....	83

Figura 26 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção e o primeiro ano de operação na categoria de dano de saúde humana.....	84
Figura 27 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção e o primeiro ano de operação na categoria de dano de qualidade do ecossistema.....	86
Figura 28 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção e o primeiro ano de operação na categoria de dano de mudanças climáticas.....	87
Figura 29 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção e o primeiro ano de operação na categoria de dano de recursos.....	89
Figura 30 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção na categoria de dano de saúde humana ao longo da vida útil.....	90
Figura 31 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção na categoria de dano de qualidade do ecossistema ao longo da vida útil.....	91
Figura 32 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção na categoria de dano de mudanças climáticas ao longo da vida útil.....	92
Figura 33 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção na categoria de dano de recursos ao longo da vida útil.....	93
Figura 34 – Frequência de ocorrência por componente construtivo e orientação das edificações com menor valor de impacto nas categorias de dano.....	94
Figura 35 – Soma dos percentuais de impacto para cada edificação analisada.....	96
Figura 36 – Valor de cada categoria de impacto na categoria de dano de saúde humana.....	127
Figura 37 – Valor de cada categoria de impacto na categoria de dano de qualidade do ecossistema.....	128
Figura 38 – Valor de cada categoria de impacto na categoria de dano de mudanças climáticas.....	129
Figura 39 – Valor de cada categoria de impacto na categoria de dano de recursos.....	130

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais parâmetros considerados na modelagem da edificação para simulação.....	37
Quadro 2 – Processos de transferência de calor e massa e os elementos nos quais eles ocorrem na edificação.....	39
Quadro 3 – Categorias de impacto e categorias de dano obtidas na avaliação do ciclo de vida.....	64
Quadro 4 – Componentes construtivos de parede considerados para análise.....	70
Quadro 5 – Componentes construtivos de esquadrias considerados para análise.....	70
Quadro 6 – Componentes construtivos de cobertura considerados para análise.....	71
Quadro 7 – Componentes construtivos de instituições de ensino na Grande Florianópolis.....	109
Quadro 8 – Conjuntos de componentes construtivos e orientações considerados na simulação.....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidade de potência e valor da potência instalada para iluminação.....	55
Tabela 2 – Densidade de potência e valor da potência instalada para equipamentos.....	56
Tabela 3 – Áreas levantadas por quantificação pelo Revit.....	63
Tabela 4 – Ocorrência dos materiais levantados para paredes de áreas secas.....	67
Tabela 5 – Ocorrência dos materiais levantados para paredes de áreas molhadas....	67
Tabela 6 – Ocorrência das dimensões dos blocos cerâmicos empregados nas paredes.....	68
Tabela 7 – Ocorrência das tonalidades de pintura de fachada.....	68
Tabela 8 – Ocorrência dos materiais levantados para os pisos.....	68
Tabela 9 – Ocorrência dos materiais levantados para as portas.....	69
Tabela 10 – Ocorrência dos materiais levantados para as janelas.....	69
Tabela 11 – Ocorrência dos materiais levantados para a cobertura.....	69
Tabela 12 – Características térmicas dos materiais para os componentes construtivos de esquadria.....	72
Tabela 13 – Características térmicas dos materiais para os componentes construtivos de parede.....	72
Tabela 14 – Características térmicas dos materiais para os componentes construtivos de cobertura.....	72
Tabela 15 – Total de horas de desconforto por estação e anual e total de consumo energético anual, de aquecimento e resfriamento para as edificações com menor consumo.....	78
Tabela 16 – Valores de referência para edificações educacionais.....	112
Tabela 17 – Inventário do ciclo de vida para a parede com blocos cerâmicos de dimensões 14x9x19.....	115
Tabela 18 – Inventário do ciclo de vida para a parede com blocos cerâmicos de dimensões 9x19x19.....	115
Tabela 19 – Inventário do ciclo de vida para janela em madeira.....	115
Tabela 20 – Inventário do ciclo de vida para janela em alumínio.....	115
Tabela 21 – Inventário do ciclo de vida para porta em madeira.....	116
Tabela 22 – Inventário do ciclo de vida para porta em alumínio.....	116
Tabela 23 – Inventário do ciclo de vida para cobertura com forro em <i>Drywall</i> e telha de fibrocimento.....	116

Tabela 24 – Inventário do ciclo de vida para cobertura com forro de PVC e telha de fibrocimento.....	116
Tabela 25 – Inventário do ciclo de vida para cobertura com laje maciça de concreto e telha de fibrocimento.....	117
Tabela 26 – Inventário do ciclo de vida para cobertura com forro de PVC e telha cerâmica.....	117

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Análise de Ciclo de Vida
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CHPS	<i>Collaborative for High Performance Schools</i>
DAP	Declaração Ambiental de Produto
DALY	<i>Disability-Adjusted Life Years</i>
DIPE	Diretoria de Infraestrutura Escolar
DUDH	Declaração Universal dos Direitos Humanos
ELCD	<i>Joint Research Centre from the European Commission</i>
FNDE	Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação
HVAC	<i>Heating, ventilation and air-conditioning</i>
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ILCD	<i>International Reference Life Cycle Data System</i>
INI-C	Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviço e Públicas
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PNE	Plano Nacional da Educação
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
TCPO	Tabelas de Composição de Preços para Orçamentos
SWERA	<i>Solar and Wind Energy Resource Assessment</i>

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução .....</b>	<b>16</b>
1.1. Objetivos .....	19
1.1.1. Objetivo geral .....	19
1.1.2. Objetivos específicos .....	19
1.2. Estrutura do trabalho .....	19
<b>2. Revisão bibliográfica.....</b>	<b>21</b>
2.1. Instituições públicas de ensino no Brasil .....	21
2.1.1. Contexto histórico .....	21
2.1.2. Infraestrutura escolar .....	23
2.1.2.1. Diretrizes gerais de construção.....	24
2.1.2.2. Padrão de ocupação .....	25
2.1.2.3. Desempenho térmico .....	25
2.2. Avaliação do ciclo de vida.....	27
2.2.1. Normativas da avaliação do ciclo de vida.....	28
2.2.2. Avaliação do ciclo de vida para o setor da construção civil.....	30
2.2.3. OpenLCA .....	34
2.2.4. SimaPro .....	35
2.3. Simulação computacional de edificações .....	36
2.3.1. Sistemas de controle.....	38
2.3.2. Influência do usuário .....	39
2.3.3. EnergyPlus.....	40
2.4. Considerações finais.....	42
<b>3. Método .....</b>	<b>44</b>
3.1. Projeto arquitetônico modelo .....	45
3.2. Componentes construtivos .....	48
3.3. Simulação computacional .....	49
3.4. Levantamento de dados para a simulação computacional.....	51
3.4.1. Clima local.....	51
3.4.2. Geometria e zonas térmicas .....	51

3.4.3. Materiais construtivos.....	53
3.4.4. Dados de operação.....	53
3.5. Análise dos dados para a simulação computacional .....	57
3.5.1. Horas de desconforto térmico.....	57
3.5.2. Consumo energético.....	58
3.6. Avaliação do ciclo de vida.....	59
3.6.1. Objetivo e escopo.....	59
3.6.2. Inventário do ciclo de vida.....	60
3.6.3. Avaliação dos impactos.....	63
3.7. Interpretação dos dados de impacto ambiental do ciclo de vida .....	64
3.7.1. Categorias de dano.....	65
3.7.2. Categorias de dano.....	65
3.8. Considerações finais .....	66
<b>4. Resultados .....</b>	<b>67</b>
4.1. Análise do levantamento de materiais construtivos .....	67
4.1.1. Paredes.....	69
4.1.2. Esquadrias.....	70
4.1.3. Coberturas.....	71
4.1.4. Características térmicas.....	71
4.1.5. Conjuntos de componentes construtivos e orientações.....	73
4.2. Análise dos dados as simulação computacional.....	73
4.2.1. Horas de desconforto térmico.....	73
4.2.2. Consumo energético.....	75
4.3. Interpretação dos dados de impacto ambiental da análise do ciclo de vida.....	79
4.3.1. Categorias de dano.....	79
4.3.2. Categorias de impacto.....	95
<b>5. Conclusão .....</b>	<b>98</b>
5.1. Conclusões gerais.....	98
5.2. Limitações do estudo.....	99
5.3. Sugestões para trabalhos futuros.....	100
<b>Referências.....</b>	<b>102</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>109</b>

<b>ANEXO B.....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>118</b>
<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>126</b>
<b>APÊNDICE D.....</b>	<b>127</b>

## 1. Introdução

A indústria da construção civil desempenha um importante papel na economia de um país. Por outro lado, atividades de construção geram impactos significativos ao meio ambiente, sendo a indústria que mais gera resíduo e consome cerca de 75% de recursos naturais disponíveis (ASADOLLAHFARDI; ASADI; KARIMI, 2015; JOHN, 2000).

No Brasil, o modelo de construção civil atualmente adotado resulta em diversos prejuízos ambientais, pois utiliza matéria-prima não renovável da natureza e consome elevadas quantidades de energia, tanto na extração quanto no transporte e processamento dos insumos (ROTH; GARCIAS, 2009). No entanto, a construção civil é considerada o setor com maiores oportunidades e potencial para economizar energia e reduzir a emissão de gás carbônico (KYLILI; ILIC; FOKAIDES, 2017).

As edificações representam cerca de 40% do consumo total de energia ao redor do mundo, e são responsáveis por emissões de carbono de maneira proporcional. Nas últimas décadas foram desenvolvidas estratégias para reduzir essa parcela de emissões por meio da redução do consumo de energia de edificações. É estimado que o consumo energético de uma edificação pode ser reduzido em até 50% ao serem incorporadas intervenções de *design* apropriadas no seu envelope, sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado, iluminação, aquecimento de água e refrigeração (HARISH; KUMAR, 2016).

No Brasil, o setor público consumiu 7,5% do total de energia elétrica do país em 2022. O setor industrial, principal consumidor de energia elétrica, foi responsável por 37,4% dos consumos, seguido do setor residencial (26,4%), do setor comercial (15,7%), e, finalmente, do setor público, com 7,5%. Estima-se que o consumo de energia elétrica em prédios públicos represente 80% do total consumido pelo setor público (BRASIL, 2022; SILVA, 2015).

O uso de recursos hídricos também está intimamente relacionado com o processo de urbanização e o desenvolvimento econômico. O consumo setorial da água no Brasil ocorre principalmente para irrigação, abastecimento humano (urbano e rural), abastecimento dos rebanhos, indústria, geração termelétrica e mineração, sendo 25% destinado para o abastecimento urbano (BRASIL, 2021).

Além do consumo de água e energia, os indicadores sociais, econômicos e ecológicos também têm impacto na sustentabilidade de uma edificação. O setor da construção afeta diretamente o ambiente natural, a saúde humana e a disponibilidade de recursos, mas sua magnitude é comumente desconsiderada no desenvolvimento de projetos de engenharia (ZARARAH, 2018). Ponderar todas essas influências é indispensável para que o setor da construção civil se adeque ao desenvolvimento sustentável (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013).

No Brasil, segundo Schenini, Bagnati e Cardoso (2004), a inexistência de uma consciência ecológica na indústria da construção civil resultou em danos ambientais irreparáveis. O processo de migração ocorrido na segunda metade do século XX foi responsável por agravá-los, ocasionando uma enorme demanda por novas edificações.

Atualmente, com o crescimento da conscientização dos problemas gerados pela indústria da construção, diversas ferramentas foram desenvolvidas para avaliar a sustentabilidade a partir de diferentes pontos de vista e para uma variedade de usuários (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013). Consequentemente, a procura pelo desenvolvimento de projetos de edificações que apresentem baixo consumo energético também aumentou. Dentre as estratégias utilizadas para esse fim, o condicionamento passivo das edificações influencia na escolha dos materiais adotados, considerando a temperatura e umidade do local em que o projeto será desenvolvido (PEREIRA; GHISI, 2011).

Essa recente consciência ambiental ocasionou interesse pela análise do ciclo de vida de produtos e serviços oferecidos ao público. Os métodos de Análise de Ciclo de Vida (ACV) têm sido usados para avaliações ambientais de processos de desenvolvimento de produtos em outras indústrias há muito tempo, mas sua aplicação ao setor da construção civil é atual (ZARARAH, 2018).

Morales et al. (2019) constatam que, atualmente, verifica-se um aumento no interesse em incorporar métodos de ACV na tomada de decisões da construção de edifícios, seja para seleção de produtos ambientalmente preferíveis, bem como para avaliação e otimização de processos de construção. Para suprir essa demanda, tornou-se necessário o desenvolvimento de uma ferramenta de avaliação ambiental holística (CURRAN, 2013).

A análise de todo o ciclo de vida de uma edificação permite identificar os principais componentes geradores de impactos ambientais, facilitando a tomada de decisões para diminuir o impacto do projeto. Sem essa visão global é possível que medidas sejam adotadas de forma a alterar somente o tipo de impacto que é causado, ou então apenas reposicioná-lo dentro do ciclo (ASADOLLAHFARDI; ASADI; KARIMI, 2015; BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013; CURRAN, 2013; RASHID; YUSOFF, 2015).

A educação constitui elemento essencial para o desenvolvimento humano, compreendendo as relações sociais, políticas, históricas e culturais dos indivíduos (SANTA CATARINA, 2015). O direito à educação é um direito humano reconhecido em uma série de convenções internacionais, como a Declaração Universal dos Direitos. Para garantir o acesso à educação, a construção de sistemas de ensino público é responsabilidade do Estado (BRASIL, 1996).

O país tem cerca de 141 mil escolas da rede pública. Dessas, 12% não têm banheiro no prédio; 33% não têm internet; 31% não têm abastecimento de água potável; 58% não têm coleta e tratamento de esgoto; 68% não têm bibliotecas; e 67% não possuem quadra de esportes (INEP, 2018). Trevisan et al. (2003) concluíram que a qualidade das construções de instituições de ensino é afetada, por serem obras públicas, pelo desvio de recursos públicos e pela busca pela redução dos prazos de entrega.

O Plano Municipal de Educação de Florianópolis prevê “a construção, ampliação e reforma de estabelecimentos de ensino, adequando-os ao padrão de qualidade de infraestrutura sustentável, tornando-os edificações e espaços exemplares de sustentabilidade socioambiental” como uma meta. O Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) é o órgão responsável pela execução de políticas educacionais do Ministério da Educação. Ele presta assistência técnica e financeira e desenvolve ações que contribuam para uma educação de qualidade a todos, especialmente para a educação básica da rede pública (BRASIL, 2023).

O *Collaborative for High Performance Schools* (CHPS) (2006, v.1) qualifica uma escola de alto desempenho como aquela que emprega as melhores estratégias de projeto e tecnologias construtivas da atualidade, a fim de oferecer ambientes saudáveis e confortáveis; conservar energia, recursos e água; funcionar como uma

ferramenta de ensino; oferecer espaços e serviços à comunidade; assegurar fácil operação e manutenção; criar uma atmosfera educacional segura e protegida.

Considerando o elevado número de escolas da rede pública espalhadas pelo país, a melhoria dos projetos por meio da adoção de técnicas de eficiência energética apresenta grande potencial para redução no consumo de energia total das instituições.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é identificar o conjunto de componentes construtivos de parede, esquadrias e cobertura com menor impacto ambiental para uso em instituições públicas de ensino na região de Florianópolis.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho estão listados a seguir:

- Determinar o consumo energético anual de operação e o total de horas de desconforto térmico de instituições públicas de ensino por meio de simulação computacional;
- Analisar a influência do consumo energético de operação da edificação no ciclo de vida, considerando seu primeiro ano de consumo e sua vida útil;
- Identificar as tendências de impacto ambiental entre os componentes construtivos verificados ao longo do ciclo de vida.

## **1.2. Estrutura do trabalho**

O trabalho é composto por cinco capítulos. No primeiro, a introdução apresenta brevemente a situação do setor da construção civil quanto ao consumo de recursos como água e energia elétrica, e enfatiza a importância de estudos relacionados ao desenvolvimento sustentável de instituições públicas de ensino, visando diminuir seu

impacto ambiental. Adicionalmente, uma pequena contextualização a respeito do tema da avaliação do ciclo de vida é descrita com a finalidade de introduzir o tema abordado, seguida dos objetivos do trabalho.

No capítulo 2, a revisão bibliográfica é construída de forma a abranger os assuntos necessários para o desenvolvimento do trabalho. São apresentadas informações sobre o histórico das instituições de ensino no Brasil, com foco para a cidade de Florianópolis, sobre a avaliação de ciclo de vida no setor da construção civil e a simulação computacional de edificações. Além disso, os programas utilizados no desenvolvimento do trabalho são apresentados e a seção encerra com as considerações finais sobre os assuntos abordados.

No capítulo 3 é descrito o método utilizado para atingir os objetivos definidos. Para simplificar o entendimento do passo a passo utilizado, um fluxograma é apresentado com a síntese do método.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos por meio das análises desenvolvidas. Primeiramente, os resultados da simulação computacional são analisados, focando nos dados de desempenho térmico e consumo energético. Em seguida, estes valores são aplicados na realização da análise do ciclo de vida da edificação estudada, conforme o método apresentado no capítulo 3.

Por fim, no capítulo 5, são expostas as conclusões, limitações existentes no estudo e sugestões para trabalhos futuros.

## **2. Revisão bibliográfica**

A revisão bibliográfica desenvolvida neste trabalho engloba três temas principais: Instituições públicas de ensino no Brasil, avaliação do ciclo de vida e a simulação computacional de edificações. Cada um deles foi caracterizado, além de ser apresentada uma revisão de trabalhos desenvolvidos na área e seus respectivos resultados, focando na redução dos impactos ambientais causados.

### **2.1. Instituições públicas de ensino no Brasil**

#### **2.1.1. Contexto histórico**

Atualmente, não existe nação no mundo que não garanta, em seus textos legais, o acesso de seus cidadãos à educação básica, sendo a educação escolar uma dimensão edificadora da cidadania. Tal princípio é indispensável para políticas que visam à participação de todos nos espaços sociais e políticos e para a reinserção no mundo profissional (CURY, 2002).

São inúmeros os documentos de caráter internacional, assinados por países da Organização das Nações Unidas (ONU), que reconhecem e garantem esse acesso a seus cidadãos. A Declaração Universal dos Direitos Humanos (DUDH) é, potencialmente, o mais memorável deles, sendo considerado um documento marco na história dos direitos humanos. O artigo XXVI da DUDH formaliza a obrigatoriedade de uma educação primária gratuita para todos (ONU, 1948).

A história da educação no Brasil se inicia na década de 30, época em que a organização e implantação de um sistema escolar público no país tornou-se condição fundamental para o seu desenvolvimento socioeconômico. A consolidação da escola pública e as políticas educacionais se deram graças à criação do Ministério da Educação e Saúde Pública, logo após a ascensão de Getúlio Vargas. O ministro Francisco Campos implantou a Reforma de 1931, precedida por um pedido de Vargas para que fornecessem ao governo “o sentido pedagógico da revolução” (BITTAR; BITTAR, 2012).

No início dos anos 1960, após anos de conflitos ideológicos e de lutas pela educação pública brasileira, foi aprovada a primeira Lei de Diretrizes e Bases da Educação (Lei n. 4.024, de 1961), que incorporou os princípios do direito à educação,

da obrigatoriedade escolar e da extensão da escolaridade obrigatória (ROMANELLI, 1986, p. 176).

Mesmo com o desenvolvimento de leis e projetos relacionados ao ensino, o Brasil chegou à década de 60 com uma taxa de quase 40% de analfabetismo entre seu povo, o que evidencia a ineficiência das políticas adotadas até então. Os números expressam que pouco havia mudado desde a Era Vargas: em 1940, a taxa de analfabetismo no Brasil era de 56,0%; em 1950, era de 50,5% e, em 1960, 39,35% (RIBEIRO, 1986).

Diante desta alta taxa de analfabetismo em evidência, na década de 60 teve início a experiência de educação popular, dentre as quais se destacou o método de alfabetização de adultos de Paulo Freire. Freire preconizava que, ao enorme contingente que nunca pisou o chão de uma escola, não bastaria apenas alfabetizar com métodos convencionais. Seu método de atuação foi interrompido com o advento da ditadura militar, em 1964 (BITTAR; BITTAR, 2012).

A política educacional do regime militar, instituída em 1964, por meio de um golpe de Estado, provocou mudanças estruturais na história da educação brasileira. Foi evidenciada uma expansão da escola pública porque na lógica que presidia o regime era necessário um mínimo de escolaridade para que o país ingressasse na fase do “Brasil potência”; sem escolas isto não seria possível. Entretanto, a expansão quantitativa não veio aliada a uma escola cujo padrão intelectual fosse aceitável. Pelo contrário: a expansão se fez acompanhada pelo rebaixamento da qualidade de ensino (BITTAR; BITTAR, 2012).

Terminada a ditadura militar, os governos que se seguiram não cumpriram a função de garantir condições propícias para o aprendizado dos alunos. Conclui-se que foi mais fácil expandir o sistema do que fazê-lo cumprir sua função de promover aprendizagem às crianças e aos jovens brasileiros. No século XXI, é possível afirmar que o Brasil tem escolas, mas o problema é que elas são precárias (BITTAR; BITTAR, 2012).

Apesar de a Educação no Brasil ter passado por incontáveis mudanças nas últimas décadas (gestão das escolas, distribuição de competências entre os entes federativos e marcos regulatórios), persistem problemas como mau uso dos recursos públicos e desigualdades educacionais entre escolas (ALVES, 2008).

### **2.1.2. Infraestrutura escolar**

Os princípios basilares da política educacional brasileira, preconizados na Constituição de 1988 e na Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (BRASIL, 1998, 2014) realçam a necessidade de uma ação pública, operacionalizada por meio de estratégias que assegurem aos estudantes não apenas o ingresso e a permanência nas escolas, mas o usufruto de ambientes escolares com condições mínimas de funcionamento. Nessa busca, o Plano Nacional da Educação (PNE) para o decênio 2014-2024 apresenta metas para o país atingir uma Educação com qualidade e mais equitativa (BRASIL, 2014).

Garcia (2014) entende a infraestrutura escolar como “as instalações, equipamentos e serviços necessários para garantir o funcionamento da escola e auxiliar na aprendizagem do aluno”. Esse conceito explica o porquê da infraestrutura escolar ser um dos aspectos da Educação brasileira que vem chamando a atenção há anos, sendo frequentemente associada ao desempenho escolar.

Castro e Fletcher (1986) analisaram as condições materiais das escolas brasileiras para retratar a situação da rede física escolar, a disponibilidade de equipamentos necessários à atividade pedagógica e o funcionamento da escola. Destacaram a questão da eficiência e da eficácia dos gastos públicos com Educação e constataram a relevância da infraestrutura das escolas para o aprendizado dos alunos. Não se pode esperar do município uma boa atuação na melhoria da infraestrutura escolar e, conseqüentemente, do desempenho dos alunos, se não houver alocação eficiente de recursos (VASCONCELOS, 2021).

A qualidade da infraestrutura relaciona-se com a sua função social, com vistas à expansão da cidadania. Portanto, incide sobre a disponibilidade de espaços e recursos que respeitem a dignidade humana e potencializem experiências, vivências e interações entre os sujeitos e entre estes e os ambientes educativos. Sob tal pressuposto, além de espaços administrativos e infraestrutura básica, espaços para atividades pedagógicas como bibliotecas, laboratórios de ciências e de informática, quadras esportivas, pátios e parques infantis apresentam-se como condição à qualidade do processo de aprendizagem na medida em que extrapolam o ambiente de sala de aula e ampliam as possibilidades de desenvolvimento integral dos alunos, em suas dimensões intelectual, corpórea, social e afetiva (SILVA, 2011).

Em Florianópolis, construir, ampliar e reformar os estabelecimentos de ensino, adequando-os ao padrão de qualidade de infraestrutura sustentável, conforme legislação vigente, tornando-os edificações e espaços exemplares de sustentabilidade socioambiental constituem uma meta do Plano Municipal de Educação.

Entende-se que o projeto do edifício escolar deva, necessariamente, assegurar relação harmoniosa com o seu entorno e a integração ao clima; conforto ambiental dos seus usuários; análise de impactos e efeitos climáticos; qualidade sanitária dos ambientes; emprego adequado de técnicas e de materiais de construção com enfoque na sustentabilidade; planejamento do canteiro-de-obras, para atenuar os efeitos da poluição; redução do impacto ambiental causado por fluxos de produtos e serviços; consumo de energia, ruído, dejetos; programação de reparos e manutenção ao longo da vida do ambiente construído; adequação dos espaços interno e externo ao arranjo espacial, volumetria, materiais, cores e texturas (GAE, 2004).

Conforme manual de orientações técnicas de elaboração de projetos de edificações escolares para educação infantil, o prédio destinado a estabelecimentos de ensino deve dispor de ambientes de aprendizagem, ambientes administrativos, ambientes de higiene, ambientes de alimentação, ambientes de serviços, ambientes externos de atividades e áreas de circulação.

#### **2.1.2.1. Diretrizes gerais de construção**

No estado de Santa Catarina, o Decreto nº 30.436, de 30 de setembro de 1986, dispõe sobre estabelecimentos de ensino e estabelece as diretrizes de construção.

O artigo 20º define que as edificações destinadas a estabelecimentos escolares de qualquer natureza, deverão dispor de salas destinadas às aulas que comportarão no máximo 40 alunos, correspondendo a cada aluno área não inferior a 1,30 m<sup>2</sup>, excluídos os corredores, áreas de circulação interna e áreas destinadas a professores e equipamentos didáticos.

O artigo 23º define que o pé direito mínimo das salas de aula em geral nunca poderá ser inferior a 3,00 metros, com o mínimo, em qualquer ponto, de 2,50 metros, incluindo vigas ou luminárias, devendo ser aumentado sempre que as condições de iluminação natural assim o exigirem.

O artigo 24º define que a iluminação das salas de aula em geral será sempre natural, predominando a unilateral esquerda, não se dispensando a iluminação artificial para as condições climatológicas peculiares e para aulas noturnas.

#### **2.1.2.2. Padrão de ocupação**

A Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviço e Públicas (INI-C) apresenta as condições de referência conforme diferentes tipologias de edificações comerciais. As edificações educacionais são categorizadas como ensino médio, fundamental e superior.

A Tabela 16 do ANEXO B, adaptada das definições da INI-C, apresenta os resultados obtidos para as rotinas de ocupação, a densidade de potência de iluminação e equipamentos, percentual de área de abertura, entre outros fatores relevantes.

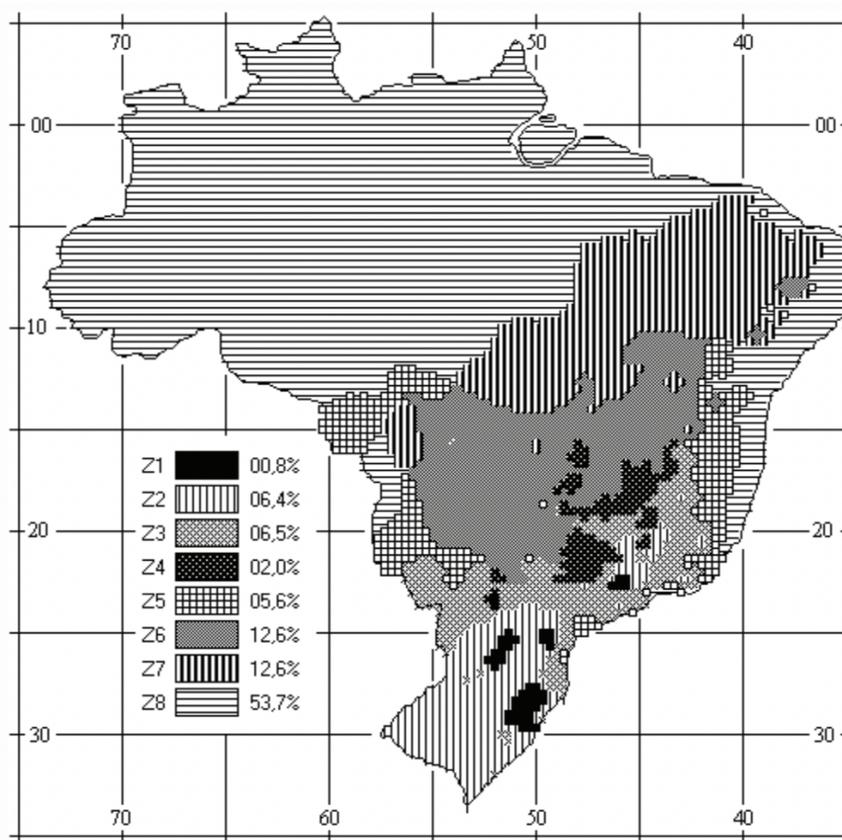
#### **2.1.2.3. Desempenho térmico**

O manual de orientações técnicas de elaboração de projetos de edificações escolares para educação infantil estabelece critérios de desempenho térmico e lumínico a serem atendidos (BRASIL, 2017).

O FNDE define que a edificação escolar deve reunir características que atendam às exigências de desempenho térmico, considerando-se as zonas bioclimáticas definidas na ABNT NBR 15220- 3.

Florianópolis localiza-se entre os paralelos de 27°10' e 27°50' de latitude sul e entre os meridianos de 48°25' e 48°35' de longitude oeste, estando compreendida na zona bioclimática 3, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Zoneamento bioclimático brasileiro



Fonte: ABNT (2005).

Na zona bioclimática 3, as diretrizes de projeto a serem atendidas são: aberturas médias para ventilação, permissão de sol durante o inverno, vedação externa tipo leve refletora em paredes e leve isolada em coberturas; estratégias de condicionamento térmico passivo do tipo ventilação cruzada no verão e aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas para o inverno (ABNT, 2005).

A análise de desempenho deve ser realizada considerando a resposta de desempenho global da edificação e não exclusivamente o comportamento térmico de elementos de vedação tratados isoladamente. No Brasil, predomina a busca de desempenho no verão, sem o uso de sistemas de condicionamento térmico e considerando-se variações de temperatura significativamente elevadas (BRASIL, 2017).

Ressalta-se que para a avaliação de edificações escolares assume-se o nível de desempenho intermediário (I), para as condições de verão; e, mínimo (M) para as condições de inverno constantes da ABNT NBR 15575-1, pautado nas exigências do

usuário e na natureza das atividades desenvolvidas, em especial para as salas de aula (creches, pré-escola e multiuso) (BRASIL, 2017).

A orientação das edificações determina a incidência de radiação que penetra em ambientes pedagógicos. Segundo Azevedo (1995), o edifício deverá ser implantado preferencialmente a longo do eixo leste-oeste, com as fachadas de maiores dimensões ortogonais à direção norte-sul, a fim de reduzir a exposição ao sol. No caso de solução pavilhonar, esta orientação é conveniente, com a localização das salas de aula nos planos sul ou norte, desde que associados à proteção horizontal.

## **2.2. Avaliação do ciclo de vida**

Buyle, Braet e Audenaert (2013) afirmam que os primeiros estudos de impacto ambiental de bens de consumo, focados na sua avaliação ou comparação, foram desenvolvidos entre as décadas de 1960 e 1970. Em 1980, surge o pensamento do ciclo de vida no setor da construção, através dos estudos de Bekker (1982), focado no uso de recursos renováveis. Estas análises iniciais adotavam métodos, abordagens, terminologias e resultados divergentes, devido à falta de discussões científicas sobre o assunto. O método era habitualmente utilizado em virtude dos interesses do mercado, o que impediu que a ACV se tornasse aceita como ferramenta analítica.

Os anos 1990 trouxeram os procedimentos de padronização, com a organização de *workshops* e a publicação de vários manuais e artigos científicos. A partir desta década, o envolvimento de instituições passou a atrair profissionais interessados na aplicação do método. Eles harmonizaram a estrutura, a metodologia e a terminologia das análises realizadas. Dentre os principais documentos elaborados, destacam-se a NBR ISO 14040 - Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura e o Manual do *International Reference Life Cycle Data System* (ILCD), desenvolvido pela Comissão Europeia de Produção e Consumo Sustentável e Plano de Ação Sustentável em Política Industrial (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013; RASHID; YUSOFF, 2015; VAN OOTEGHEM; XU, 2012).

O que começou como uma abordagem para comparar a “bondade” ambiental dos produtos se desenvolveu em um método padronizado para fornecer uma base científica sólida para a sustentabilidade ambiental na indústria e no governo. A

avaliação do ciclo de vida é, atualmente, considerada uma técnica de gestão ambiental, e, de modo geral, não leva em consideração aspectos econômicos ou sociais. A ACV permite o desenvolvimento da análise global sobre um produto ou serviço, expondo os pontos de maior e menor impacto ambiental. Com isso, é possível criar soluções que apresentem resultados positivos, evitando a transferência do problema de um local para outro. Conhecer a forma como a ACV se encaixa dentro de cada análise também é importante, pois os resultados obtidos podem ser diferentes para um mesmo produto conforme a abordagem adotada (ABNT, 2014; CURRAN, 2013).

Apesar de sua análise considerar todo o ciclo de vida do produto ou serviço, a ACV não tem como finalidade prever impactos ambientais de forma precisa ou absoluta, uma vez que sua metodologia depende da unidade de referência adotada (ABNT, 2014). Em muitos casos a ACV não determina um resultado claro quando utilizada para comparar produtos ou serviços. As incertezas ao longo do caminho podem fazer com que a fase final da avaliação apresente resultados inconclusivos. Conhecer cada parte do processo e a origem dos dados utilizados auxilia na tomada de decisão no final do processo (CURRAN, 2013).

### **2.2.1. Normativas da avaliação do ciclo de vida**

A NBR ISO 14040 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura define que um estudo de avaliação do ciclo de vida é composto por quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação.

Na primeira fase são definidos o nível de detalhamento e os limites da análise, que variam significativamente conforme o objetivo principal do estudo. Na fase de análise de inventário são levantados os dados conforme os limites definidos anteriormente. Na fase de avaliação de impactos, as informações obtidas na segunda fase são complementadas de forma a facilitar sua interpretação. Na última fase, os resultados são avaliados e as conclusões definidas, conforme o objetivo principal definido na primeira fase.

Para alguns casos, é possível eliminar a fase de avaliação de impactos. Quando isso ocorre, o estudo desenvolvido é chamado de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e não mais de avaliação do ciclo de vida. A técnica aplicada na ACV é

considerada iterativa, ou seja, cada fase analisada necessita das informações obtidas nas fases precedentes para garantir a veracidade das conclusões e medidas adotadas (ABNT, 2014).

O objetivo de uma ACV deve contemplar a aplicação pretendida, as razões do estudo, o público-alvo e se os resultados serão utilizados de forma comparativa e divulgados publicamente. O escopo apresenta o sistema de produto a ser estudado, as funções do sistema de produto, a unidade funcional, a fronteira do sistema, procedimentos de alocação, as categorias de impacto e metodologia para a avaliação de impactos, requisitos de dados, pressupostos, limitações, requisitos iniciais quanto à qualidade dos dados, tipo de análise crítica, se aplicável, e tipo e formato do relatório requerido para o estudo (ABNT, 2014).

A unidade funcional é utilizada como referência da qual as entradas e saídas são relacionadas. Sua definição torna possível a determinação da quantidade de produtos necessários para conseguir desempenhar a função pretendida. A fronteira do sistema irá influenciar no grau de confiança dos resultados obtidos, uma vez que é através dela que são definidos quais processos elementares serão incluídos no estudo desenvolvido (ABNT, 2014).

A análise de inventário do ciclo de vida envolve a coleta de dados e a quantificação das entradas e saídas do sistema definido. A coleta de dados pode incluir, de forma geral, entradas de energia, matéria-prima, entradas auxiliares, outras entradas físicas, produtos, coprodutos e resíduos, emissões atmosféricas, descargas para a água e solo e outros aspectos ambientais. O processo de coleta de dados pode apresentar restrições práticas que devem ser expostas no relatório da análise desenvolvida. Em seguida, o cálculo de validação dos mesmos é feito através da correlação dos dados com os processos elementares e também com os fluxos de referência e à unidade funcional (ABNT, 2014).

Apesar de a ACV ser um método notável para orientar a tomada de decisões em um projeto focando na redução de impactos ambientais, os resultados encontrados com a aplicação desse método devem ser interpretados e utilizados de forma criteriosa, devido a algumas de suas limitações. Dentre elas destaca-se a determinação do tempo de vida útil, o clima, regulamentações locais, a falta de padronização do método, a variação da energia embutida de materiais e requisitos de conforto utilizados (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013; VAN OOTEGHEM; XU, 2012). A ACV representa uma simplificação da realidade, apresentando aproximações

e incertezas. Além das dificuldades de antecipação do comportamento dos usuários, a ACV não leva em conta questões estéticas, de qualidade ou estruturais, e poucos estudos são realizados considerando questões econômicas e ambientais simultaneamente (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013).

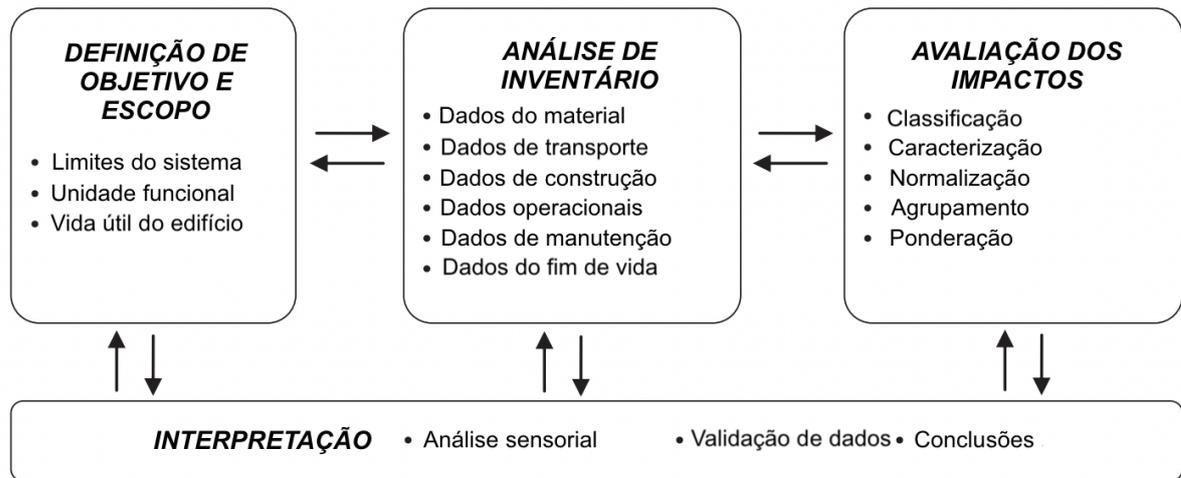
### **2.2.2. Avaliação do ciclo de vida para o setor da construção civil**

Na indústria tradicional, os métodos de análise de ciclo de vida já estão amplamente difundidos e são frequentemente usados para avaliar o impacto ambiental de processos e produtos. Edificações, no entanto, são consideradas produtos especiais que diferem da maioria dos usuais processos controlados (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013). Edifícios são de difícil avaliação devido ao seu grande porte, adoção de materiais diversos e métodos de produção inconsistentes, considerando que cada construção tem características únicas. Adicionalmente, dados quantitativos a respeito dos impactos ambientais da produção de materiais de construção ou do próprio processo construtivo são limitados (RASHID; YUSOFF, 2015).

No campo da construção civil, a adoção de práticas de avaliação de ciclo de vida se intensificou a partir do século XXI. As primeiras análises desenvolvidas foram aplicadas majoritariamente em casas e edifícios residenciais e prédios comerciais. No setor, a ACV abrange tradicionalmente três aspectos principais: os materiais adotados, o processo construtivo e a fase de operação das edificações (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013; RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010; RASHID; YUSOFF, 2015; VAN OOTEGHEM; XU, 2012).

A Figura 2 apresenta uma estrutura de representação de um método para aplicação da ACV no setor da construção civil, desenvolvida por Rashid e Yusoff (2015).

Figura 2 – Proposta de método para avaliação do ciclo de vida

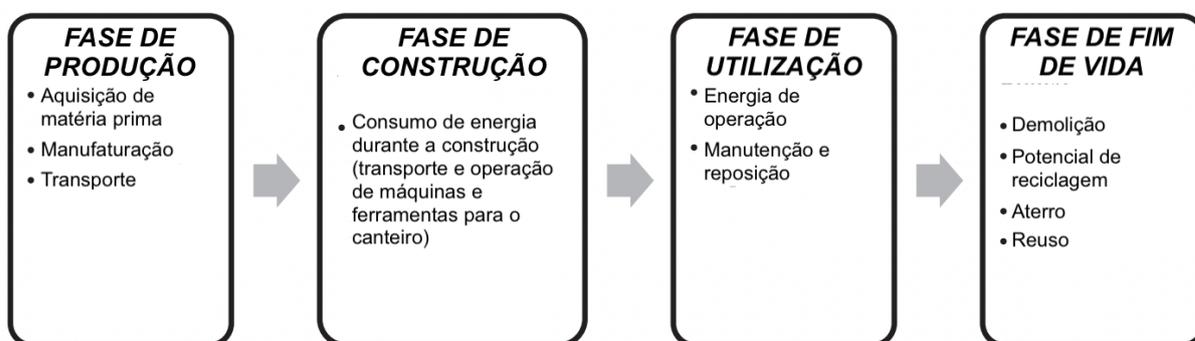


Fonte: Baseado em Rashid e Yusoff (2015).

As fronteiras do sistema para o setor da construção são definidas de três diferentes formas, de acordo com o objetivo da análise: avaliação dos produtos da construção, denominada “berço ao portão”; análise do processo construtivo, denominada “portão a portão”; e análise de todas as fases da edificação, denominada “berço ao túmulo” (RASHID; YUSOFF, 2015). A metodologia do berço ao túmulo possibilita o enfoque dos aspectos ambientais e os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição (ABNT, 2014).

A expansão das fronteiras adotadas em uma ACV apresenta aspectos positivos e negativos, além de alterar completamente o resultado final da análise. Limites mais amplos possibilitam a abordagem de um maior número de processos, muitas vezes necessários para o desenvolvimento do produto, porém a quantidade de informações aumenta exponencialmente. Assim, a probabilidade de erros nos dados aumenta, além de implicar em certas limitações econômicas e temporais que podem comprometer a viabilidade de aplicação do método. Por outro lado, ignorar certos processos pode acarretar em resultados que não representam a realidade. Conclui-se que saber definir as fronteiras da ACV é imprescindível (ASADOLLAHFARDI; ASADI; KARIMI, 2015; CURRAN, 2013). A Figura 3 apresenta os principais pontos considerados para cada fase da metodologia “berço ao túmulo” quando aplicada à construção civil.

Figura 3 – Esquema da metodologia “do berço ao túmulo” para o setor da construção civil



Fonte: Baseado em Rashid e Yusoff (2015).

A definição do tempo de vida útil da edificação para o desenvolvimento de uma ACV é de suma importância para que se considere o consumo de energia total ao longo da operação da edificação e para viabilizar a comparação de diferentes análises. A vida-útil de edifícios comerciais é estimada entre 40 e 75 anos, enquanto para edificações residenciais é de 50 anos; assim, assume-se como valor padrão uma vida útil de 50 anos (RASHID; YUSOFF, 2015).

Os dados de materiais são definidos a partir do levantamento dos quantitativos dos projetos, podendo ser levantados por estimativa ou não. Os valores finais dos quantitativos levantados pelos dois métodos podem ser muito distintos, principalmente nos projetos complementares. Destaca-se a importância de uma definição precisa da quantidade e os tipos de materiais utilizados ao longo da construção da edificação em análise (RASHID; YUSOFF, 2015). Para que o levantamento se assemelhe ao valor real é necessário que se desenvolva um projeto completo, com o detalhamento de todos os materiais utilizados (AVILA; LIBRELOTTO; LOPES, 2003). O nível de precisão requisitado pode ser obtido através da utilização de programas em modelagem 3D e da aplicação de conceitos de *Building Information Mobiling* (BIM) (SANTOS; ANTUNES; BALBINOT, 2014).

A definição dos dados de transporte não é feita através de um método padrão. Assim, torna-se possível utilizar as distâncias médias das fábricas até o canteiro de obras em análise, ou selecionar o fornecedor disponível mais próximo (RASHID; YUSOFF, 2015).

Trabalhos previamente publicados na área revelam que a fase de construção, representada pela mão de obra necessária para a execução de serviços, simboliza

uma pequena parcela do impacto ambiental total quando realizada a ACV do berço ao túmulo (RASHID; YUSOFF, 2015; VAN OOTEGHEM; XU, 2012). Isso acarreta em sua desconsideração por parte de muitos pesquisadores, que levam em conta somente os resíduos gerados nela. A fase de operação considera a energia necessária para seu uso e os processos relacionados à manutenção e à reposição necessárias durante a vida útil da edificação. Verifica-se que a energia elétrica é o principal recurso utilizado, seguido pelo gás natural. Para estimar o consumo total de energia, é necessário que se desenvolva uma simulação energética da edificação. Esta é realizada através de programas computacionais, como *EnergyPlus*, *Edilclima* e *COMFIE CHENATH*. No fim da vida útil, os dados considerados englobam a energia consumida pelas máquinas de demolição e o transporte até o destino final dos materiais, seja aterro ou reciclagem (RASHID; YUSOFF, 2015).

A existência de um banco de dados nas ferramentas de avaliação facilita o desenvolvimento da ACV, mas seu uso deve ser feito com cautela. O pesquisador deve conhecer a origem dos dados, tendo em vista que os produtos podem apresentar diferenças no processo de fabricação, no método construtivo, nas fontes de energia, e em outras informações consideradas (ASADOLLAHFARDI; ASADI; KARIMI, 2015; RASHID; YUSOFF, 2015).

Durante a análise, os tipos de impactos a serem avaliados são definidos pelo próprio pesquisador. As categorias de impacto ambiental mais analisadas são o Potencial de Aquecimento Global (PAG), a Acidificação, a Depleção de Ozônio e a Eutrofização (RASHID; YUSOFF, 2015).

Avaliando-se os impactos ambientais em cada fase da metodologia do berço ao túmulo, Rashid e Yusoff (2015) afirmam que a fase mais significativa é a de operação, devido ao seu longo período de duração quando comparado às outras fases. Para edificações localizadas em regiões com predominância de baixas temperaturas, o aquecimento é o maior consumidor de energia. De acordo com o clima considerado, essa informação pode variar. Em locais com temperaturas elevadas, a eletricidade é utilizada para atingir o conforto térmico. Como consequência, a comparação de edificações em diferentes climas apresenta valores diversos. Indica-se que os estudos para diferentes climas sejam feitos separadamente (RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010). A escolha dos materiais dos componentes construtivos influencia em todas as fases do ciclo de vida, apresentando variações na energia

incorporada na produção, no consumo final da fase de operação e no potencial de reutilização e reciclagem.

Devido às especificidades de cada projeto, cada método de avaliação aplicado é único. A padronização de um método voltado especificamente para o setor da construção civil e a criação de um banco de dados robusto e confiável são necessárias para facilitar a utilização da ACV no setor. Assim, finalmente será possível comparar resultados obtidos em diferentes análises (RASHID; YUSOFF, 2015; VAN OOTEGHEM; XU, 2012).

Medeiros, Durante e Callejas (2018) realizaram a avaliação do ciclo de vida de uma edificação de ensino localizada na região Centro-Oeste do Brasil. Considerou-se a abordagem de berço ao portão para uma unidade funcional de 1,0 m<sup>2</sup> de área construída. O inventário do ciclo de vida foi elaborado a partir da base de dados Ecoinvent 2.0, adotando-se o *World ReCiPe midpoint H* como método de avaliação do impacto do ciclo de vida. Utilizou-se o software SimaPro 8.0 para modelagem.

A análise foi desenvolvida com o objetivo de identificar a contribuição dos sistemas construtivos de fundação e superestrutura, ambos em concreto armado, vedações compostas por tijolos cerâmicos e argamassas, cobertura com telhas termoacústicas, esquadrias em alumínio e revestimentos cerâmicos nas categorias de impacto ambiental. Constatou-se que os sistemas de superestrutura, cobertura e vedações foram os mais contributivos durante o ciclo de vida (MEDEIROS, DURANTE; CALLEJAS, 2018).

### **2.2.3. OpenLCA**

O *software* OpenLCA foi criado em 2006 pelo Greendelta, que o executa e gerencia desde então. O programa foi desenvolvido com o objetivo de criar uma rede colaborativa para a elaboração rápida e eficiente de avaliações do ciclo de vida. O OpenLCA pode ser utilizado para análises de ciclo de vida, custo ou impactos sociais, para calcular as pegadas de carbono e água, para escrever Declarações Ambientais de Produtos (DAP), entre outras aplicações. Ele é disponibilizado de forma gratuita e permite ao usuário a manipulação de diferentes módulos e *plug-ins* no seu código fonte para melhor se adequar ao modelo desejado (NOI; CIROTH; SROCKA, 2017).

Apesar de oferecer maior flexibilidade e facilidade de utilização para os usuários, a possibilidade de adicionar ou modificar módulos faz com que cada projeto

demande dados precisos e corretos para evitar a ocorrência de resultados inconsistentes ou falhos (CIROTH, 2007). O OpenLCA permite a importação de bancos de dados disponibilizados no *OpenLCA nexus*, um repositório online de dados de ICV. Nele encontram-se dados oferecidos pelo *world-leading LCA, ecoinvent centre, PE Internacional e ELCD (Joint Research Centre from the European Commission)*.

Em suas versões mais recentes, testes comparando os resultados do OpenLCA com outros *softwares* de ACV foram desenvolvidos a fim de comprovar a eficiência do algoritmo utilizado. Os resultados obtidos apresentaram valores idênticos para quase todos os fluxos considerados, demonstrando que o OpenLCA apresenta funcionamento similar ao dos programas SimaPro e o sistema de processamento ecoinvent (NOI; CIROTH; SROCKA, 2017).

#### **2.2.4. SimaPro**

Desenvolvido pela *PRÉ Sustainability* em 1993, o *software* SimaPro permite que o usuário visualize todos os processos inclusos no desenvolvimento de uma ACV. Dessa forma torna-se possível tomar decisões coerentes com os objetivos e limitações do estudo, garantindo a precisão dos dados obtidos. O programa tem ampla aplicabilidade, apresentando relatórios de sustentabilidade, pegada de carbono e hídrica, desenvolvimento de produtos, geração de declarações ambientais e determinação de indicadores chave de desempenho (PRÉ SUSTAINABILITY, 2023).

O SimaPro apresenta doze opções de bancos de dados e 28 métodos de avaliação de impacto ambiental. Além da rápida visualização dos resultados, ele permite com que múltiplos usuários desenvolvam uma mesma análise simultaneamente, possibilitando que usuários de diferentes localidades trabalhem sobre uma mesma análise (PRÉ SUSTAINABILITY, 2023).

Herrmann e Moltesen (2015) compararam análises unitárias desenvolvidas nos *softwares* SimaPro e GaBi, os dois *softwares* mais utilizados no mundo para desenvolvimento de ACVs. Dentre todas as análises desenvolvidas, a maioria apresentou resultados idênticos ou muito próximos. No entanto, em algumas, os valores foram tão distintos que alteraram o resultado final da análise. Essas diferenças foram originadas majoritariamente por erros presentes nos bancos de dados entre os programas. Com isso, torna-se fundamental que as ferramentas de avaliação do ciclo

de vida sejam desenvolvidas com sistemas de validação padrão, evitando erros e diferenças indesejadas (HERRMANN; MOLTESEN, 2015)

### **2.3. Simulação computacional de edificações**

A simulação computacional de edificações passou a ser desenvolvida na década de 1970. Ela contribui na tomada de decisões para a construção de ambientes que atendam os requisitos mínimos de desempenho com menor consumo de recursos. A simulação pode influenciar características de projeto, engenharia, operação e gerenciamento das edificações analisadas (WANG; ZHAI, 2016; HARISH; KUMAR, 2016).

A padronização das características avaliadas e sua proximidade com a realidade são aspectos fundamentais para a simulação. Essas informações têm sido cada vez mais consolidadas pelo desenvolvimento de normas e códigos que trazem requisitos de desempenho (WANG; ZHAI, 2016; HARISH; KUMAR, 2016). A certificação LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) e a ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) 90.1 apresentam características semelhantes para a avaliação do desempenho energético de edificações, sendo classificadas como documentos base para a definição de requisitos para a simulação (WANG; ZHAI, 2016). O Quadro 1 apresenta os principais parâmetros considerados no desenvolvimento de uma modelagem para simulação computacional.

Quadro 1 – Principais parâmetros considerados na modelagem da edificação para simulação

Parâmetro	Descrição	Natureza	Aplicação
Radiação solar	A radiação solar incidente é a principal carga térmica no exterior do envelope do edifício.	Incontrolável	R/NR
Temperatura do ar externo	A temperatura do ar externo que, na ausência de todas as mudanças de radiação, fornece a mesma taxa de entrada de calor na superfície.	Incontrolável	NR/R
Temperatura do ar interno	Variações internas de temperatura dependem do propósito e ocupação do edifício.	Controlável	R/NR
Propriedades termofísicas dos materiais construtivos	Espessura.	Incontrolável	R/NR
Características do vento e precipitação	Velocidade do vento, direção do vento e rugosidade do terreno.	Incontrolável	NR
Ganhos internos de calor	Ganhos de calor interno de pessoas, iluminação, motores, eletrodomésticos e equipamentos podem contribuir com a maior parte da carga de resfriamento em um prédio moderno.	Controlável	NR
Condições do céu ou nuvens	Sombreamento, nebulosidade das condições meteorológicas ao ar livre.	Incontrolável	NR/R
Taxa de ventilação	Taxa de fluxo devido à introdução intencional de ar do exterior em um edifício.	Controlável	NR
Localização da edificação (informação global)	Informações sobre latitude, longitude, fuso horário, mês, dia do mês, orientação direcional da zona e altura da zona (andar a andar).	Incontrolável	NR/R

R: edificações residenciais; NR: edificações não-residenciais (comerciais e industriais).

Fonte: Baseado em Harish e Kumar (2016).

A modelagem da edificação pode ser desenvolvida experimental ou teoricamente. O modelo teórico reparte um sistema complexo em partes menores e mais simples, enquanto o modelo experimental se dá a partir do conhecimento das variáveis de entrada e medição dos valores de saída. O modelo desenvolvido pode ser dividido em zonas de funcionamento independente, com suas próprias características de carga interna e externa. Como consequência, e considerando a orientação da edificação, pode ser necessário resfriar uma zona e aquecer outra simultaneamente. Assim, cada zona deve ser tratada de maneira independente conforme seus picos de consumo energético (HARISH; KUMAR, 2016).

Para desenvolver-se uma modelagem teórica antecipada estima-se os valores de saída através da inserção de parâmetros e dados de uso. Esse tipo de análise garante economia de tempo e dinheiro, pois o modelo não precisa ser construído fisicamente para que se obtenha o comportamento da edificação (HARISH; KUMAR, 2016). O procedimento mais utilizado por pesquisadores no setor é descrito a seguir:

- Passo 1: Determinação dos dados climáticos da localização do objeto de estudo;
- Passo 2: Dados construtivos (localização, orientação, propriedades dos materiais de construção, entre outros);
- Passo 3: Características do sistema HVAC (*heating, ventilation and air-conditioning*);
- Passo 4: Padrão de ocupação da edificação;
- Passo 5: Simulação conforme o período desejado;
- Passo 6: Previsão do padrão de consumo de energia.

A definição do programa a ser utilizado para realizar-se a simulação computacional depende da sua aplicação, do número de vezes que será utilizado, do *hardware* disponível para executá-lo e da experiência do usuário. O *software* de simulação *EnergyPlus* segue o padrão de modelagem teórica antecipada.

### **2.3.1. Sistemas de controle**

Adicionar ou remover energia dos ambientes da edificação é necessário para que as condições térmicas no seu interior sejam mantidas. A energia existente no interior de cada cômodo depende das condições externas, influenciadas pelas propriedades do clima local, como a temperatura do ar, o vento e a umidade, assim como das características internas, como a ventilação, o fluxo de calor entre paredes divisórias e a ocupação (HARISH; KUMAR, 2016).

O sistema de aquecimento, ventilação e ar-condicionado, conhecido como HVAC, é utilizado para regular a temperatura dentro de um ambiente. O correto dimensionamento desse sistema influencia nos custos iniciais de projeto e nos custos operacionais relacionados ao consumo energético da edificação. Assim, se faz necessário conhecer as transferências de calor existentes no ambiente em estudo e as cargas que envolvem seu uso (HARISH; KUMAR, 2016). Os três modos de transferência de calor – condução, convecção e radiação – podem estar presentes em um ambiente. No Quadro 2 são apresentadas as diferentes trocas de calor e massa existentes em cada elemento considerado de uma edificação.

Quadro 2 – Processos de transferência de calor e massa e os elementos nos quais eles ocorrem na edificação

Processo de transferência de massa e calor	Elementos
Transferência de calor por condução e/ou radiação.	Paredes externas e internas, telhado, lajes de cobertura e piso, portas e claraboias.
Transferência de calor de condução e transmissão de radiação solar.	Vidros das janelas.
Transferência de calor por condução e/ou radiação e dissipação de umidade.	Ocupantes, iluminação e outros equipamentos.
Transferência de calor e massa por convecção.	Infiltração de fora e quartos adjacentes.

Fonte: Baseado em Harish e Kumar (2016).

Os sistemas de iluminação não só representam uma parcela significativa do consumo energético de uma edificação, mas também atuam como dissipadores de calor. O adicional de temperatura gerado pela iluminação pode auxiliar no conforto interno dos usuários para climas mais frios, causando o efeito contrário para climas quentes. O consumo energético relacionado ao uso desse sistema depende do seu tempo de uso em cada ambiente, do projeto arquitetônico e luminotécnico, do padrão de ocupação do espaço, da luz natural disponível no mesmo e do sistema de controle usado (HARISH; KUMAR, 2016).

### 2.3.2. Influência do usuário

O comportamento humano ao longo da fase de utilização das edificações representa papel fundamental no conforto dos usuários e no consumo de operação; estas características não podem ser definidas apenas através do uso de tecnologias. Em simulações computacionais, as interações entre a construção e seus usuários são simplificadas. A previsão da atuação dos usuários na fase de projeto de um empreendimento configura uma tarefa complexa e que influencia consideravelmente o desempenho térmico e o consumo energético da edificação. Além da imprevisibilidade do comportamento humano, as diferenças fisiológicas, psicológicas e culturais entre os usuários de um mesmo ambiente alteram as percepções de conforto entre eles (D'OCA; HONG; LANGEVIN, 2018).

A disponibilidade de informações a respeito da ocupação dos ambientes, a interação dos usuários com a edificação e o uso dos sistemas como iluminação,

eletricidade e HVAC cresceu nos últimos anos. Enquanto estudos de caso e o levantamento do comportamento dos usuários são essenciais para estabelecer diretrizes para a modelagem comportamental, o entendimento do funcionamento das tecnologias adotadas para uso na edificação permite que o projetista preveja como o usuário irá utilizá-las. Os ocupantes também precisam compreender o projeto e a operação dos sistemas prediais para que possam se adaptar e fornecer *feedback* para alcançar condições otimizadas de conforto pessoal, minimizando ao mesmo tempo o uso de energia (D'OCA; HONG; LANGEVIN, 2018).

O comportamento do usuário, além de influenciar no consumo energético operacional da edificação, também pode levar a um gasto de energia desnecessário através de desperdícios. Esse tipo de comportamento pode acarretar no aumento de mais de 50% do consumo de energia final do estabelecimento. Estratégias de mudança comportamental têm um potencial de economia de energia comparável e, na maioria dos casos, superior ao das soluções tecnológicas. A mudança comportamental não tende a ser custosa, não necessita de conhecimentos de alta tecnologia, e é aplicável tanto a edifícios novos quanto existentes (MASOSO; GROBLER, 2010).

A influência das propriedades térmicas da envoltória da edificação em estudo foi determinada por meio dos programas *EnergyPlus* e *Analysis Bio*.

### **2.3.3. EnergyPlus**

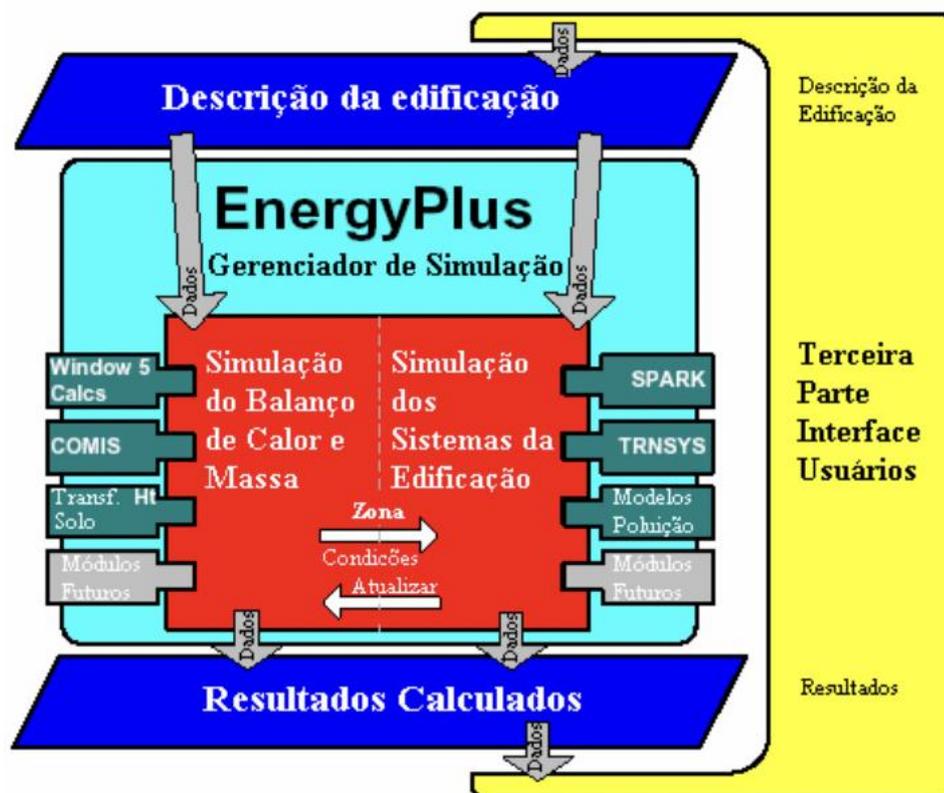
O *EnergyPlus* é um programa computacional de análise de energia e simulação de carga térmica, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Muitas das suas características de simulação foram herdadas dos programas *BLAST* e *DOE-2*, criados na década de 1970. Sua criação foi motivada pela crise energética do início dos anos 70 e pelo reconhecimento de que o consumo de energia dos edifícios é um componente importante das estatísticas de utilização de energia (UNITED STATES, 2022).

O programa realiza a simulação térmica e a análise energética de uma edificação ao criar *links* com outros programas desenvolvidos com a mesma finalidade, podendo apresentar resultados considerando um espaço de tempo de um dia ou até um ano. Seu público alvo consiste em profissionais de engenharia e arquitetura que desejam dimensionar equipamentos *HVAC* corretamente, desenvolver

estudos de *retrofit* para análises de custos de ciclo de vida, ou otimizar o desempenho energético de seus projetos (UNITED STATES, 2022).

Tomando como base a descrição do usuário de uma edificação, a partir de sua composição física e sistemas mecânicos associados, o *EnergyPlus* determina detalhes necessários para verificar se a simulação está representando o real comportamento do edifício. Dentre os parâmetros calculados estão as cargas de aquecimento e resfriamento necessárias para manter os pontos de ajuste de controle térmico, as condições de um sistema HVAC secundário e o consumo de energia dos equipamentos primários do projeto, além de outros detalhes de simulação necessários para verificar se o modelo se comporta como uma edificação real (UNITED STATES, 2022).

Figura 4 – Estrutura do programa *EnergyPlus*



Fonte: Baseado em United States (2022).

A utilização simultânea das cargas térmicas, sistemas e plantas ao se realizar uma simulação dispensa a necessidade de primeiramente calcular-se as cargas para enfim simular os sistemas e plantas. Ressalta-se que o *EnergyPlus* não foi desenvolvido para realizar ACVs; no entanto, os resultados fornecidos em suas

análises podem ser empregados em outros programas voltados para este fim (UNITED STATES, 2022).

Foi criada, a partir da versão 8.3.0 do *EnergyPlus*, uma biblioteca com documentos referentes à utilização do programa, disponibilizada no site <http://EnergyPlus.net/documentation> (UNITED STATES, 2022). Nela, é possível consultar diversos manuais, que tratam de sua utilização e estrutura, aqui utilizados como material base para estudo do programa.

#### **2.4. Considerações finais**

O consumo global de materiais e energia é significativamente impactado pelo setor da construção civil (ASADOLLAHFARDI; ASADI; KARIMI, 2015; BRASIL, 2022; IEA, 2017). O investimento em projetos que visam reduzir o impacto ambiental negativo causado por esse setor é crucial para que se alcance o desenvolvimento sustentável. A avaliação do ciclo de vida desempenha papel importante ao analisar tanto os materiais utilizados na sua construção como o uso das edificações em si.

Os conceitos de sustentabilidade devem ser cada vez mais incorporados nas edificações, quaisquer que sejam seus fins. No entanto, em construções de estabelecimentos escolares a sustentabilidade deve ser especialmente valorizada. A escola desempenha um papel fundamental no enraizamento de conceitos e na construção de valores de seus alunos, através de comportamento ambientalmente responsável em seu cotidiano. As instituições de ensino têm o potencial de serem ferramentas de ensino por si mesmas (COSTA; OLIVEIRA; LOBO; MOURÃO, 2023; PAES, 2008).

No setor da educação no Brasil destacam-se problemas como mau uso dos recursos públicos e desigualdades educacionais entre escolas (ALVES, 2008). Os projetos desenvolvidos utilizam materiais de baixo custo em larga escala, e são frequentemente replicados sem considerar-se a interação das edificações com o ambiente em que estão inseridas. A má gestão de recursos acarreta em impactos ambientais, além de influenciar negativamente o desempenho escolar, tendo em vista que este está relacionado à infraestrutura do ambiente de ensino (CASTRO; FLETCHER, 1986).

A grande quantidade de instituições públicas de ensino construídas nos últimos anos resulta em impacto ambiental significativo (ALVES, 2008). Projetos mal elaborados e materiais de baixa qualidade reduzem a vida útil das edificações e não atendem às reais necessidades dos usuários. Portanto, o desenvolvimento de projetos escolares que utilizem materiais com baixo impacto ambiental ao longo de seu ciclo de vida é imprescindível.

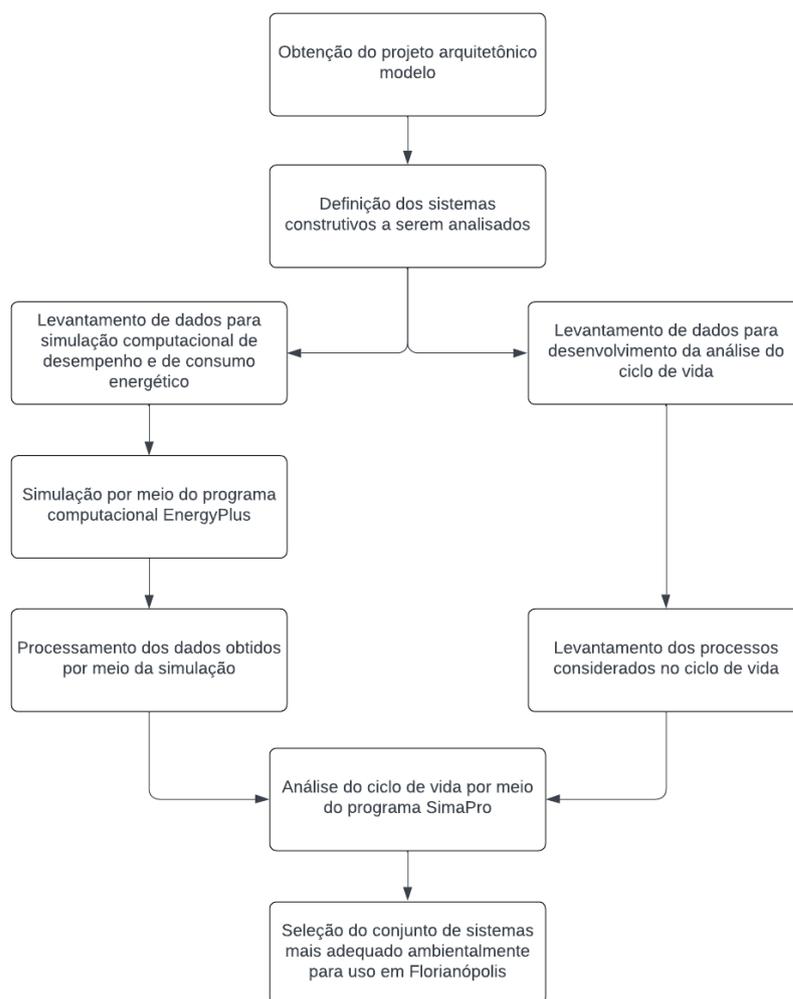
### 3. Método

Neste capítulo é descrito o método utilizado para a realização do trabalho. Primeiramente é apresentado o projeto arquitetônico modelo, utilizado como edificação de referência para as simulações e para o levantamento de quantitativo de material. Ele foi fornecido pela Secretaria de Estado da Educação, e representa uma edificação escolar localizada em Florianópolis.

Em seguida, foram definidos os componentes construtivos a serem avaliados ao longo do trabalho. Para isso, foram levantados os principais materiais utilizados na cobertura, nas esquadrias e nas paredes, em edificações públicas de ensino na Grande Florianópolis. Assim, seguindo o mesmo padrão construtivo estabelecido no projeto arquitetônico, foram determinadas as combinações de componentes construtivos utilizados no trabalho. Com os conjuntos definidos foi possível levantar os dados necessários para o desenvolvimento da simulação computacional, realizada por meio do programa *EnergyPlus*.

A avaliação do ciclo de vida foi realizada com o auxílio do programa *SimaPro*. Os dados utilizados tiveram como base os processos elementares, o quantitativo levantado com o auxílio do programa Revit e os dados de consumo energético obtidos por meio da simulação computacional realizada no passo anterior. Assim foi possível selecionar o conjunto de componentes construtivos ambientalmente mais adequados para adoção em instituições públicas de ensino na região de Florianópolis. O fluxograma do método desenvolvido é apresentado na Figura 5.

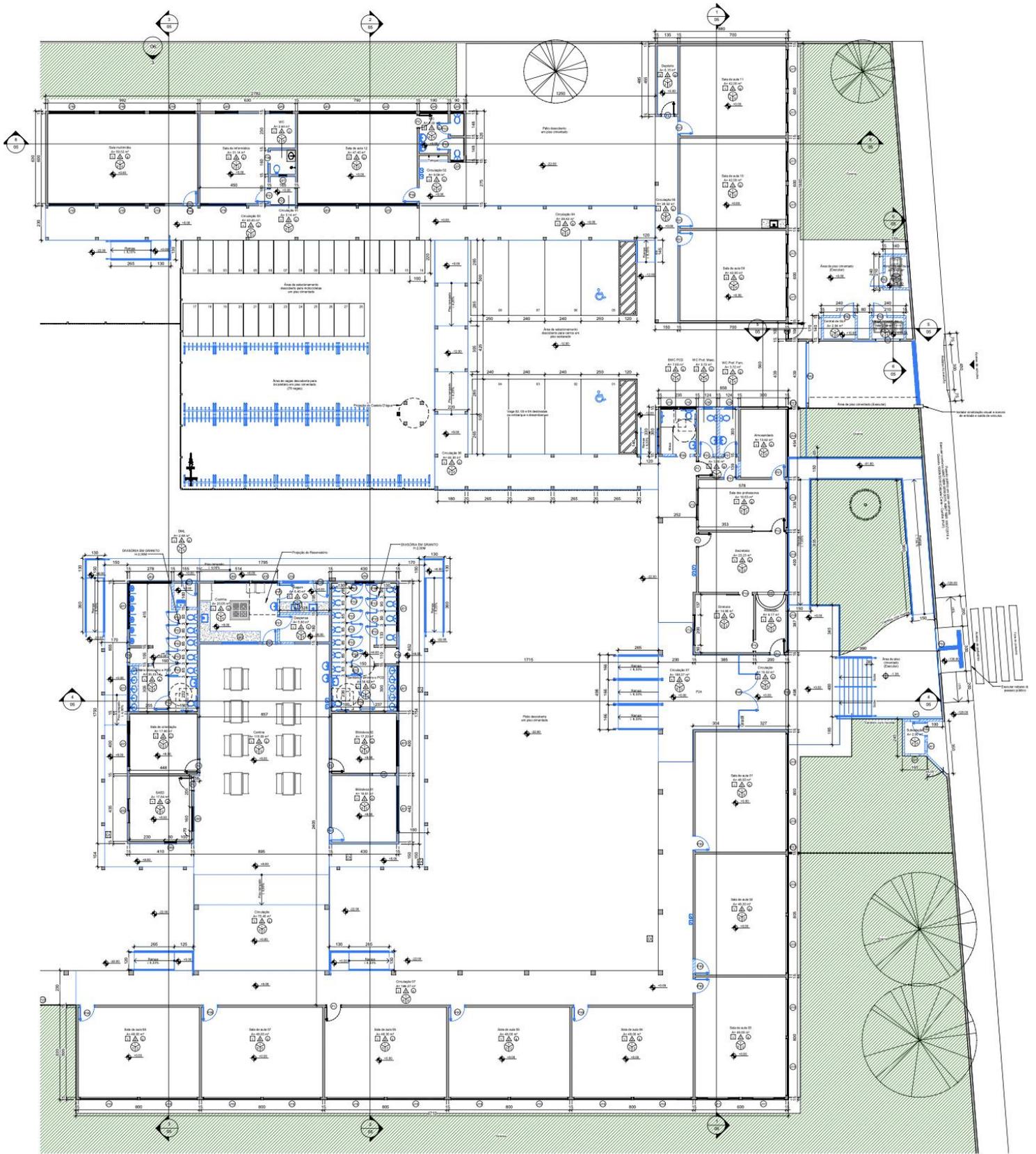
Figura 5 – Fluxograma do método utilizado



### 3.1. Projeto arquitetônico modelo

A Diretoria de Infraestrutura Escolar da Secretaria do Estado da Educação (DIPE) de Santa Catarina forneceu um projeto modelo para o desenvolvimento deste trabalho. O projeto arquitetônico é referente à Escola de Educação Básica Irineu Bornhausen, localizada no bairro Estreito, em Florianópolis. A equipe de Gerência de Planejamento de Infraestrutura da DIPE disponibilizou o projeto em questão por o considerarem como representativo de instituições públicas de ensino na região, dispendo de todos os ambientes necessários para a composição de uma instituição de ensino fundamental. A Figura 6 representa a planta baixa fornecida.

Figura 6 – Planta baixa do projeto arquitetônico modelo



1 Planta baixa - Reforma  
1 : 100

Fonte: Secretaria do Estado da Educação (2020)





componentes construtivos mais frequentemente utilizados em projetos de edificações educacionais na cidade de Palhoça, na Grande Florianópolis.

Os projetos da estrutura e das instalações hidráulicas e elétricas foram considerados iguais em todas as situações. Essa padronização permite que suas influências sejam desconsideradas na avaliação do ciclo de vida, que será utilizada de forma comparativa entre os conjuntos. Com isso, o levantamento de quantitativo de materiais para esses sistemas se torna dispensável.

### **3.3. Simulação computacional**

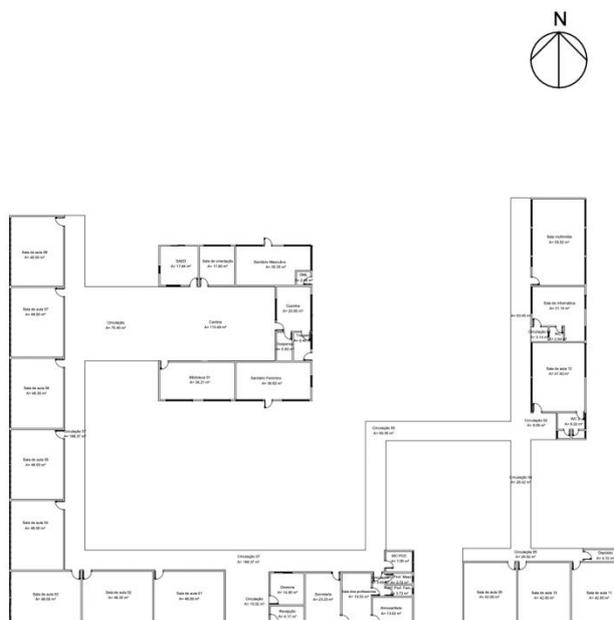
As simulações computacionais foram desenvolvidas em duas etapas distintas. Inicialmente foram feitas simulações sem o emprego de sistema de refrigeração artificial, com o objetivo de fazer a análise do desempenho térmico da edificação e determinar o total de horas de desconforto térmico anual. Na segunda etapa, as simulações foram realizadas com o uso do sistema de condicionamento de ar nas salas de aula para avaliar o desempenho energético.

Além da variação dos componentes construtivos selecionados, a orientação da edificação foi alterada de 90° em 90° no sentido horário, visando considerar as quatro principais orientações para o projeto. A Figura 9 apresenta as diferentes orientações e o valor angular considerado para cada uma delas.

Figura 9 – Orientações e nomenclaturas adotadas para simulação da edificação



(a) Orientação 0°



(b) Orientação 90°



(c) Orientação 180°



(d) Orientação 270°

Fonte: Baseado na Secretaria do Estado da Educação (2020)

### **3.4. Levantamento de dados para a simulação computacional**

A simulação computacional foi desenvolvida por meio do programa *EnergyPlus*. Os dados de entrada exigem informações sobre a geometria da edificação, o clima local, os materiais utilizados em cada componente e suas respectivas características térmicas e os dados de operação, que consideram a ocupação, o uso de equipamentos e a abertura das esquadrias (UNITED STATES, 2018).

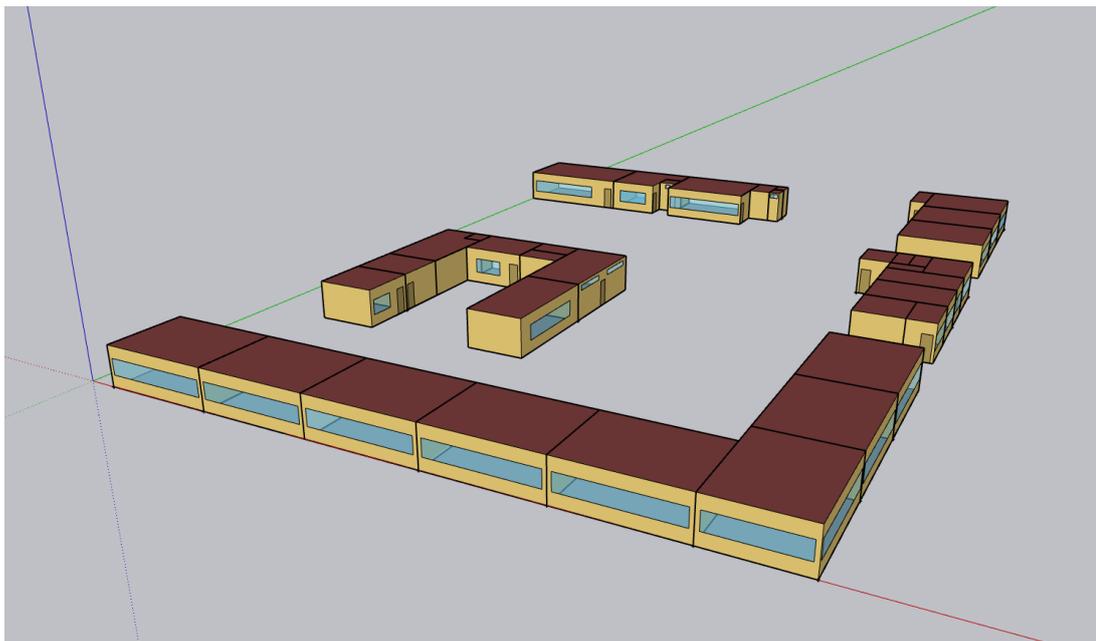
#### **3.4.1. Clima local**

O arquivo climático referente à cidade de Florianópolis, com data base de 2016, disponível no site do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina foi utilizado para a determinação da influência do clima na simulação. O município de Palhoça faz parte dos limites geográficos da Grande Florianópolis, sendo assim os arquivos climáticos são válidos também no município em análise. O documento faz parte do projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA), que disponibiliza dados climáticos de 20 cidades brasileiras. Ele inclui dados de temperatura mensal não perturbada, utilizada para determinar a temperatura em que se encontra o solo na área de contato com a edificação.

#### **3.4.2. Geometria e zonas térmicas**

A geometria da edificação e sua divisão em zonas térmicas foram realizadas no programa *SketchUp*, com uso da extensão *OpenStudio*. Em seguida, as informações foram exportadas para o *EnergyPlus*. As zonas térmicas foram determinadas por meio da divisão original dos cômodos, de forma a permitir a análise das horas de desconforto térmico por ambiente. Adotou-se pé direito de 3,0m e as divisórias foram posicionadas no eixo central das paredes.

Figura 10 – Modelagem da edificação para a simulação computacional



A interação entre as superfícies das zonas térmicas foi feita no *SketchUp* de forma manual. A cobertura foi modelada em dois componentes. O *Interior Ceiling*, definido como o elemento de forro, e o *Exterior Roof*, definido como as telhas da cobertura. O *Energyplus* considera o espaço vazio entre os dois componentes como ar de maneira automática. O elemento *Interior Ceiling* é segmentado seguindo a divisão dos cômodos para que aconteça interação com as outras zonas térmicas da edificação.

A cantina e os ambientes de circulação não são delimitados por paredes, mas apresentam cobertura. Assim, seus componentes de cobertura foram definidos como itens de sombreamento para consideração da sombra da cobertura na fachada das salas de aula.

A quantidade de zonas térmicas modeladas foi 34, respeitando a delimitação dos ambientes conforme a planta modelo. Cada zona térmica equivale a um ambiente. Ambientes com a mesma funcionalidade localizados lado a lado foram modelados separadamente, a fim de gerar resultados mais fieis à realidade. A Figura 8 indica a interação dos elementos entre as zonas térmicas e a Figura 9 apresenta a modelagem final da cobertura.

Figura 11 – Identificação da interação dos elementos entre as zonas térmicas

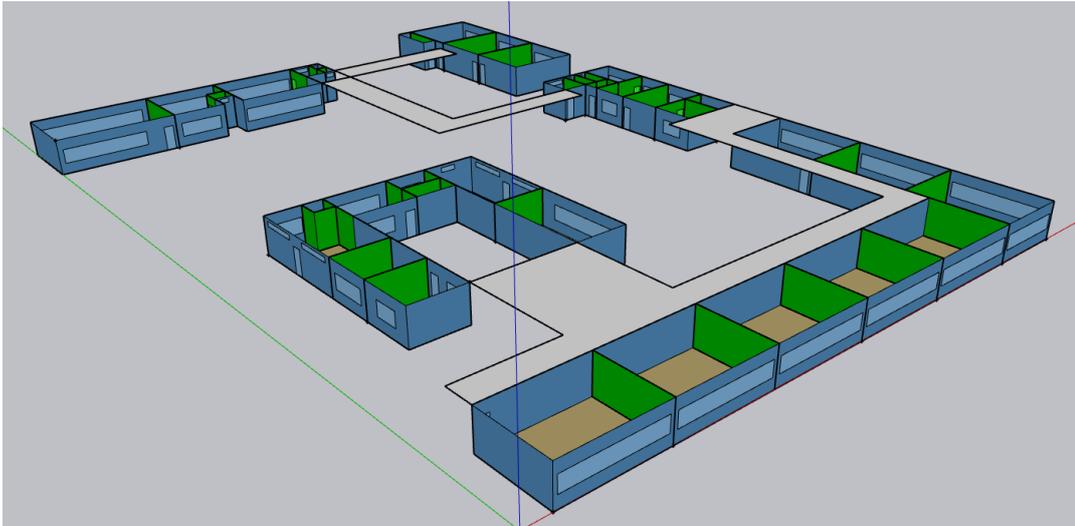
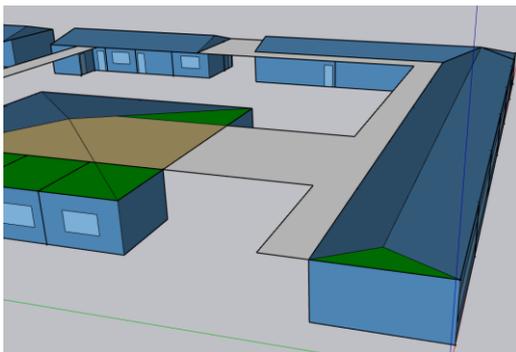
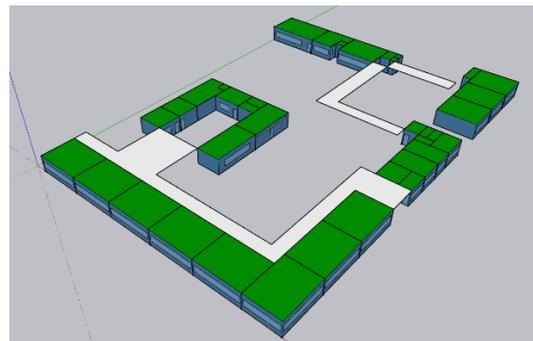


Figura 12 – Modelagem final da cobertura no *SketchUp*



(a) Modelagem da cobertura



(b) Elemento *Interior Ceiling* segmentado seguindo a divisão dos cômodos

### 3.4.3. Materiais construtivos

Os materiais adotados foram definidos conforme sua composição no componente construtivo ao qual pertencem. Para a realização da simulação, dados de espessura, condutividade, densidades, absorvância térmica, absorvância solar e absorvância visível foram definidos.

### 3.4.4. Dados de operação

O padrão de ocupação, de uso de equipamentos, de iluminação e de abertura de esquadrias foi definido por meio da Instrução Normativa Inmetro para a Classificação

de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviço e Públicas (INI-C). As informações utilizadas estão disponíveis na Tabela 16 do ANEXO B.

O consumo energético em cada cômodo é estimado pelo EnergyPlus a partir da inserção da potência instalada no mesmo, em Watts. Para a determinação da potência instalada em cada cômodo, considerou-se a densidade de potência por m<sup>2</sup>. A potência total em cada cômodo é determinada por meio da Equação 1. A Tabela 10 apresenta o valor de potência instalada para a iluminação e a Tabela 11 para os equipamentos presentes em cada cômodo.

$$P_{ins} = A \times D_{pot} \quad (1)$$

Onde:

$P_{ins}$  é a potência total instalada no cômodo (W);

$A$  é a área do cômodo (m<sup>2</sup>);

$D_{pot}$  é a densidade de potência instalada (Watts/m<sup>2</sup>).

Tabela 1 – Densidade de potência e valor da potência instalada para iluminação

Ambiente	Densidade de potência (W/m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Potência instalada (W)
Almoxarifado	8,00	13,62	108,96
Biblioteca	16,00	36,21	579,36
Circulação	11,36	3,66	41,58
Cozinha	17,12	20,05	343,26
Depósito	8,00	6,15	49,20
Despensa	8,00	5,90	47,20
Diretoria	9,60	14,90	143,04
DML	8,00	2,48	19,84
Recepção	9,60	6,17	59,23
SAED	9,60	17,84	171,26
Sala de aula 01	16,32	48,00	783,36
Sala de aula 02	16,32	48,30	788,26
Sala de aula 03	16,32	48,00	783,36
Sala de aula 04	16,32	48,00	783,36
Sala de aula 05	16,32	48,00	783,36
Sala de aula 06	16,32	48,00	783,36
Sala de aula 07	16,32	48,30	788,26
Sala de aula 08	16,32	48,00	783,36
Sala de aula 09	16,32	42,00	685,44
Sala de aula 10	16,32	42,00	685,44
Sala de aula 11	16,32	42,00	685,44
Sala de aula 12	16,32	47,40	773,57
Sala de informática	16,32	31,14	508,20
Sala de orientação	19,04	17,90	340,82
Sala dos professores	19,04	19,53	371,85
Sala multimídia	16,32	59,52	971,37
Secretaria	19,04	23,23	442,30
Triagem	8,00	6,40	51,20
WC 1	13,73	2,64	36,25
WC 2	13,73	8,44	115,88
WC feminino	13,73	36,62	502,79
WC feminino professores	13,73	3,72	51,08
WC masculino	13,73	35,35	485,36
WC masculino professores	13,73	3,72	51,08
WC PCD	13,73	7,05	96,80

Fonte: Baseado na Portaria nº 309/2022 do INMETRO (2022).

Para determinação da densidade de potência foram utilizados os valores de referência pelo método da atividade.

Tabela 2 – Densidade de potência e valor da potência instalada para equipamentos

Ambiente	Densidade de potência (W/m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Potência instalada (W)
Almoxarifado	15,00	13,62	204,30
Biblioteca	15,00	36,21	543,15
Circulação	15,00	3,66	54,90
Cozinha	15,00	20,05	300,75
Depósito	15,00	6,15	92,25
Despensa	15,00	5,90	88,50
Diretoria	15,00	14,90	223,50
DML	15,00	2,48	37,20
Recepção	15,00	6,17	92,55
SAED	15,00	17,84	267,60
Sala de aula 01	15,00	48,00	720,00
Sala de aula 02	15,00	48,30	724,50
Sala de aula 03	15,00	48,00	720,00
Sala de aula 04	15,00	48,00	720,00
Sala de aula 05	15,00	48,00	720,00
Sala de aula 06	15,00	48,00	720,00
Sala de aula 07	15,00	48,30	724,50
Sala de aula 08	15,00	48,00	720,00
Sala de aula 09	15,00	42,00	630,00
Sala de aula 10	15,00	42,00	630,00
Sala de aula 11	15,00	42,00	630,00
Sala de aula 12	15,00	47,40	711,00
Sala de informática	15,00	31,14	467,10
Sala de orientação	15,00	17,90	268,50
Sala dos professores	15,00	19,53	292,95
Sala multimídia	15,00	59,52	892,80
Secretaria	15,00	23,23	348,45
Triagem	15,00	6,40	96,00
WC 1	15,00	2,64	39,60
WC 2	15,00	8,44	126,60
WC feminino	15,00	36,62	549,30
WC feminino professores	15,00	3,72	55,80
WC masculino	15,00	35,35	530,25
WC masculino professores	15,00	3,72	55,80
WC PCD	15,00	7,05	105,75

Fonte: Baseado na Portaria nº 309/2022 do INMETRO (2022).

Para o sistema de condicionamento de ar, considerou-se o uso de aparelhos modelo *split* com função de resfriamento e aquecimento. Foi determinada a presença de aparelhos de ar-condicionado nas salas de aula, sala de informática, sala multimídia, sala dos professores, diretoria e secretaria. A rotina de operação do sistema foi associada à rotina de ocupação dos ambientes e às temperaturas de

conforto para calor e frio. Para isso, definiu-se no grupo *HVAC Template:Thermostat* o objeto denominado “Termostato”. A temperatura limite para acionamento do aquecimento é de 20°C, enquanto para o resfriamento é de 24°C, conforme estabelece a ABNT NBR 9241. Assim, o sistema será ativado sempre que houver ocupação e a temperatura ambiente estiver fora do intervalo de temperatura de conforto estabelecida.

### **3.5. Análise dos dados da simulação computacional**

Os dados de saída da simulação computacional são a temperatura operativa por zona, horária e mensal, demanda de eletricidade por zona, horária e mensal, e demanda de eletricidade da edificação mensal.

A análise dos dados foi dividida em etapas. Foram consideradas as horas de desconforto térmico, a influência das características térmicas dos materiais, a manutenção da temperatura ao longo do dia e o consumo energético total da edificação.

#### **3.5.1. Horas de desconforto térmico**

O cálculo das horas de desconforto foi realizado a partir do método definido pela ANSI/ASHRAE STANDARD 55-2013. Ele é adotado em ambientes que não apresentam sistema de condicionamento mecânico, que têm a temperatura média externa predominantemente entre 10,0°C e 33,5°C, cujos ocupantes apresentam taxa metabólica entre 1,0 e 1,3 met e que possam adaptar suas roupas em um intervalo de 0,5 a 1,0 clo.

Met é a taxa metabólica que expressa a taxa de transformação de energia química em calor e trabalho por unidade de área superficial de pele de um indivíduo ao realizar determinada atividade, sendo 1 met equivalente a 58,2 W/m<sup>2</sup>. Como exemplos de atividades que apresentam entre 1,0 met e 1,3 met estão estar sentado, em pé relaxado, lendo, escrevendo ou digitando. Clo é a unidade que representa o isolamento térmico das vestimentas do usuário, sendo 1 clo equivalente a 0,155m<sup>2</sup>.°C/W. Como parâmetro, o conjunto completo de sapato, saia, meia calça e camiseta de manga curta ou sapato, calça e camiseta de manga curta apresentam o somatório menor que 0,5 clo (ASHRAE, 2013).

Os valores limites superior e inferior da temperatura considerada confortável em 80% dos casos pela ANSI/ASHRAE STANDARD 55-2013 são determinados por meio das Equações 2 e 3 (ASHRAE, 2013).

$$\text{Limite de aceitabilidade superior a 80\% (}^{\circ}\text{C)} = 0,31 * t_{\text{pma(out)}} + 21,3 \quad (2)$$

$$\text{Limite de aceitabilidade inferior a 80\% (}^{\circ}\text{C)} = 0,31 * t_{\text{pma(out)}} + 14,3 \quad (3)$$

Onde:

Os limites de aceitabilidade superior e inferior correspondem às temperaturas operativas máximas e mínimas internas referentes ao limite de aceitabilidade de 80% dos usuários.

A  $t_{\text{pma(out)}}$  corresponde à média aritmética simples das temperaturas obtidas na estação meteorológica mais representativa possível durante um mês.

Os limites de temperatura de conforto dependem da temperatura externa local para determinar o clima ao qual o usuário está psicologicamente, comportamental e fisiologicamente adaptado (ASHRAE, 2013). Dispondo dos valores limites superior e inferior das temperaturas horárias, as temperaturas operativas de cada zona de longa permanência foram classificadas com as categorias de conforto, desconforto por frio ou desconforto por calor. Finalmente, por meio de tabelas e gráficos, os resultados obtidos podem ser comparados entre os componentes construtivos, considerando o total de horas de desconforto.

### **3.5.2. Consumo energético**

A análise do consumo energético ao longo da operação da edificação foi realizada de duas maneiras distintas. Primeiramente, relacionou-se o consumo com as horas de desconforto total de cada edificação. Também foram caracterizadas as 20 combinações com menor e as 20 combinações com maior consumo de eletricidade. Foram analisadas suas composições físicas para evidenciar tendências de eficiência energética nos componentes construtivos adotados.

### 3.6. Avaliação do ciclo de vida

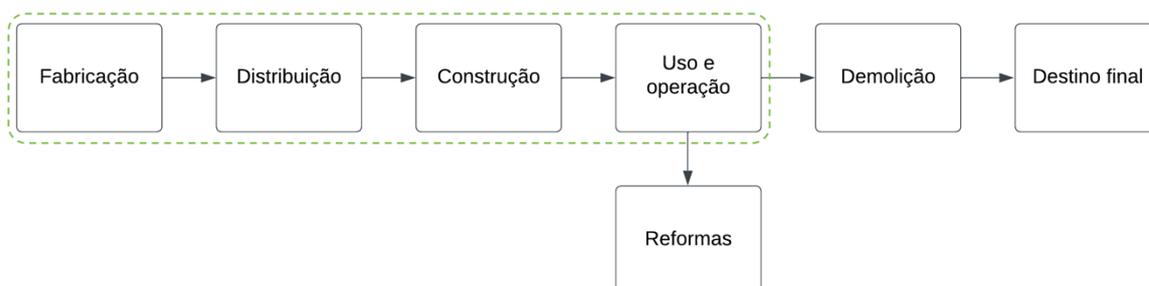
O desenvolvimento da avaliação do ciclo de vida seguirá os tópicos de definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação dos impactos e interpretação dos dados obtidos.

#### 3.6.1. Objetivo e escopo

O objetivo da análise do ciclo de vida é determinar os impactos ambientais de cada projeto dentro das fronteiras estabelecidas, possibilitando a comparação entre diferentes edificações. Dessa forma, foram considerados subsistemas que representam produtos distintos na construção da edificação, definidos nos grupos de parede, esquadrias (portas e janelas) e cobertura. Cada subsistema foi modelado no programa *SimaPro* utilizando a unidade funcional de m<sup>2</sup>, tornando possível a comparação entre os próprios subsistemas.

Os critérios utilizados para definição da fronteira de análise levaram em consideração as limitações do trabalho e o objetivo do mesmo. Ao longo da vida útil da edificação não foi considerada a ocorrência de reformas, nem o descarte final dos materiais. Assim, a análise é classificada como de berço ao portão. Com o objetivo de avaliar a influência da fase de operação no ciclo de vida da edificação, foram considerados três cenários: somente a construção da edificação, a construção e o consumo do primeiro ano de operação e a construção e o consumo ao longo da vida útil, estimada em 50 anos. A Figura 13 apresenta a fronteira definida.

Figura 13 – Identificação da fronteira definida para a avaliação do ciclo de vida



A produção dos materiais utilizados foi determinada por meio do uso de bancos de dados. A distância de distribuição foi calculada a partir da mediana dos três principais fornecedores de cada material na região de Florianópolis.

### **3.6.2. Inventário do ciclo de vida**

O desenvolvimento do inventário do ciclo de vida requer o quantitativo de materiais para cada componente construtivo. O levantamento das áreas foi realizado por quantificação, por meio do programa Revit.

Para o levantamento de quantitativos, estimou-se pé direito de 3,00m. Adicionalmente, considerou-se o alongamento das paredes para fechamento lateral da cobertura na vista da fachada da edificação. Nas janelas, foi empregado o vidro comum. A Figura 14 apresenta os tracejados que representam área de parede e reboco interno e externo. O traço azul e o traço verde representam o reboco interno e externo, respectivamente, e o traço vermelho evidencia a área de parede. Os prolongamentos das paredes externas para o fechamento das laterais da cobertura, com altura padrão de 1,00m, foram adicionados na área total.

Figura 14 – Estimativa das áreas para levantamento do quantitativo

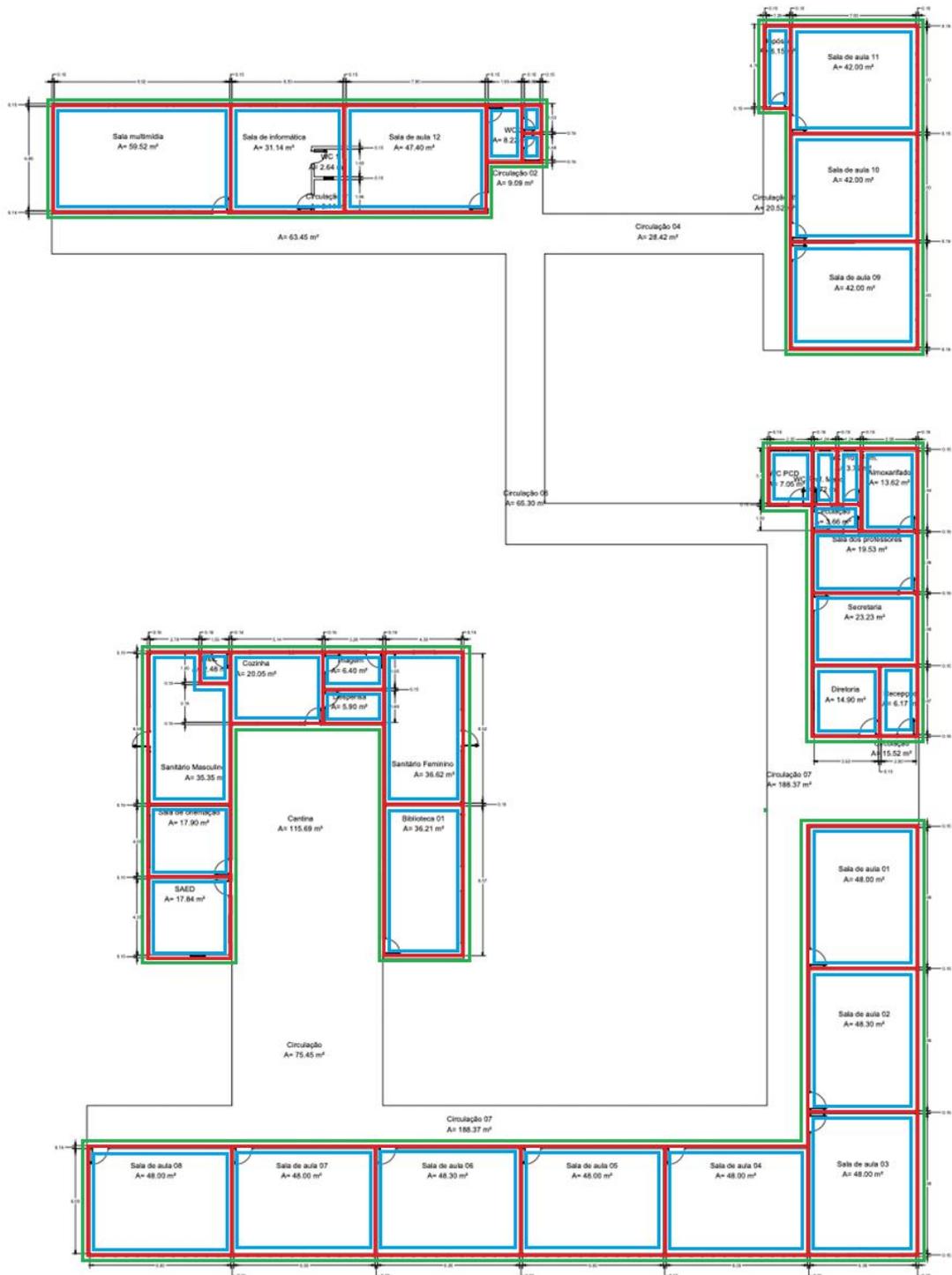
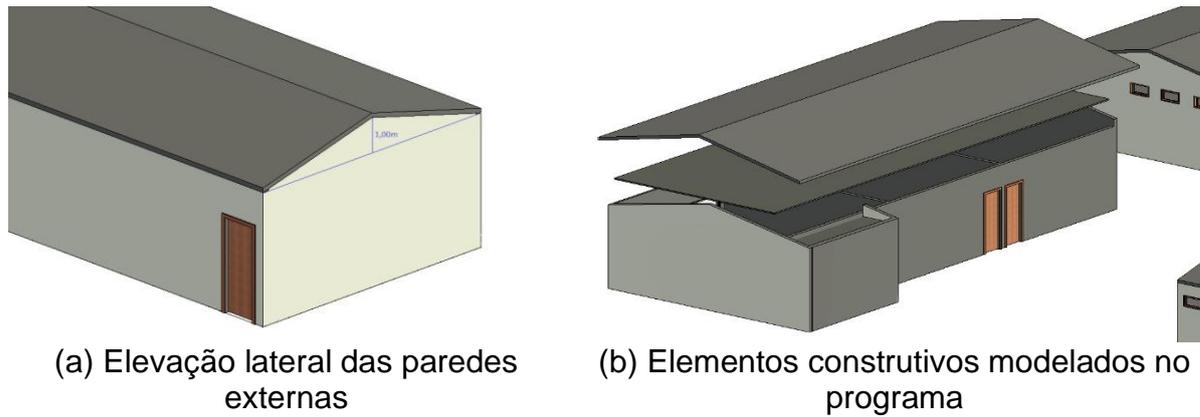
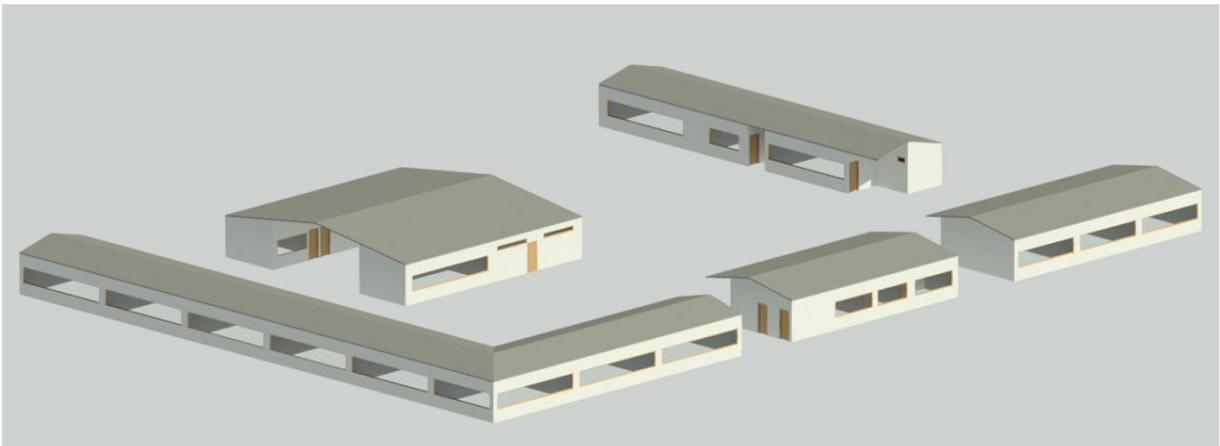


Figura 15 – Etapas da modelagem da edificação



A edificação foi modelada no programa Revit respeitando os detalhes construtivos do projeto modelo, buscando a aproximação do valor obtido ao valor real. A Figura 16 apresenta a modelagem final da edificação no programa.

Figura 16 – Modelagem final da edificação no programa Revit



A Tabela 3 apresenta o resultado das áreas levantadas por quantificação no programa Revit.

Tabela 3 – Áreas levantadas por quantificação pelo Revit

<b>Categoria</b>	<b>Material</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>
	Parede	1517
Parede	Reboco interno	1853
	Reboco externo	1180
	Pintura	3034
Cobertura	Forro	991
	Telha	1234

A quantificação dos insumos presentes no inventário do ciclo de vida baseou-se nos relatórios de insumos e composições de setembro de 2023, para o estado de Santa Catarina, do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI). Também foram considerados manuais de boas práticas referentes aos componentes construtivos analisados e as Tabelas de Composição de Preços para Orçamentos (TCPO, 2010), bem como o estudo de Avaliação do Ciclo de Vida de diferentes envoltórias para habitações de interesse social em Florianópolis (AZEVEDO, 2018). Para a determinação das distâncias de transporte, foram consultados fornecedores locais. O inventário desenvolvido encontra-se nas Tabelas 17 a 26 do APÊNDICE A.

### 3.6.3. Avaliação dos impactos

A avaliação do ciclo de vida foi realizada no programa *SimaPro*. O método de cálculo utilizado foi a versão V2.15 do *IMPACT 2002+*, por meio do qual são considerados os métodos clássicos e os mais recentes da previsão de impacto. O método clássico quantifica os impactos considerados como *midpoint*, que compõem o início da cadeia de causa e efeito. Atualmente, a maioria das abordagens utilizadas caracterizam os impactos chamados *endpoint*, agrupando os impactos em categorias de dano (HUMBERT et al., 2012). O Quadro 3 apresenta as categorias de impacto e de dano obtidas como resultado da avaliação de ciclo de vida realizada por meio do método de cálculo *IMPACT 2002+*.

Quadro 3 – Categorias de impacto e categorias de dano obtidas na avaliação do ciclo de vida

Categorias de impacto ( <i>midpoint</i> )	Unidade	Categorias de dano ( <i>endpoint</i> )	Unidade
Carcinógenos	DALY	Saúde humana	DALY
Não carcinógenos	DALY		
Inorgânicos respiráveis	DALY		
Radiação ionizante	DALY		
Depleção da camada de ozônio	DALY		
Orgânicos respiráveis	DALY		
Ecotoxicidade aquática	PDF.m <sup>2</sup> .yr	Qualidade do ecossistema	PDF.m <sup>2</sup> .yr
Ecotoxicidade terrestre	PDF.m <sup>2</sup> .yr		
Acidificação/eutrofização terrestre	PDF.m <sup>2</sup> .yr		
Ocupação do solo	PDF.m <sup>2</sup> .yr		
Potencial de aquecimento global	kg CO <sub>2</sub> eq	Mudanças climáticas	kg CO <sub>2</sub> eq
Energia não renovável	MJ primário	Recursos	MJ primário
Extração mineral	MJ primário		

Fonte: Baseado em Humbert et al., 2012.

A unidade denominada DALY (*Disability-Adjusted Life Years*) representa a quantidade de anos de vida ajustados por incapacidade, considerando tanto os anos de vida por falecimento prematuro quanto os anos com qualidade de vida reduzida devido a doenças. Utiliza-se a unidade PDF.m<sup>2</sup>.yr para medir a qualidade do ecossistema, pois ela representa a fração potencial de espécies desaparecidas em um m<sup>2</sup> durante um ano (HUMBERT et al., 2012).

Os produtos levantados em inventário e o consumo anual de energia da edificação, obtido na simulação energética, foram inseridos no programa e são considerados no ciclo de vida. Cada componente construtivo analisado foi inserido no programa com a unidade funcional de m<sup>2</sup>, possibilitando a comparação entre eles. Assim, obteve-se o impacto para a construção por m<sup>2</sup> para cada componente construtivo. O banco de dados utilizado foi o *Ecoinvent* 3.9.1.

### 3.7. Interpretação dos dados de impacto ambiental do ciclo de vida

Para desenvolvimento das análises, os resultados obtidos foram manipulados para tornarem-se equivalentes à construção de uma instituição de ensino. Para isso, o valor de impacto por área de cada componente construtivo foi multiplicado pela área total

construída correspondente. Ao realizar-se a soma das áreas construídas, obteve-se o valor de impacto total para a edificação estudada.

A interpretação dos dados resultantes da avaliação do ciclo de vida foi desenvolvida com base no método apresentado em Humbert et al. (2012), no qual as categorias de dano são utilizadas para a seleção inicial das combinações que apresentam menor impacto ambiental. Em seguida, as categorias de impacto são consideradas para a análise final.

### **3.7.1. Categorias de dano**

A interpretação dos dados iniciou-se com a consideração das categorias de dano, conforme indica Humbert et al. (2012). Foram analisados os valores dos impactos obtidos para as quatro categorias de dano pré-definidas, e foi realizada a comparação dos resultados dos três cenários considerados. Não se utilizaram ponderações pois a ISO 14044 não recomenda seu uso para comparações em estudos de ciclo de vida (HUMBERT et al., 2012). Para estimar o impacto considerando a operação das edificações ao longo da vida útil, multiplicou-se o valor do impacto obtido para o consumo energético anual por 50.

Foram selecionadas as 20 edificações com menor impacto para cada categoria de dano. Os conjuntos repetidos entre as categorias foram considerados apenas uma vez. Assim, foram analisadas 36 diferentes edificações, considerando os componentes construtivos e as orientações empregadas. Os valores de impacto para essa etapa consideraram a construção e a operação de um ano da edificação, para que não houvesse mascaramento do impacto da fabricação dos materiais ao longo do ciclo de vida e as incertezas de previsão de consumo ao longo dos 50 anos de vida útil do projeto.

### **3.7.2. Categorias de impacto**

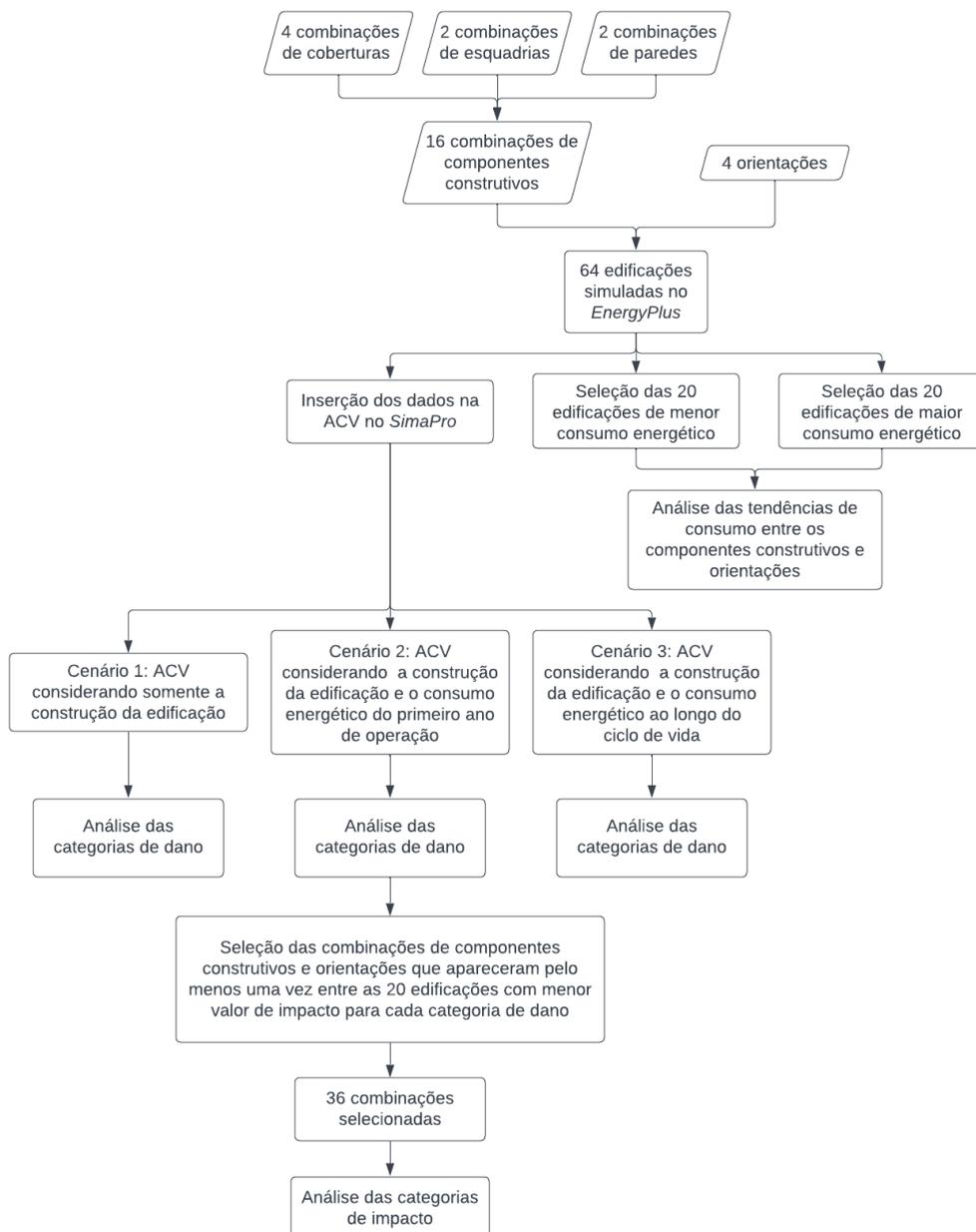
Para a seleção do conjunto mais ambientalmente adequado para uso na região de Florianópolis, os valores absolutos das categorias de impacto das 36 edificações selecionadas foram transformados em percentuais, sendo 100% o maior valor obtido entre as categorias de impacto com a mesma unidade de medida. Os percentuais

foram, em seguida, somados, com o objetivo de identificar o conjunto com maior percentual acumulado entre as categorias de impacto.

### 3.8. Considerações finais

Ao longo da elaboração do trabalho, as análises realizadas englobam diferentes seleções de combinações de componentes construtivos e orientações. Os diferentes cenários avaliados são descritos no fluxograma apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Diferentes cenários analisados ao longo do trabalho



## 4. Resultados

### 4.1. Análise do levantamento de materiais construtivos

A Prefeitura Municipal de Palhoça forneceu o material construtivo utilizado em 10 instituições públicas de ensino na Grande Florianópolis. O estudo levou em consideração informações de paredes, pisos, cobertura e esquadrias das edificações. O Quadro 7 do ANEXO A apresenta os resultados obtidos para o levantamento realizado.

Verificou-se que na composição das paredes, 100% das áreas molhadas foram construídas com uso de blocos cerâmicos; para as áreas secas, os blocos cerâmicos têm uso predominante, mas 10% das edificações também incluem o uso de madeira.

Tabela 4 – Ocorrência dos materiais levantados para paredes de áreas secas

Componente Construtivo	Ocorrência (%)
Bloco cerâmico	100

Fonte: Baseado em Prefeitura Municipal de Palhoça (2023)

Tabela 5 – Ocorrência dos materiais levantados para paredes de áreas molhadas

Componente Construtivo	Ocorrência (%)
Bloco cerâmico	100
Madeira	10

Fonte: Baseado em Prefeitura Municipal de Palhoça (2023)

Dentre os blocos cerâmicos empregados nas instituições, o bloco de dimensões 14x9x19 cm foi o mais usado, presente em 57% dos casos analisados. Os blocos 14x19x39, 9x19x19 e 11,5x19x19 cm apareceram em 14% das instituições cada.

Tabela 6 – Ocorrência das dimensões dos blocos cerâmicos empregados nas paredes

Bloco cerâmico	Ocorrência (%)
14x9x19	57
14x19x39	14
9x19x19	14
11,5x19x19	14

Fonte: Baseado em Prefeitura Municipal de Palhoça (2023)

Em relação à pintura das fachadas, as cores branca, cinza e azul foram as mais frequentes, e o valor médio de absorvância para cada uma foi de 20%, 50% e 70%, respectivamente. A presença de mais uma tonalidade nas fachadas dos projetos acarreta em uma taxa ocorrência maior que 100%.

Tabela 7 – Ocorrência das tonalidades de pintura de fachada

Cor	Absortância (%)	Ocorrência (%)
Branco	20	100
Azul	50	37,5
Cinza	70	37,5
Vermelho	65	25

Fonte: Baseado em Prefeitura Municipal de Palhoça (2023)

Para os pisos, 80% dos componentes construtivos foram construídos com concreto revestido de cerâmica, enquanto 20% foram construídos de concreto sem revestimento, sem distinção para áreas secas e molhadas. As esquadrias foram diferenciadas entre portas e janelas. Para as portas, a madeira é utilizada em todos os projetos, enquanto o alumínio está presente em 50%. Para as janelas, o alumínio está presente em 100% das instituições analisadas, enquanto a madeira aparece em 10%.

Tabela 8 – Ocorrência dos materiais levantados para os pisos

Componente Construtivo	Ocorrência (%)
Concreto revestido em cerâmica	80
Concreto sem revestimento	20

Fonte: Baseado em Prefeitura Municipal de Palhoça (2023)

Tabela 9 – Ocorrência dos materiais levantados para as portas

Componente Construtivo	Ocorrência (%)
Madeira	100
Alumínio	50

Fonte: Baseado em Prefeitura Municipal de Palhoça (2023)

Tabela 10 – Ocorrência dos materiais levantados para as janelas

Componente Construtivo	Ocorrência (%)
Madeira	10
Alumínio	100

Fonte: Baseado em Prefeitura Municipal de Palhoça (2023)

A estrutura das coberturas foi considerada composta pelo tipo de telha empregada, a existência de laje e o tipo de forro. A telha de fibrocimento é utilizada em 90% dos projetos, enquanto a telha cerâmica representa 10% do total analisado. O forro de *Drywall* está presente em 40% das instituições, o de PVC em 20% e o de madeira em 10%, enquanto 40% não apresenta forro. Quanto à laje, 90% das edificações têm ocorrência de laje, enquanto 10% não têm.

Tabela 11 – Ocorrência dos materiais levantados para a cobertura

Elemento	Tipo	Ocorrência (%)
Telha	Cerâmica	10
	Fibrocimento	90
Forro	<i>Dywall</i>	30
	Madeira	10
	PVC	20
	Sem	40
Laje	Sim	90
	Não	10

Fonte: Baseado em Prefeitura Municipal de Palhoça (2023)

#### 4.1.1. Paredes

Segundo a Prefeitura Municipal de Palhoça, o principal componente construtivo utilizado em instituições públicas de ensino é o bloco cerâmico. O percentual

levantado indica que o componente construtivo é empregado integralmente em áreas secas e molhadas. No levantamento desenvolvido para a caracterização do estilo arquitetônico em projetos locais, todas as instituições analisadas foram construídas com paredes em bloco cerâmico.

Por meio do levantamento realizado foi possível perceber que o bloco de tijolo cerâmico com reboco de cimento é o componente mais frequentemente utilizado. Dentre as instituições analisadas, as dimensões dos blocos variam. O Quadro 4 apresenta as dimensões finais dos blocos das paredes consideradas.

Quadro 4 – Componentes construtivos de parede considerados para análise

Componentes Construtivos	
Bloco cerâmico	14x9x19
	9x19x19

Fonte: Baseado em Prefeitura Municipal de Palhoça (2023)

#### 4.1.2. Esquadrias

Os materiais empregados nas esquadrias foram definidos por meio do levantamento realizado pela Prefeitura Municipal de Palhoça, município pertencente à Grande Florianópolis. As instituições de ensino utilizam esquadrias em madeira e em alumínio.

Com o objetivo de considerar os principais cenários, a madeira e o alumínio foram considerados nas esquadrias gerais. Todas as janelas foram consideradas sem o uso de veneziana, priorizando o uso de cortinas. Também foi determinado o uso de vidro comum em todas as janelas, sem variação entre as de madeira e de alumínio.

Quadro 5 – Componentes construtivos de esquadrias considerados para análise

Componentes Construtivos	
Portas	Madeira
	Alumínio
Janelas	Madeira
	Alumínio

Fonte: Baseado em Prefeitura Municipal de Palhoça (2023)

### 4.1.3. Coberturas

Os componentes construtivos de cobertura analisados são compostos pelas telhas e pelo forro. As especificações desses elementos foram definidas por meio do levantamento realizado pela Prefeitura Municipal de Palhoça. As telhas mais utilizadas são de fibrocimento e cerâmica, enquanto os forros são de PVC ou *drywall*. O Quadro 6 apresenta as combinações de elementos de telha e forro para as coberturas consideradas.

Quadro 6 – Componentes construtivos de cobertura considerados para análise

Componentes Construtivos	
Telha	Fibrocimento
Isolamento	Forro de Drywall
Telha	Fibrocimento
Isolamento	Forro de PVC
Telha	Fibrocimento
Isolamento	Laje maciça de concreto
Telha	Cerâmica
Isolamento	Forro de PVC

Fonte: Baseado em Prefeitura Municipal de Palhoça (2023)

### 4.1.4. Características térmicas

Para simulação computacional no EnergyPlus, os materiais adotados foram definidos conforme sua composição no componente construtivo ao qual pertencem. Foram estabelecidos dados de espessura, condutividade, densidades, absorvância térmica, absorvância solar e absorvância visível. Essas características foram obtidas por meio de revisão bibliográfica e estão apresentadas nas Tabelas 12, 13 e 14.

As absorvâncias solar e visível foram fixadas em 35%, de maneira a desconsiderar a influência de mudanças de cor nas paredes, podendo assim analisar somente a influência dos componentes construtivos da envoltória. Esse valor equivale às tonalidades claras, como cores branca, azul, verde, laranja, amarelo, salmão e bege (GHISI et al., 2015). O valor adotado para a resistência térmica da câmara de ar entre o forro e o telhado foi de 0,21 m<sup>2</sup>.K/W, de acordo com as exigências da NBR 15575-5 (2013).

Tabela 12 – Características térmicas dos materiais para os componentes construtivos de esquadria

Componentes construtivos	<i>Roughness</i>	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg.K)
Alumínio		0,03	230 <sup>1</sup>	2700 <sup>1</sup>	880 <sup>1</sup>
Madeira	<i>Rough</i> <sup>2</sup>	0,03	0,12 <sup>1</sup>	550 <sup>1</sup>	2300 <sup>1</sup>

Notas:

1 - ABNT (2005)

2 - Weber et al. (2017)

Tabela 13 – Características térmicas dos materiais para os componentes construtivos de parede

Componente construtivo	Camadas	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg.K)
Bloco cerâmico	Argamassa interna	0,025	1,15	2000	1000
	Cerâmico (14x9x19)	0,0134	0,9	1600	920
	Ar (Cerâmico)	0,0632	0,361	-	-
	Cerâmico (14x9x19)	0,0134	0,9	1600	920
	Argamassa externa	0,025	1,15	2000	1000
Bloco cerâmico	Argamassa interna	0,025	1,15	2000	1000
	Cerâmico (9x19x19)	0,013	0,9	1600	920
	Ar (Cerâmico)	0,064	0,356	-	-
	Cerâmico (9x19x19)	0,013	0,9	1600	920
	Argamassa externa	0,025	1,15	2000	1000

Fonte: Baseado em Weber et al. (2017)

Tabela 14 – Características térmicas dos materiais para os componentes construtivos de cobertura

Componentes construtivos	<i>Roughness</i>	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg.K)	
Telha	Fibrocimento	<i>Rough</i>	0,008	0,95	1900	840
Forro	<i>Drywall</i>	<i>Rough</i>	0,03	0,35	900	870
Telha	Fibrocimento	<i>Rough</i>	0,008	0,95	1900	840
Forro	PVC	<i>Rough</i>	0,01	0,071	273	960
Telha	Fibrocimento	<i>Rough</i>	0,008	0,95	1900	840
Forro	Concreto	<i>Rough</i>	0,1	1,75	2200	1000
Telha	Cerâmica	<i>Rough</i>	0,1	1,05	2000	920
Forro	PVC	<i>Rough</i>	0,1	0,071	273	960

Fonte: Baseado em Weber et al. (2017)

#### **4.1.5. Conjuntos de componentes construtivos e orientações**

Para a realização da simulação computacional no *EnergyPlus*, foram estabelecidos conjuntos de construção, levando em consideração os componentes construtivos representativos para instituições de ensino na região de estudo. Foram consideradas 2 opções de componente construtivo para as paredes, 2 opções para as esquadrias e 4 opções para as coberturas, gerando 16 possíveis combinações. Assim, o valor total de edificações simuladas é de 64, tendo em vista as 4 principais orientações do projeto. A relação de combinações, detalhando os componentes construtivos considerados e a orientação da edificação, está apresentada no Quadro 8 do APÊNDICE B.

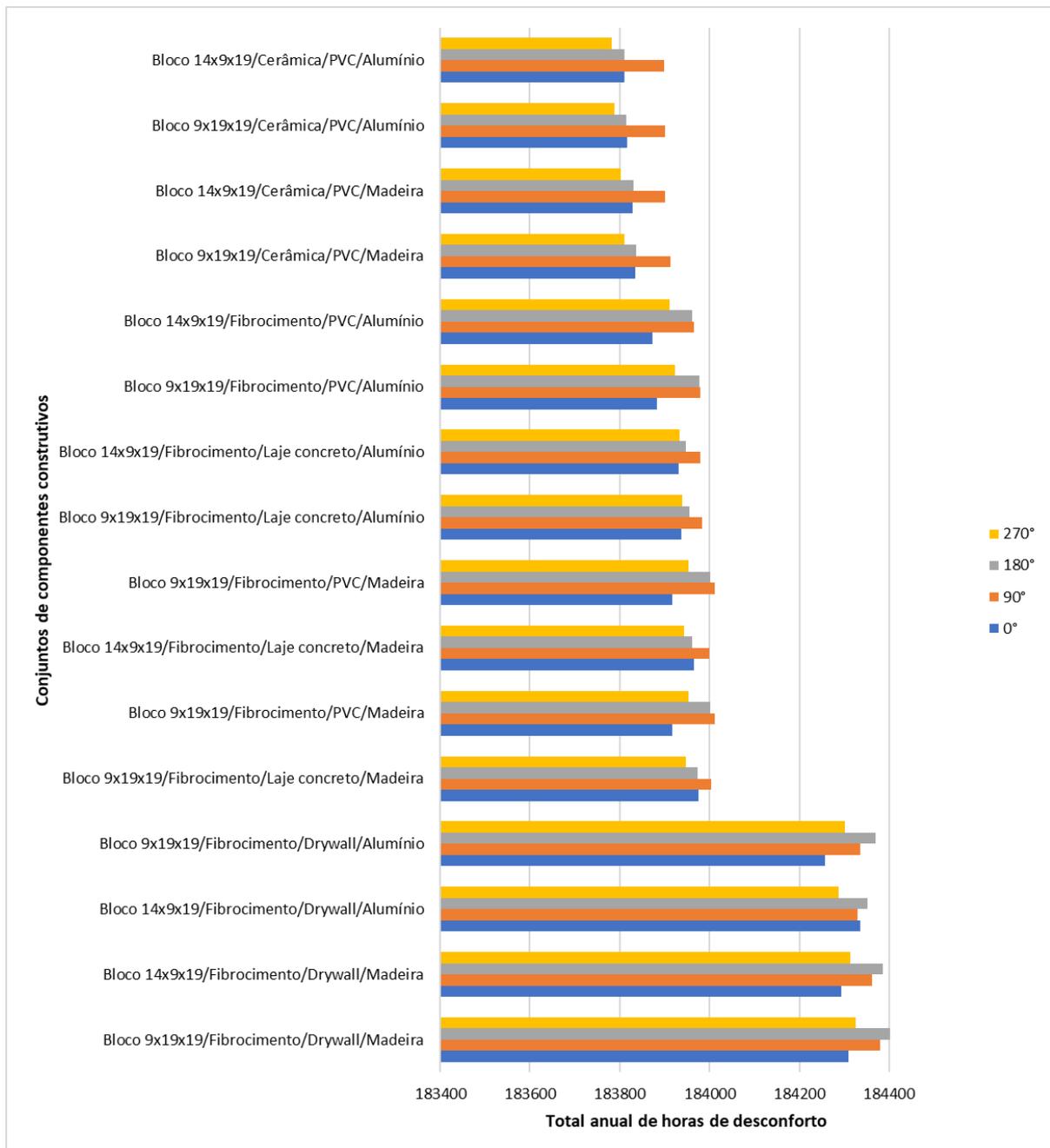
#### **4.2. Análise dos dados da simulação computacional**

Os dados obtidos por meio da simulação computacional foram avaliados pelos critérios de horas de desconforto térmico e a manutenção da temperatura ao longo do dia. A seguir apresenta-se o resultado das análises desenvolvidas.

##### **4.2.1. Horas de desconforto térmico**

Os resultados obtidos para as horas de desconforto térmico não consideram o uso de sistema de refrigeração artificial. A análise realizada considerou o total anual de horas de desconforto por edificação. A Figura 18 apresenta a soma do total de horas de desconforto para cada ambiente analisado para as quatro orientações conforme a combinação de componentes construtivos adotada.

Figura 18 – Total anual de horas de desconforto para cada conjunto de componentes construtivos conforme a orientação da edificação



Por meio da Figura 18 é possível perceber que a orientação definida como 0° apresentou a menor quantidade de horas de desconforto, em comparação com as outras orientações. Nessa orientação, as salas de aula se encontram majoritariamente na fachada sul da edificação, enquanto as salas multimídia e de informática estão posicionadas a norte. A orientação de 270° somou 6 casos em que apresentou a menor quantidade de horas de desconforto. As orientações de 90° e 180° foram as

que apresentaram mais vezes o maior número de horas de desconforto, com doze e quatorze ocorrências, respectivamente.

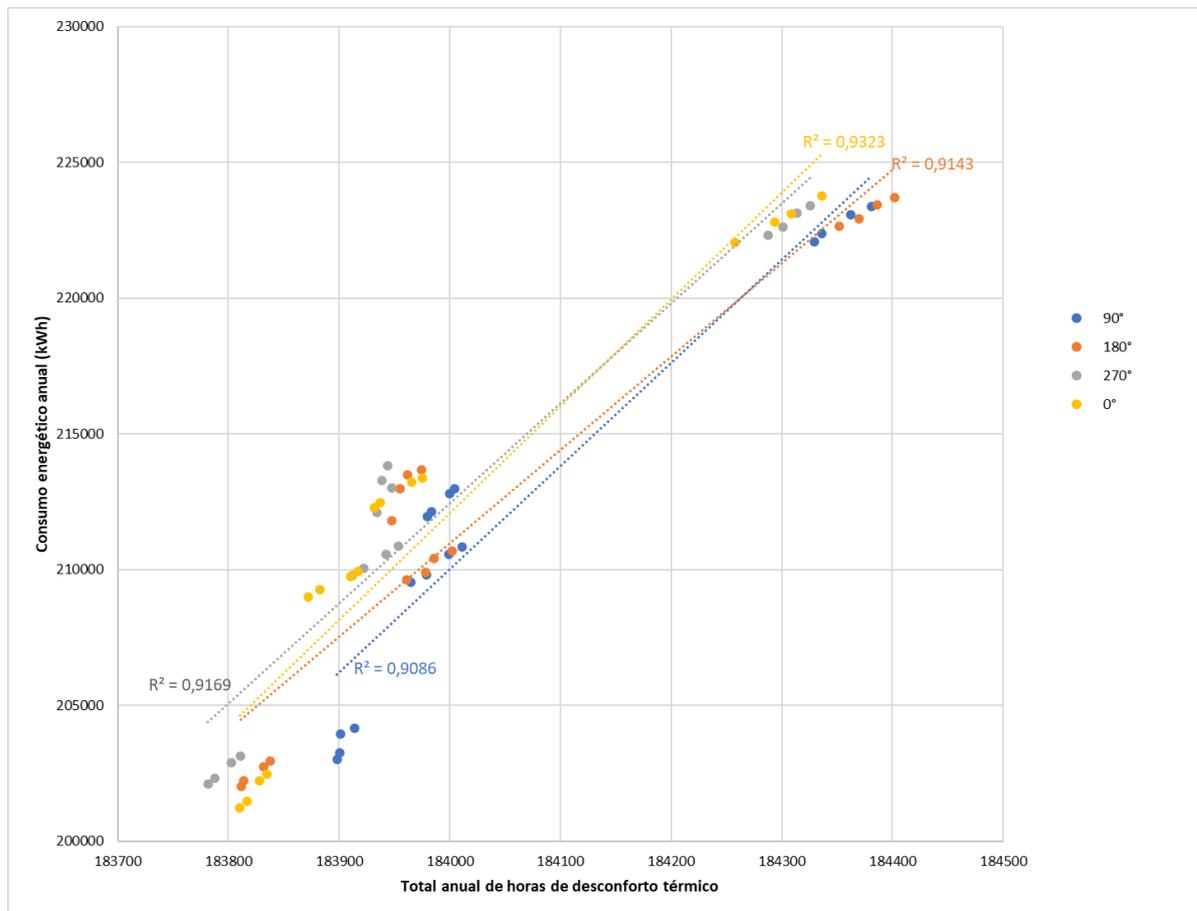
Verifica-se que as edificações com *Drywall* como elemento de forro apresentam a maior quantidade de horas de desconforto dentre os conjuntos analisados. As edificações com cobertura composta por telha cerâmica e forro de PVC apresentaram os melhores resultados. Fixando os componentes de cobertura e esquadria, o componente construtivo de parede apresentou comportamento similar para os dois casos analisados. O mesmo pode ser evidenciado para as esquadrias, com os conjuntos modelados em madeira apresentando uma quantidade um pouco maior de horas de desconforto térmico.

Ressalta-se que os únicos elementos de sombreamento considerados na análise foram as coberturas das áreas de circulação externas. Não foram modelados beirais nas coberturas, nem venezianas nas janelas.

#### **4.2.2. Consumo energético**

A análise do consumo energético levou em consideração as horas de desconforto obtidas na simulação sem adoção de sistema de refrigeração artificial, o consumo de energia anual com uso de refrigeração artificial, as combinações de componentes construtivos e as orientações de cada edificação. Na Figura 19 está apresentada a linha de tendência obtida para cada orientação ao considerar-se o consumo energético e o total de horas de desconforto térmico de cada edificação analisada.

Figura 19 – Relação do total anual de horas de desconforto e o consumo energético anual



A partir da Figura 19, percebe-se que o consumo energético entre as orientações não seguiu a mesma taxa de crescimento conforme o aumento das horas de desconforto, embora muito semelhantes. A orientação que obteve maior crescimento foi a de 0°, que apresenta a maior fachada das salas de aula orientadas a sul, e as salas multimídia e de informática orientadas a norte. A orientação com menor taxa de crescimento foi a de 270°, que tem a maior fachada das salas de aula orientadas a norte, e as salas multimídia e de informática voltadas para sul.

Por meio da análise dos dados obtidos com a simulação computacional foi possível verificar que as orientações que obtiveram maior quantidade de horas de desconforto – orientações 90° e 180° – também apresentaram maior consumo energético.

Selecionando as 20 combinações com menor (entre 201240 kWh e 209618 kWh anuais) e as 20 com maior consumo (entre 213390 kWh e 223771 kWh anuais), foi possível elencar características padrões para a redução do consumo energético ao

longo dos anos de operação da edificação. As Figuras 20 e 21 apresentam a frequência de ocorrência dos componentes construtivos das 20 combinações de edificação com menor consumo e das 20 combinações com maior consumo, respectivamente.

Figura 20 – Características das edificações com menor consumo energético anual

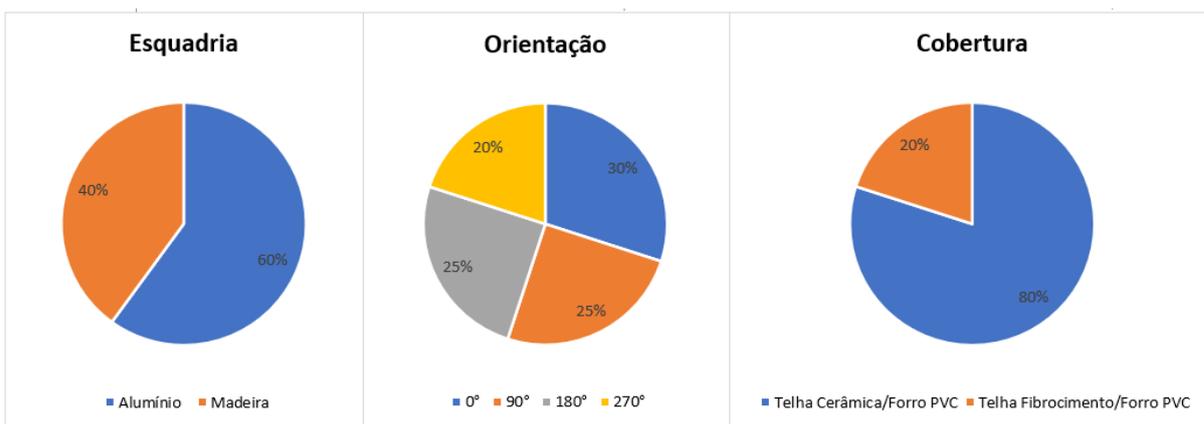
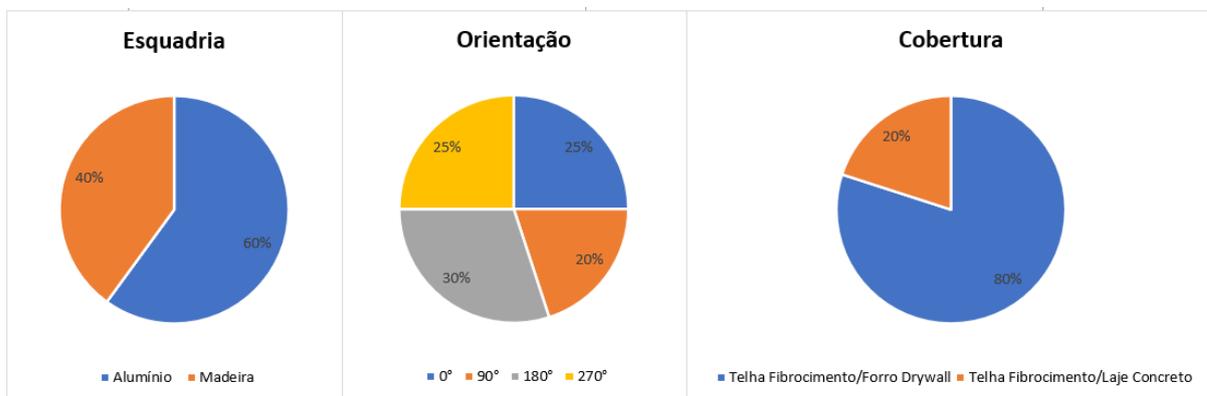


Figura 21 – Características das edificações com maior consumo energético anual



Para as edificações com menor consumo energético anual, a composição de cobertura com maior ocorrência foi a de telha cerâmica com forro de PVC, seguida pela telha de fibrocimento com forro de PVC. A orientação mais frequente foi a de 0°, enquanto a menos frequente foi a de 270°. As esquadrias em alumínio tiveram maior ocorrência que as de madeira. As paredes não apresentaram influência significativa no consumo energético.

Analisando as edificações com maior consumo energético anual, percebe-se não haver influência significativa dos elementos de parede. A composição de cobertura com maior ocorrência foi a de telha de fibrocimento com forro em *Drywall*,

seguida pela telha de fibrocimento com laje maciça de concreto. Para as esquadrias, o alumínio representou uma parcela mais significativa que a madeira. Por fim, a orientação com maior ocorrência foi a de 180°, enquanto a de menor ocorrência foi a de 270°.

Por meio das Figuras 20 e 21, percebe-se que os elementos de cobertura são os componentes construtivos com maior influência no consumo energético da edificação.

A Tabela 15 apresenta o total de horas de desconforto térmico para as estações de inverno e verão, o total para o ano inteiro, além do valor do consumo energético para os cinco conjuntos com menor consumo de energia.

Tabela 15 – Total de horas de desconforto por estação e anual e total de consumo energético anual, de aquecimento e resfriamento para as edificações com menor consumo

Conjunto	Horas de desconforto			Total
	Orientação	Verão	Inverno	
Bloco 14x9x19/Cerâmica/PVC/Alumínio	0°	93308	90502	183811
Bloco 9x19x19/Cerâmica/PVC/Alumínio	0°	93303	90514	183817
Bloco 14x9x19/Cerâmica/PVC/Alumínio	180°	93190	90622	183811
Bloco 14x9x19/Cerâmica/PVC/Alumínio	270°	93279	90502	183782
Bloco 9x19x19/Cerâmica/PVC/Alumínio	180°	93176	90638	183814
Conjunto	Consumo energético anual (kWh)			Total
	Orientação	Aquecimento	Resfriamento	
Bloco 14x9x19/Cerâmica/PVC/Alumínio	0°	25117	96906	201240
Bloco 9x19x19/Cerâmica/PVC/Alumínio	0°	25142	97104	201463
Bloco 14x9x19/Cerâmica/PVC/Alumínio	180°	24995	97795	202007
Bloco 14x9x19/Cerâmica/PVC/Alumínio	270°	24720	98167	202104
Bloco 9x19x19/Cerâmica/PVC/Alumínio	180°	25022	97987	202227

As combinações que apresentaram menores valores de consumo energético anual foram aqueles compostos por cobertura de telha cerâmica e forro de PVC e esquadrias em alumínio, variando o componente construtivo de parede. Ressalta-se a adoção de vidro comum em todas as janelas. A orientação das cinco edificações analisadas seguiu o padrão obtido para as horas de desconforto térmico, com as orientações de 0° e de 270° apresentando os menores valores.

Os resultados obtidos estão em concordância com os estudos realizados por Azevedo (1995). A edificação orientada a 0° e 270° apresenta as salas de aula nos

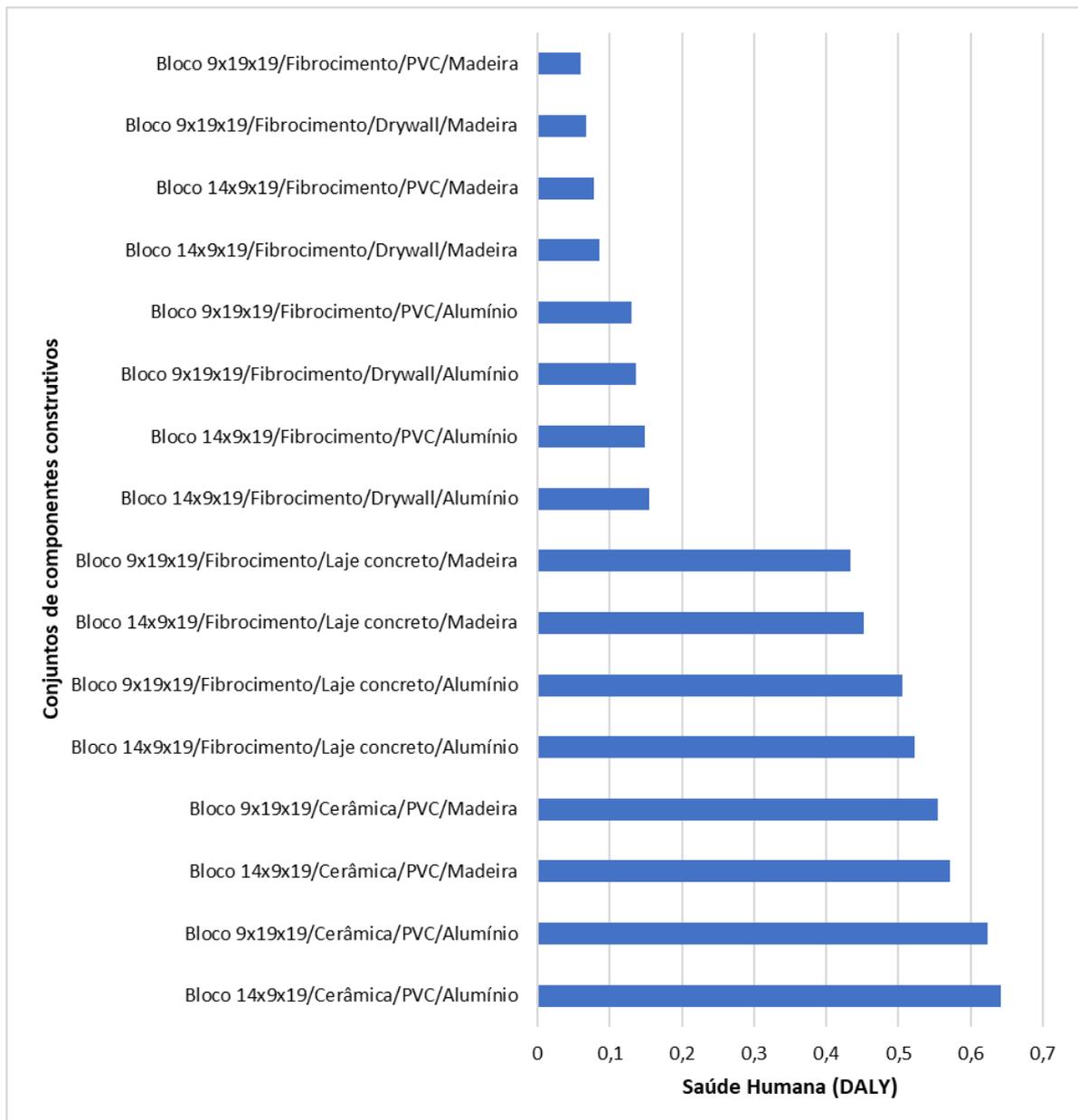
planos norte e sul, classificando-as como as mais convenientes, pois reduzem a exposição ao sol

### **4.3. Interpretação dos dados de impacto ambiental da análise do ciclo de vida**

#### **4.3.1. Categorias de dano**

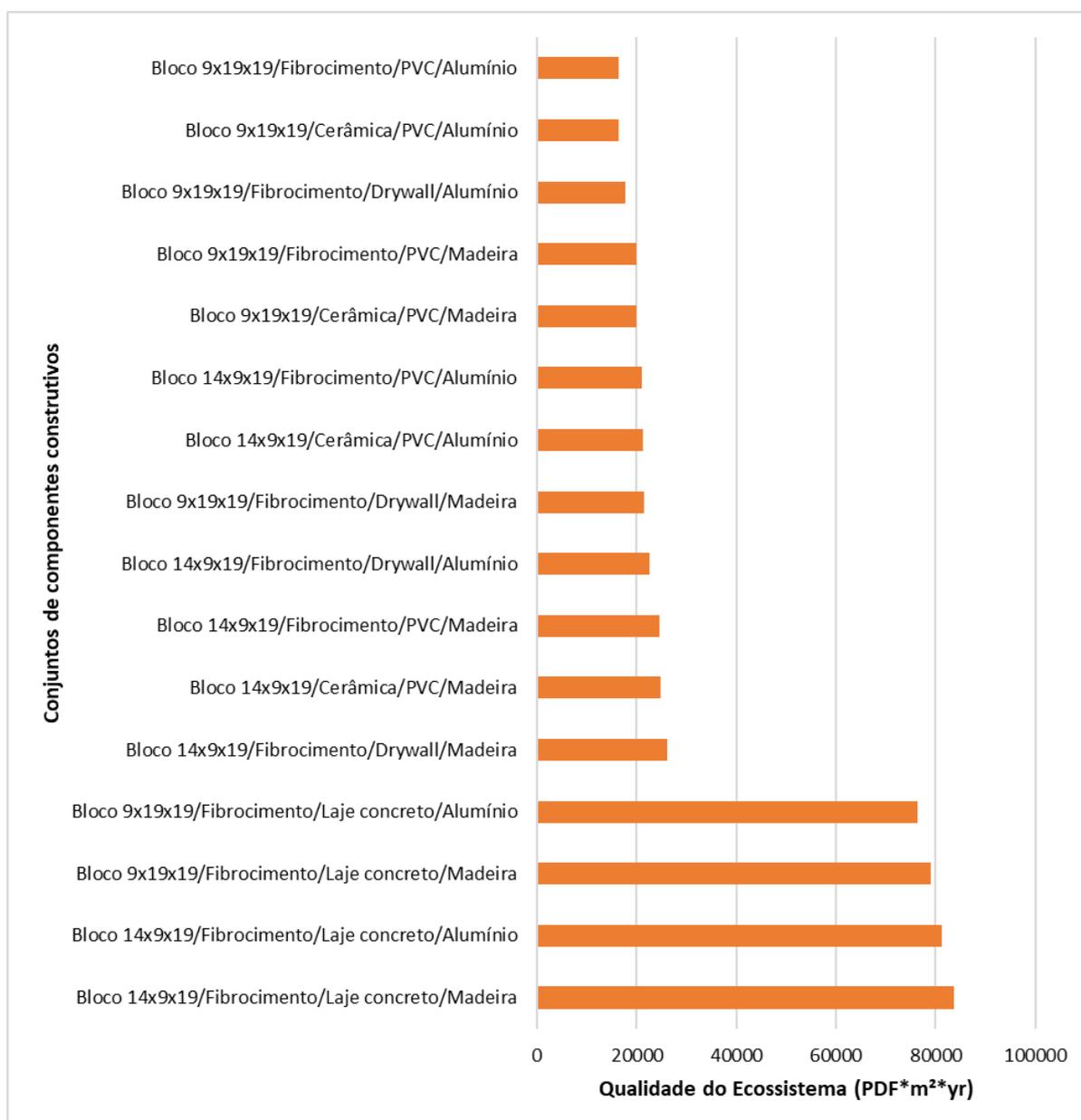
Inicialmente, o impacto ambiental utilizado para as categorias de dano é referente à construção da edificação. As Figuras 22 a 25 apresentam os valores de impacto para as 16 combinações de componentes construtivos avaliados em cada categoria de dano. Como somente os materiais foram avaliados nessa etapa, a orientação das edificações não foi avaliada.

Figura 22 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção na categoria de dano de saúde humana



Para a categoria de dano de saúde humana, percebe-se que, dentre os componentes de parede, o bloco cerâmico de 9x19x19 obteve os menores valores de impacto. Entretanto, os valores obtidos são próximos aos do bloco cerâmico de 14x9x19. Para as esquadrias, houve pequena variação entre os valores, com predominância de menor impacto para as de madeira. Entre as coberturas, a telha cerâmica e a de fibrocimento apresentaram grande diferença, com maior impacto para a telha cerâmica. Os forros de *Drywall* e PVC não apresentaram variação significativa, enquanto a laje maciça de concreto representa impacto intenso.

Figura 23 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção na categoria de dano de qualidade do ecossistema



Para a categoria de dano de qualidade do ecossistema, percebe-se o intenso impacto do uso de laje maciça de concreto. Entre as paredes e esquadrias não foi evidenciada grande influência no impacto.

Figura 24 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção na categoria de dano de mudanças climáticas

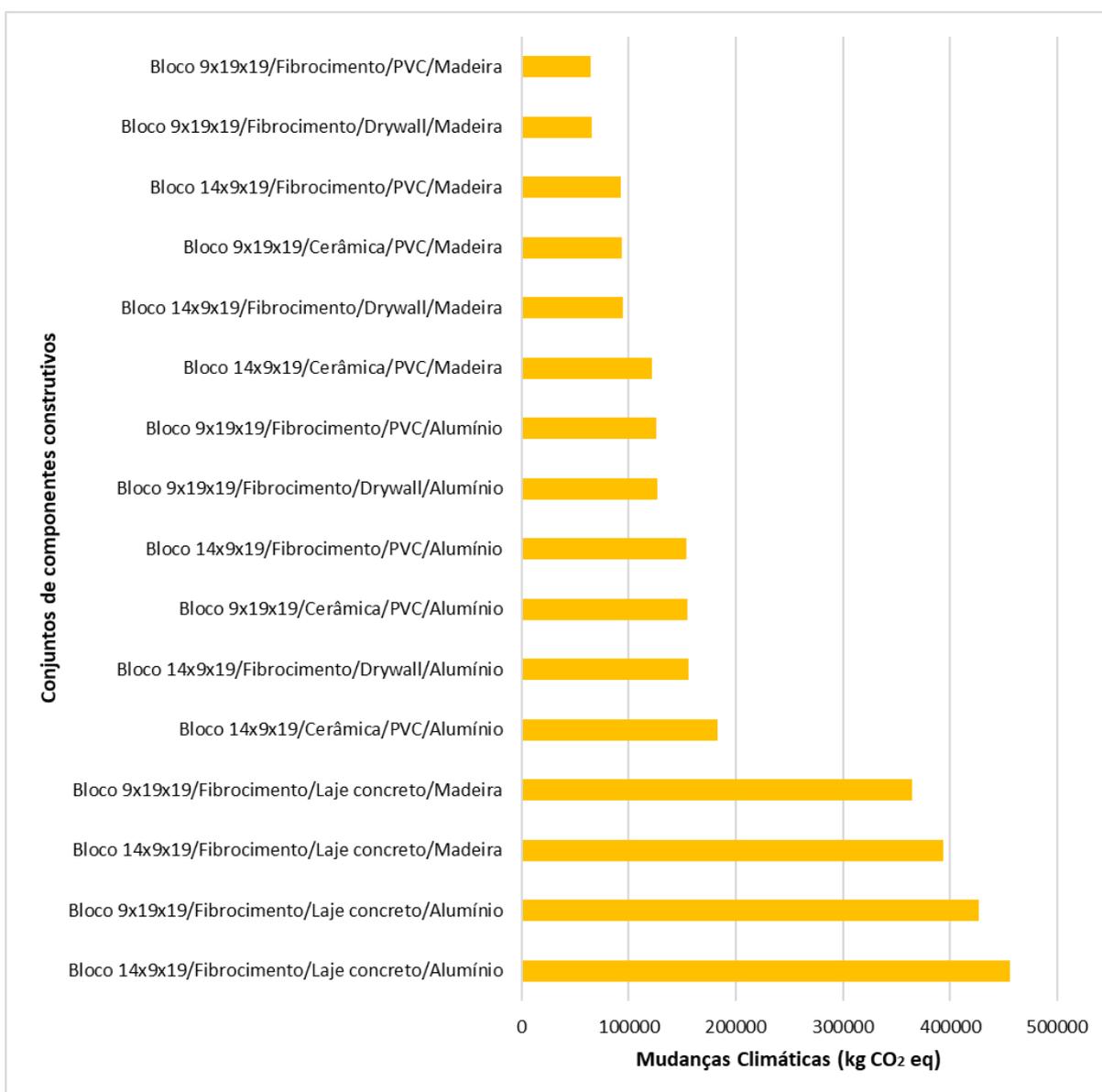
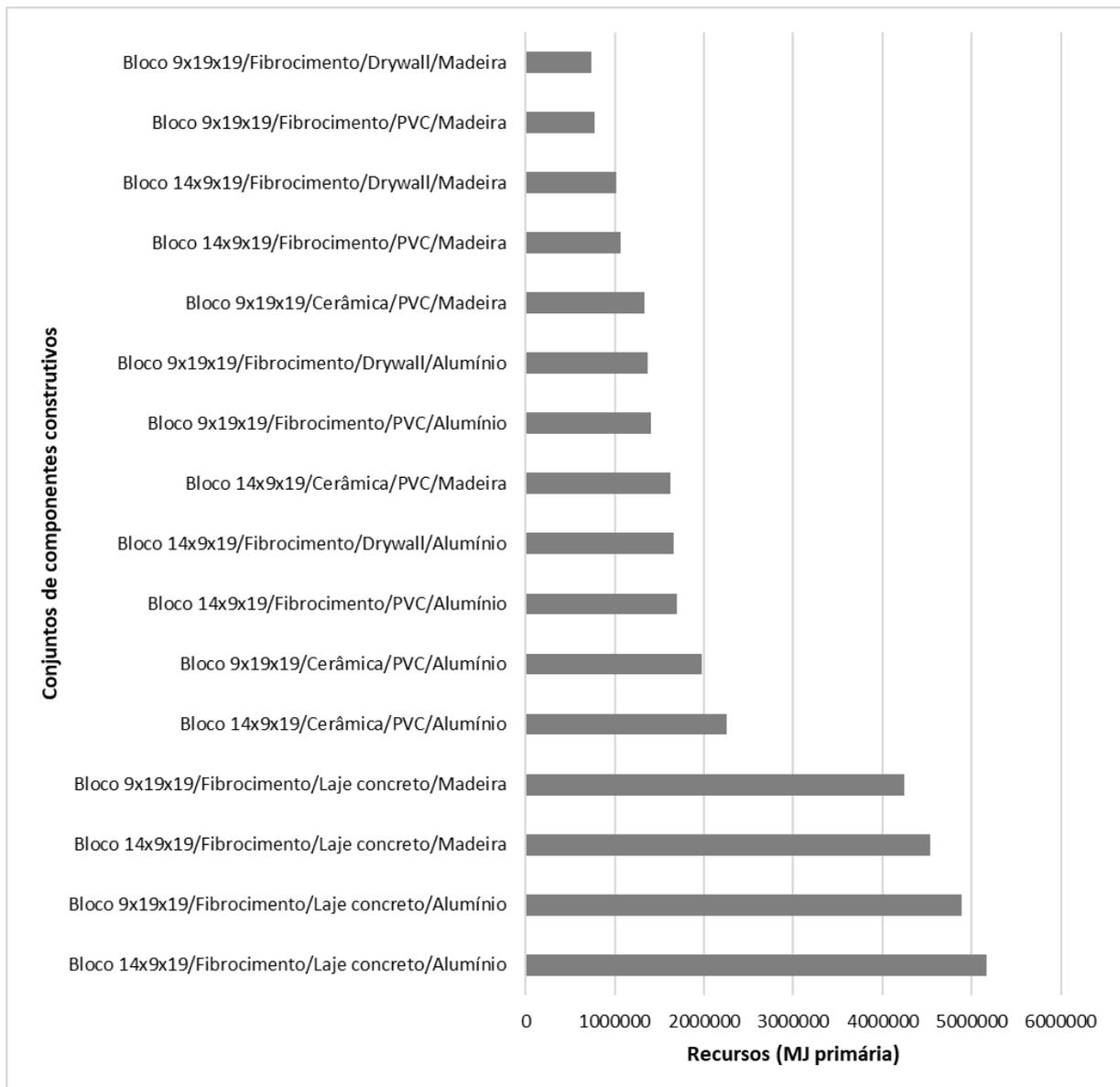


Figura 25 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção na categoria de dano de recursos



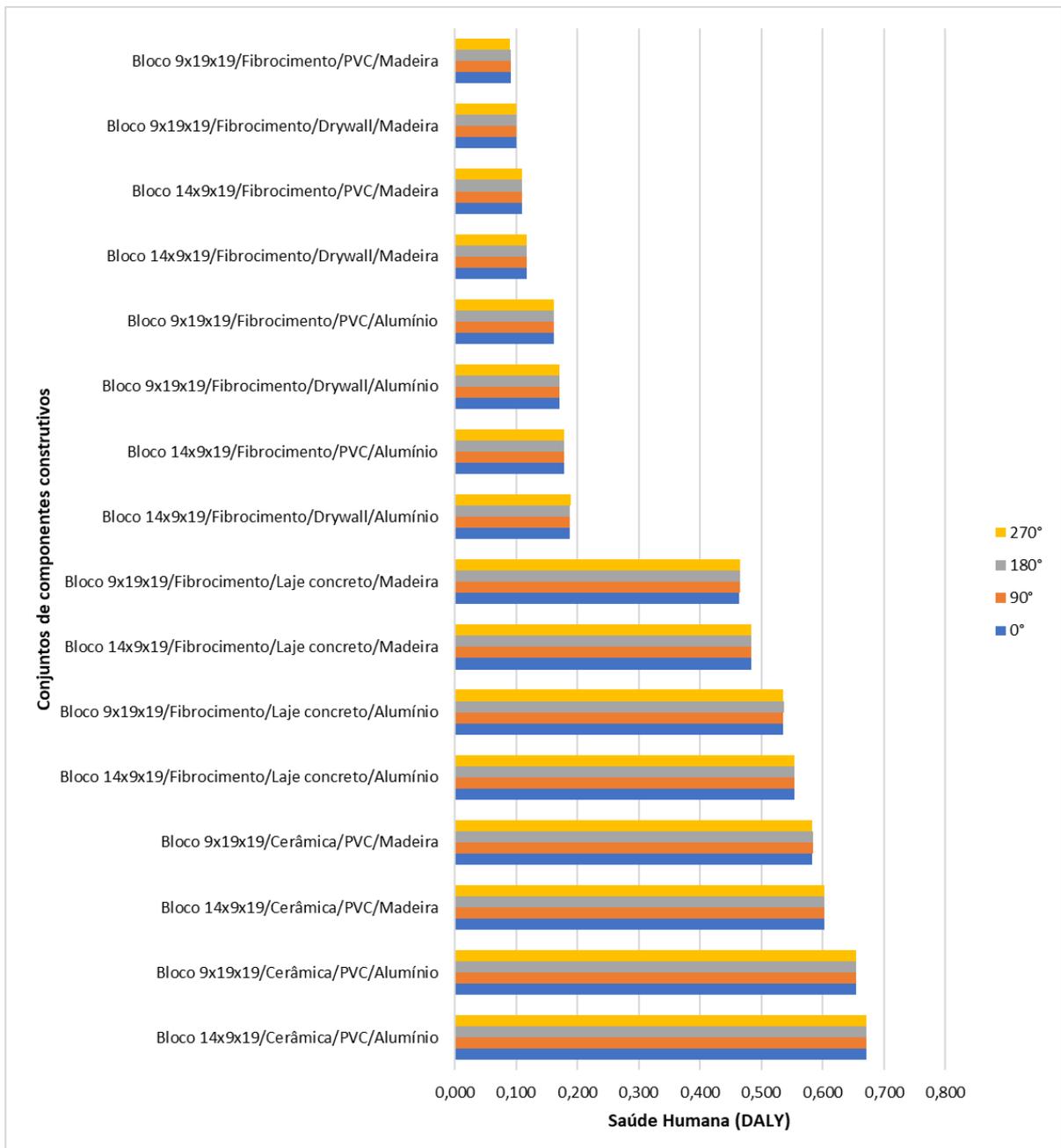
Para as categorias de dano de mudanças climáticas e recursos, o padrão observado é semelhante ao obtido para a qualidade do ecossistema, com influência significativa do uso da laje e pouca variação entre os outros componentes construtivos.

Dentre os componentes construtivos analisados, é nítido o impacto agregado à edificação pelo uso de cimento e de aço, empregados na construção da laje maciça de concreto. Nas paredes, os blocos cerâmicos de 9x19x19 apresentaram menor impacto. Para as esquadrias, o alumínio prevaleceu com os maiores valores. No

entanto, tanto para as paredes quanto para as esquadrias, a variação dos valores de impacto foi baixa.

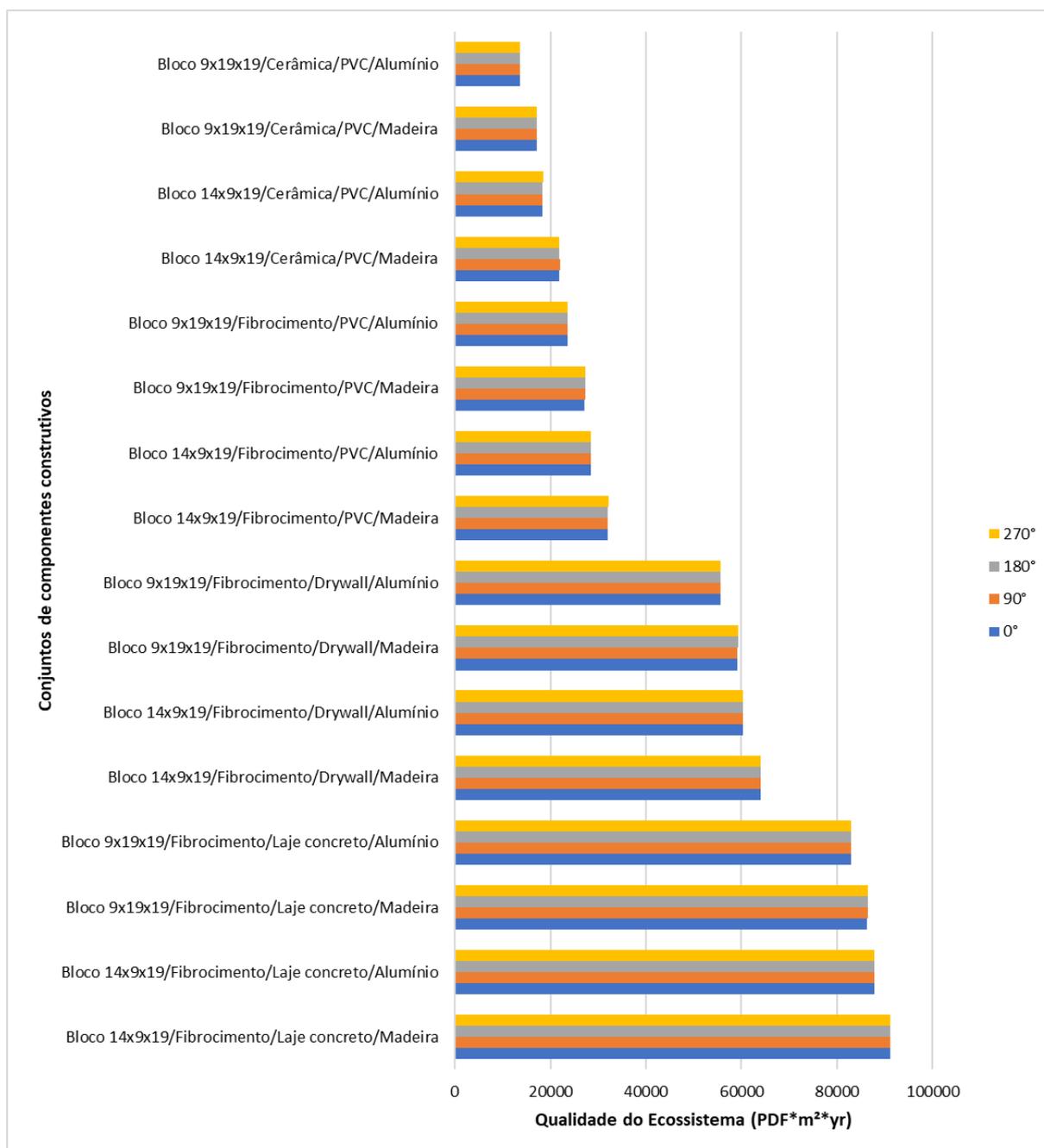
Em seguida, também foram consideradas a orientação e o consumo energético para o primeiro ano de uso da edificação, além dos materiais de construção. As Figuras 26 a 29 apresentam os resultados obtidos para as categorias de dano de saúde humana, qualidade do ecossistema, mudanças climáticas e recursos, respectivamente.

Figura 26 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção e o primeiro ano de operação na categoria de dano de saúde humana



Para a categoria de dano de saúde humana, as paredes compostas pelo bloco cerâmico de dimensões 9x19x19 apresentaram menor impacto ambiental que as de bloco cerâmico de dimensões 14x9x19. Dentre os componentes de esquadria, o alumínio representa maior impacto à saúde humana. Para os componentes de cobertura, as telhas cerâmicas e a laje maciça de concreto obtiveram impacto significativamente maior em relação às outras. Percebe-se a influência da fabricação dos materiais mesmo levando em consideração o consumo energético no primeiro ano de operação da edificação. As orientações apresentaram variações mínimas entre si provenientes apenas do consumo energético, tendo em vista que a composição das edificações não sofre alterações na comparação entre as orientações.

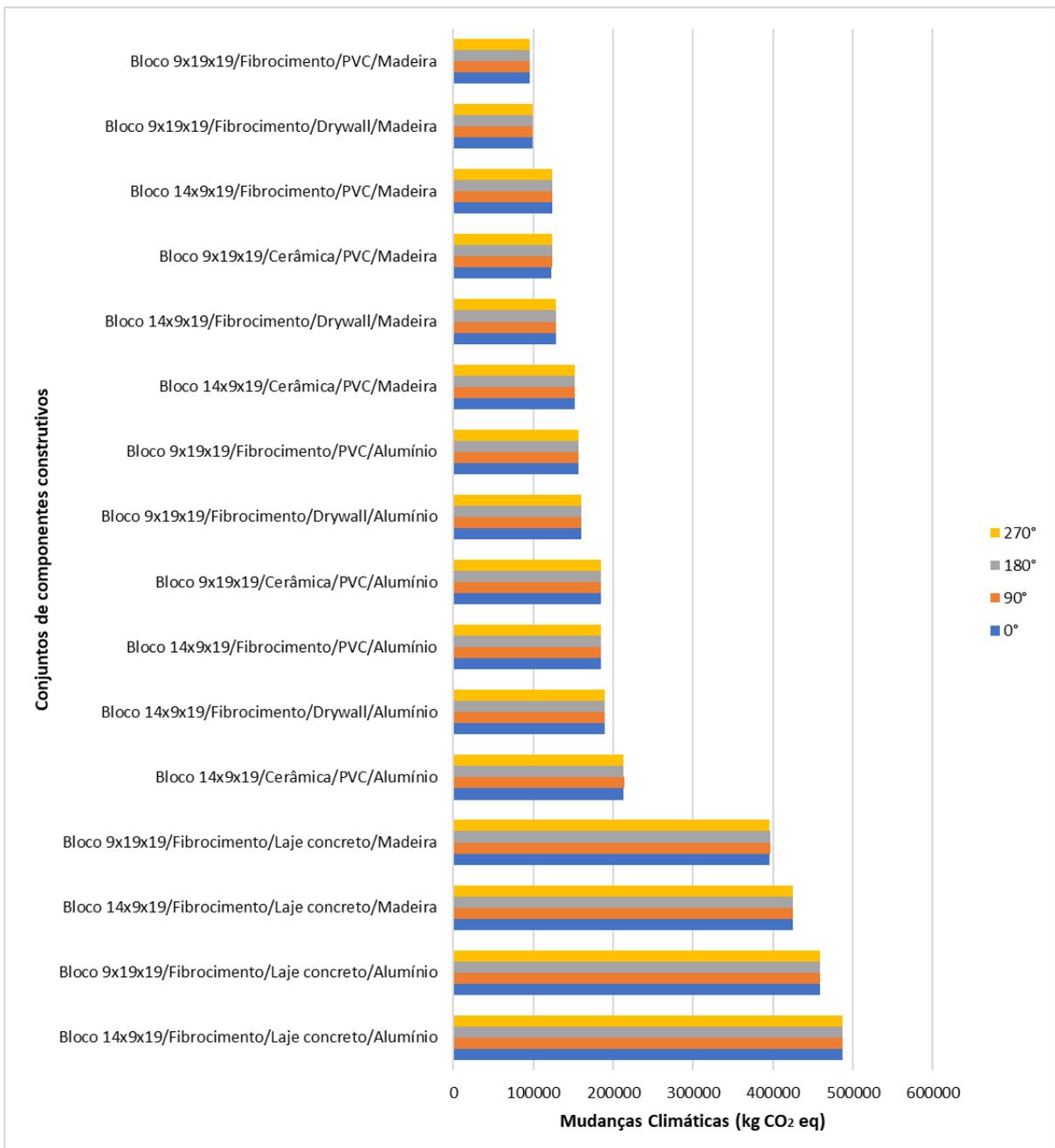
Figura 27 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção e o primeiro ano de operação na categoria de dano de qualidade do ecossistema



Na categoria de dano da qualidade do ecossistema se torna evidente o prevalectimento do consumo energético no impacto gerado. A diferença de valor entre os componentes de esquadria é baixa, com menor impacto para o alumínio. As paredes apresentam pequena variação entre si, com as compostas por bloco cerâmico de dimensões 14x9x19 apresentando maior impacto. Por outro lado, a

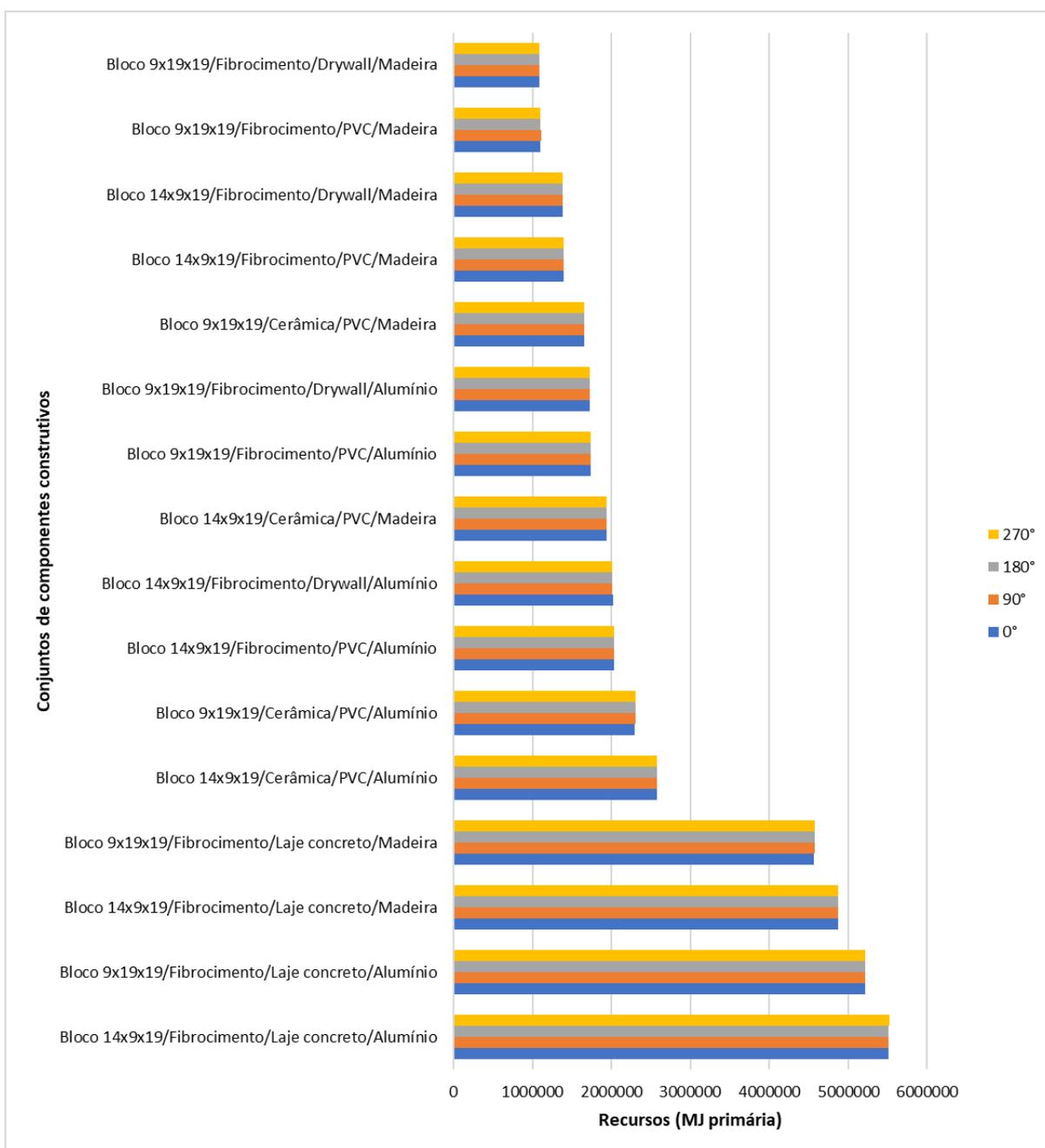
variação entre os componentes construtivos de cobertura segue o padrão revelado no consumo energético, para o qual a adoção de telhas cerâmicas com forro de PVC apresentou diminuição de valor em relação às outras coberturas.

Figura 28 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção e o primeiro ano de operação na categoria de dano de mudanças climáticas



Para as paredes e orientações, o padrão apresentado segue o mesmo obtido para as categorias de dano analisadas anteriormente. Ao analisar as esquadrias, percebe-se variação entre a madeira e o alumínio, tendo o alumínio o maior impacto. Para as coberturas, prevaleceu o maior impacto para as combinações com laje maciça de concreto. A influência do consumo energético é baixa, característica perceptível ao realizar comparação com os resultados da análise inicial, que considerou somente a construção da edificação.

Figura 29 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção e o primeiro ano de operação na categoria de dano de recursos



Para a categoria de dano de recursos, observa-se o mesmo padrão obtido anteriormente para os componentes construtivos de parede e para as orientações. As esquadrias em madeira apresentaram os menores valores de impacto. As coberturas compostas por laje maciça de concreto seguiram apresentando os maiores valores de impacto dentre os componentes construtivos de cobertura.

Apesar de somente o consumo energético do primeiro ano de operação ter sido considerado, as alterações no valor das categorias de dano, principalmente de qualidade do ecossistema, realçam a importância do desenvolvimento de simulações computacionais ou de medições de consumo energético para a operação da edificação.

As Figura 30 a 33 apresentam os valores de impacto obtidos para as quatro categorias de dano ao considerar-se a construção e a operação da edificação ao longo de sua vida útil, 50 anos.

Figura 30 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção na categoria de dano de saúde humana ao longo da vida útil

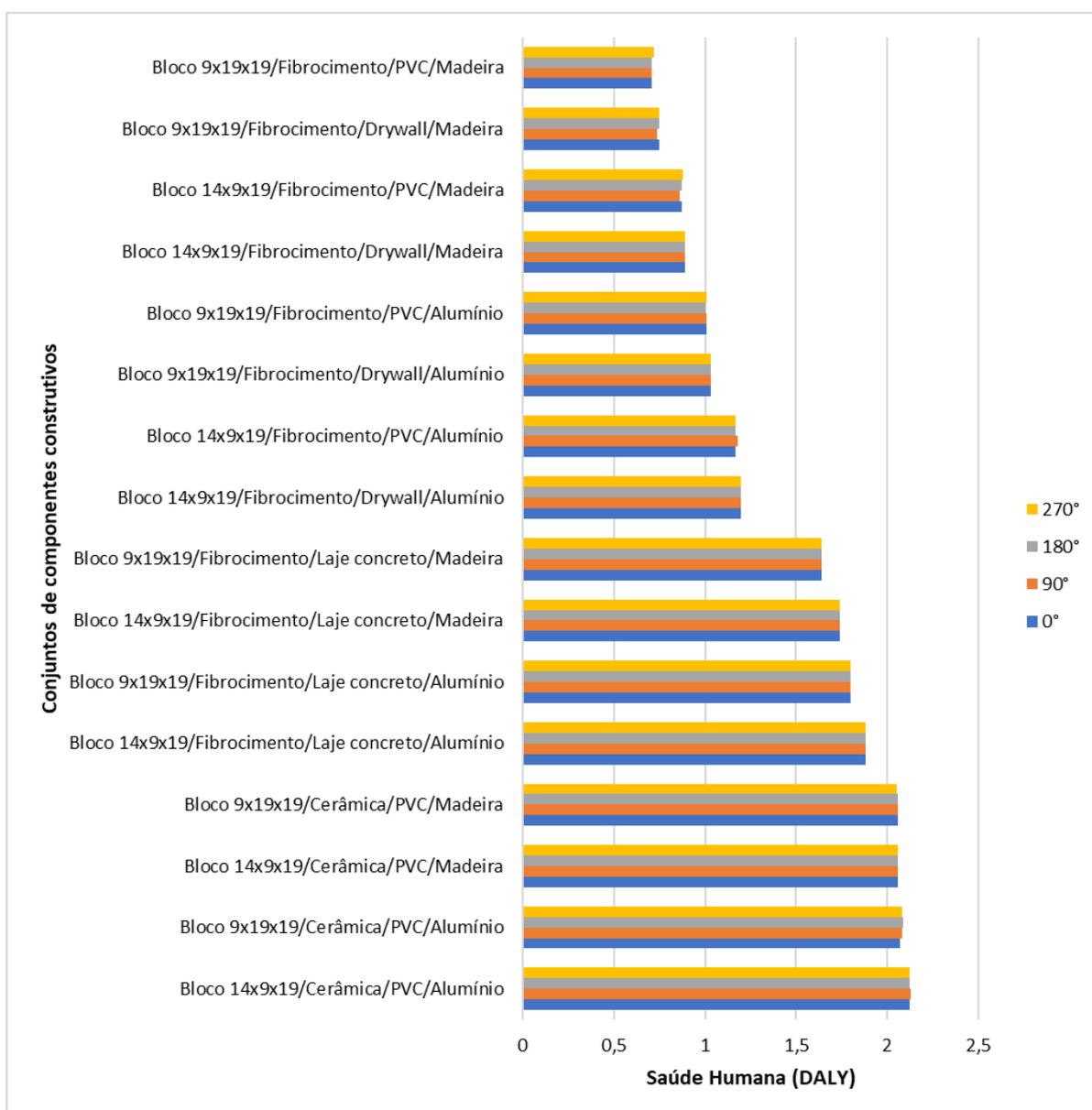


Figura 31 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção na categoria de dano de qualidade do ecossistema ao longo da vida útil

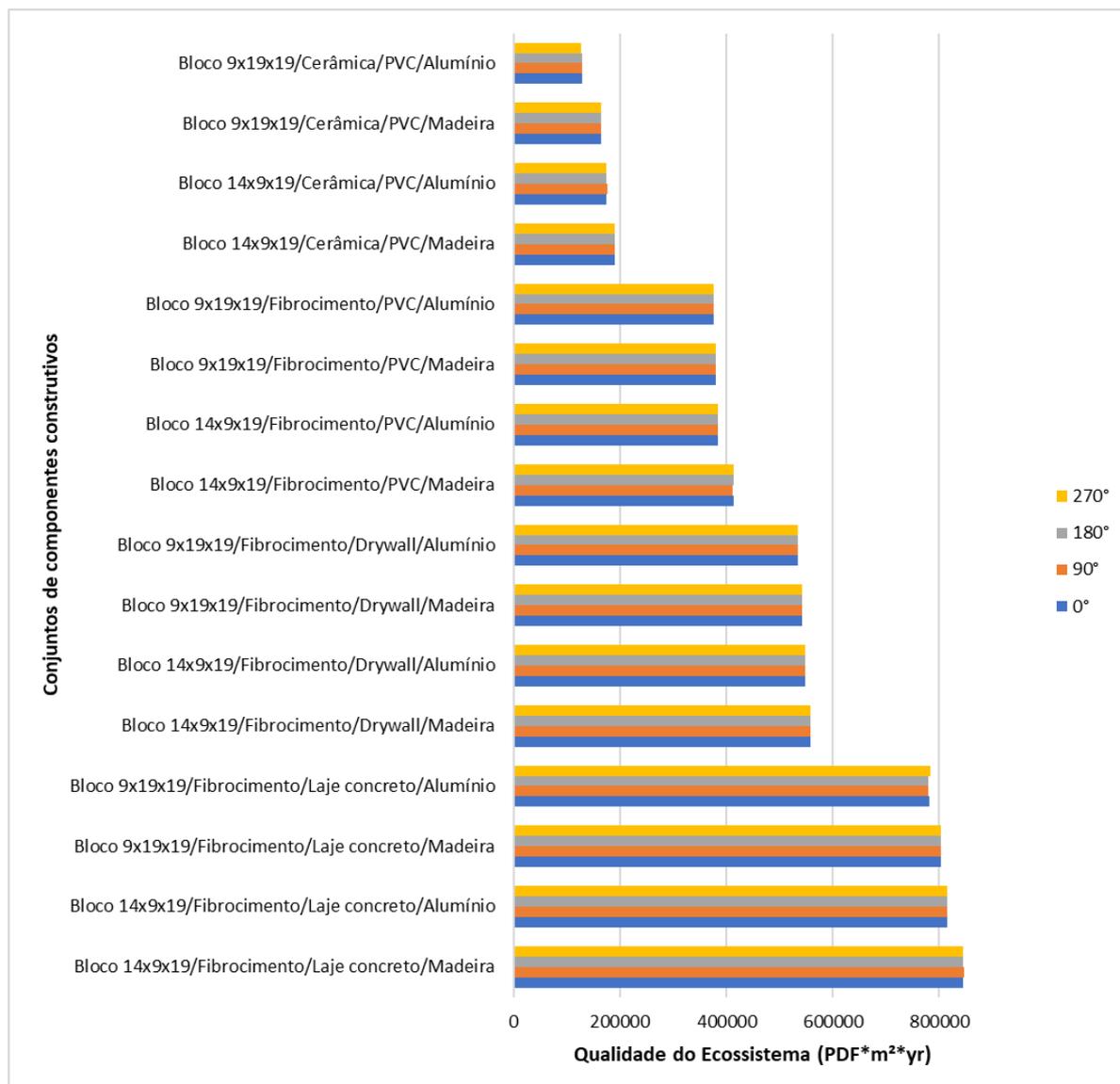


Figura 32 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção na categoria de dano de mudanças climáticas ao longo da vida útil

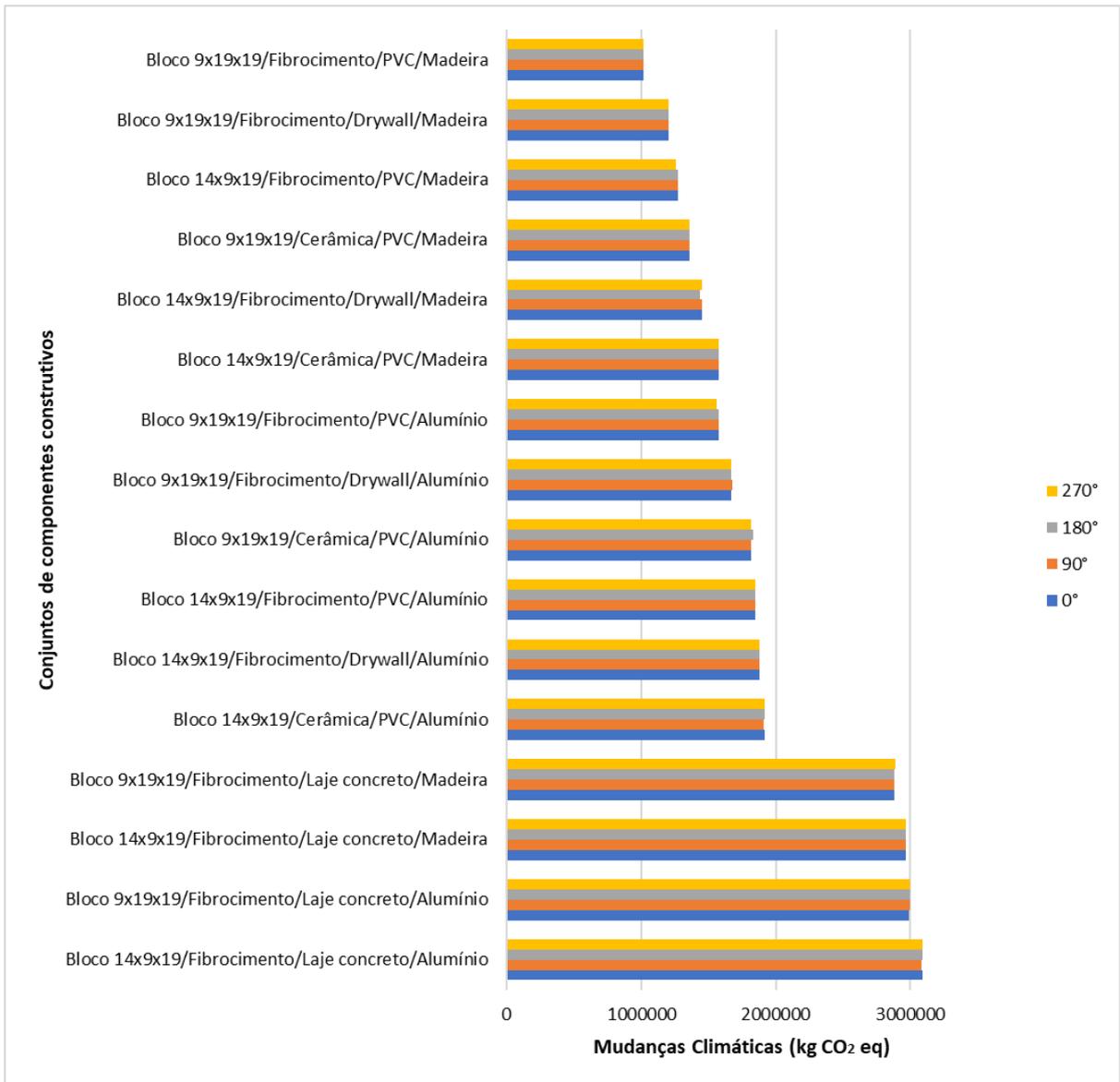
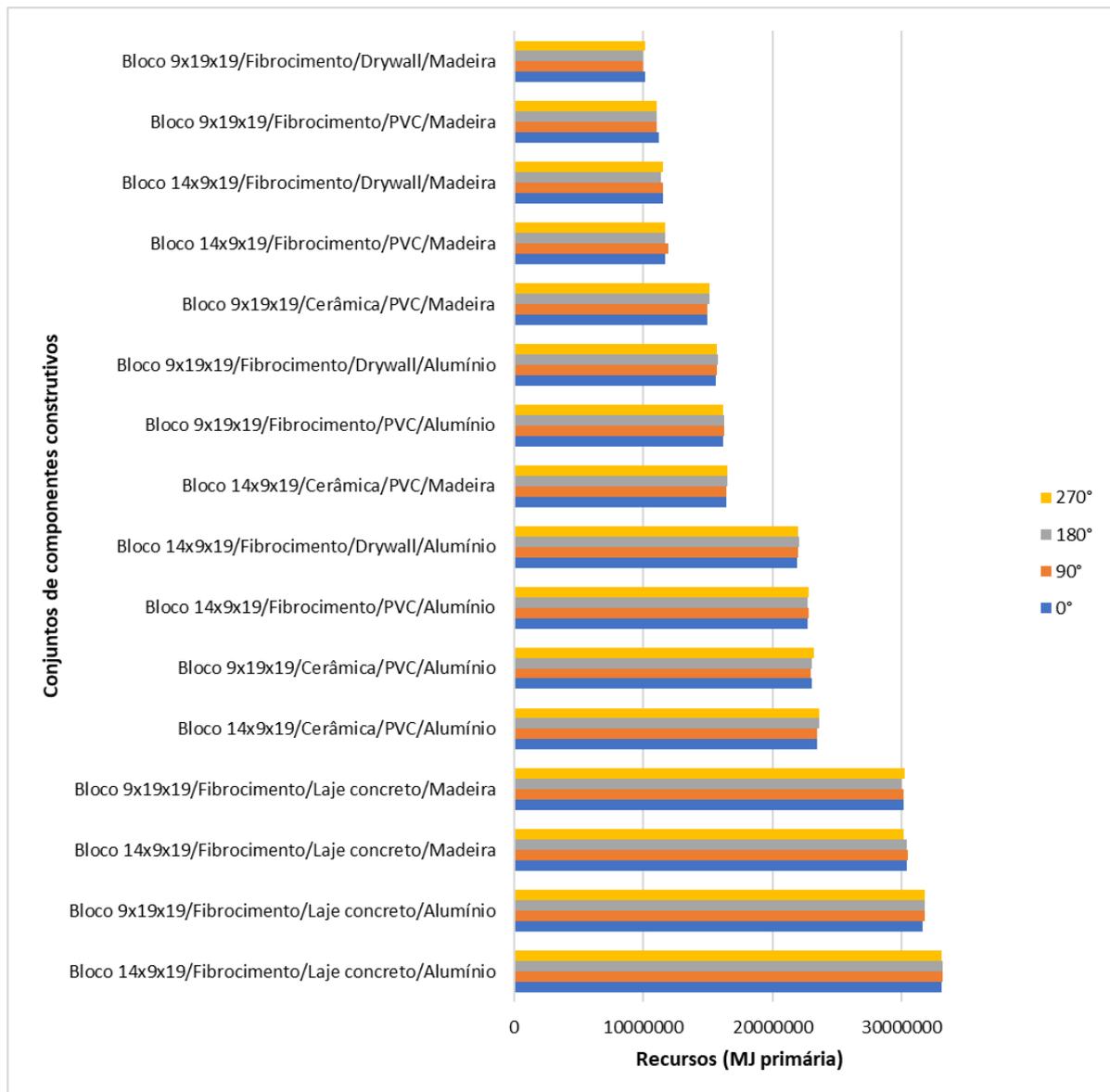


Figura 33 – Valores de impacto para todas as edificações considerando a construção na categoria de dano de recursos ao longo da vida útil

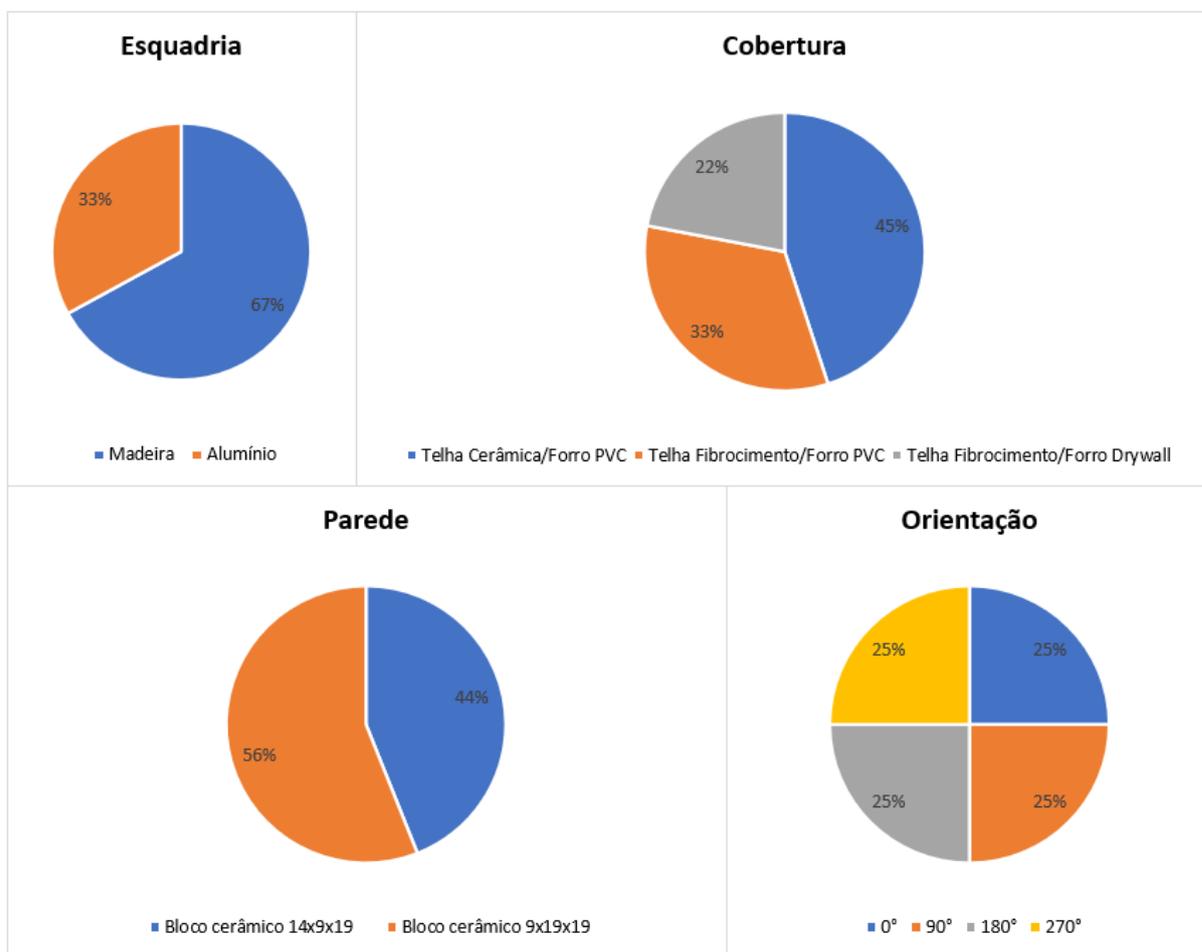


Ao considerar 50 anos de consumo energético para a edificação, percebe-se que o padrão das categorias de dano é semelhante ao obtido para o cenário de um ano de consumo. Essa característica indica o grande impacto da etapa de fabricação dos materiais na análise do ciclo de vida, demonstrando que esta etapa não deve ser desconsiderada durante a análise. Os resultados obtidos vão de encontro aos trabalhos de Rashid e Yusoff (2015) e Van Ooteghem e Xu (2012), que afirmam existir pequeno impacto ambiental na ACV causado pela fase de construção.

Todas as combinações de componentes construtivos e orientações que apareceram pelo menos uma vez entre as 20 edificações com menor valor de impacto

para cada categoria de dano foram selecionadas. Assim, destacam-se 36 combinações. A Figura 34 apresenta a frequência de ocorrência de cada componente construtivo e de cada orientação para as edificações selecionadas.

Figura 34 – Frequência de ocorrência por componente construtivo e orientação das edificações com menor valor de impacto nas categorias de dano



Apesar da maior frequência para as paredes compostas por blocos cerâmicos de dimensões 9x19x19, não houve destaque significativo para nenhum componente construtivo de parede. Percebe-se que a orientação não influencia no impacto, enquanto para as esquadrias, a madeira tem influência positiva. Para os componentes construtivos de cobertura, a combinação de telha cerâmica com forro de PVC apresentou maior ocorrência, seguida pela telha de fibrocimento com forro de PVC e a telha de fibrocimento com forro de *Drywall*. As coberturas com laje maciça de concreto não apareceram nenhuma vez entre as combinações com menor valor de impacto.

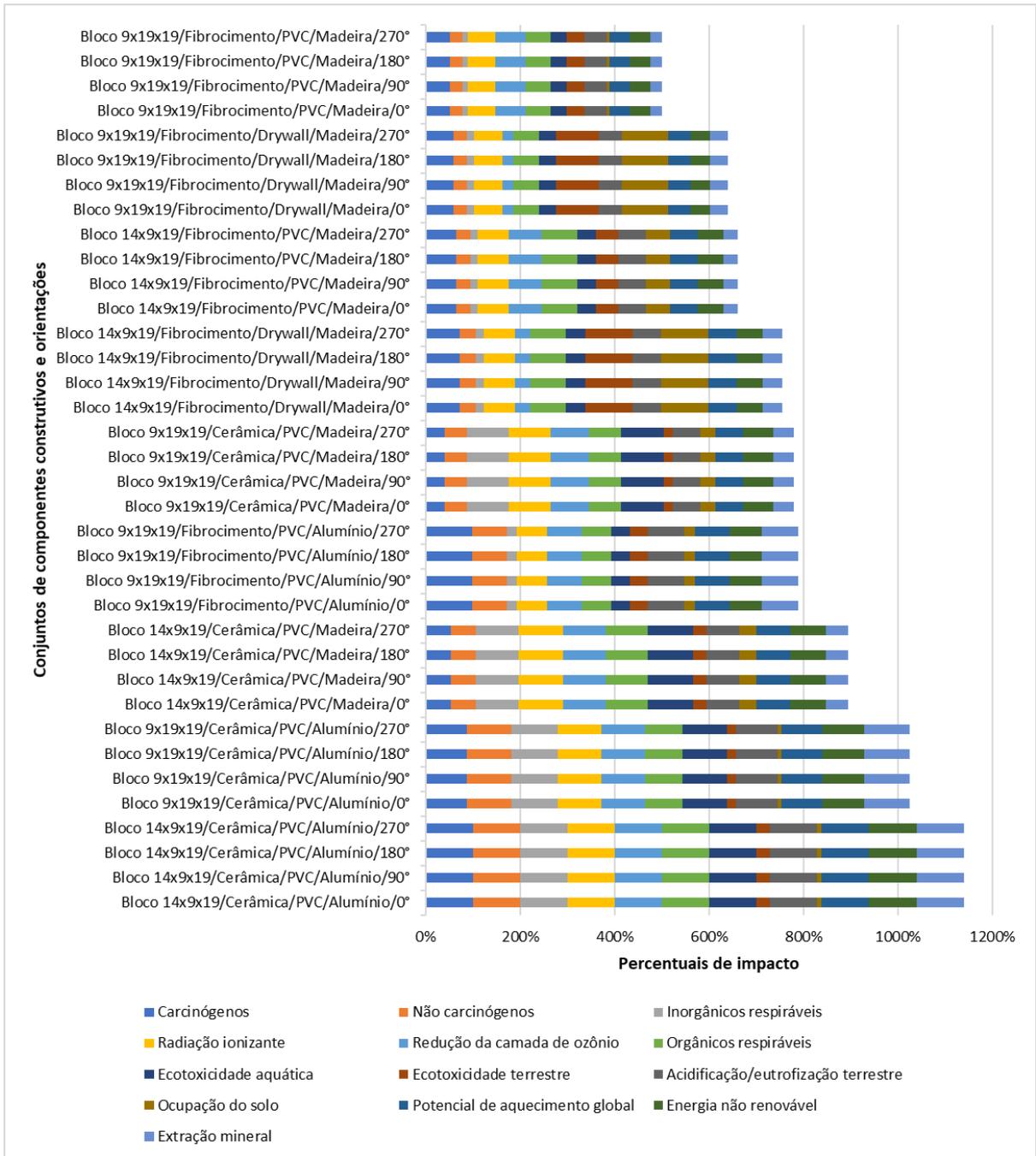
Os resultados alcançados validam a análise realizada por Medeiros, Durante e Callejas (2018). As coberturas com uso de laje maciça de concreto para vedação horizontal da edificação ocasionaram grande variação no impacto ambiental. No momento de construção da edificação, a laje maciça aumenta significativamente o impacto no ciclo de vida, sendo assim o sistema de cobertura o mais impactante dentre os componentes construtivos analisados.

As combinações selecionadas e os valores obtidos para cada categoria de dano são apresentados na Tabela 27 do APÊNDICE C. Esses conjuntos foram enfim utilizados para analisar as categorias de impacto, cujas demonstrações são apresentadas a seguir.

#### **4.3.2. Categorias de impacto**

As Figuras 36 a 39 do APÊNDICE D apresentam o valor absoluto em cada categoria de dano acrescido por cada categoria de impacto. A Figura 35 apresenta o resultado da soma dos percentuais de cada categoria de impacto.

Figura 35 – Soma dos percentuais de impacto para cada edificação analisada



O conjunto de componentes construtivos que apresentou menor valor de impacto com a avaliação do ciclo de vida considerando a construção e um ano de operação da edificação foi o composto por paredes de bloco cerâmico de dimensões 9x19x19, esquadrias de madeira e cobertura com telha de fibrocimento e forro de PVC. Não houve variação entre os valores de impacto para as diferentes orientações analisadas. A segunda combinação com menor valor de impacto no ciclo de vida apresentou variação somente na cobertura em relação ao anterior, sendo o forro de

*Drywall* no lugar do PVC. Ressalta-se a adoção de vidro comum em todas as janelas. Nenhum dos conjuntos citados obteve maior destaque dentre as edificações com menor consumo energético. Assim, evidencia-se a importância da consideração do ciclo de vida da edificação quando se busca o desenvolvimento de um projeto com baixo impacto ambiental.

## 5. Conclusão

### 5.1. Conclusões gerais

O desenvolvimento deste estudo possibilitou a análise do ciclo de vida de diferentes conjuntos de parede, esquadria e cobertura. A simulação computacional desenvolvida possibilitou a avaliação do desempenho térmico das edificações ao longo de sua vida útil e sua correlação com os materiais e orientações empregados.

Através da simulação computacional das edificações, foram obtidos dados referentes ao total de horas anuais de desconforto e ao consumo energético por edificação. Foi realizada uma análise do total de horas de desconforto, permitindo a comparação de desempenho entre as quatro orientações. Aquelas que apresentaram menor quantidade de horas de desconforto foram as que tiveram as salas de aula, salas multimídia e de informática orientadas a norte e a sul.

Ao relacionar as horas de desconforto com o consumo energético anual da edificação, observou-se que ocorreu variação no consumo de energia entre as diferentes orientações, mesmo quando as horas de desconforto apresentavam valores equivalentes. Essa variação é atribuída principalmente ao afastamento das temperaturas em relação à zona de conforto estabelecida. A contagem das horas de desconforto possibilita uma análise quantitativa, mas não estabelece uma relação direta com o consumo energético, uma vez que não identifica a intensidade das temperaturas analisadas.

Examinando o consumo energético, constatou-se que a combinação de componentes construtivos que registrou menor valor de consumo anual foi a composta por parede de bloco cerâmico de dimensões 14x9x19, esquadrias de alumínio e cobertura com telha cerâmica e forro de PVC. Sua orientação foi de 0°, que apresenta a maior fachada das salas de aula orientadas a sul, e as salas multimídia e de informática orientadas a norte.

A avaliação do ciclo de vida foi conduzida mediante três diferentes cenários: a construção da edificação, a construção e operação do primeiro ano de operação, e a construção e operação ao longo da vida útil da edificação, 50 anos. A análise dos diferentes cenários para o ciclo de vida revelou que o impacto ambiental, mesmo quando considerado todo o ciclo de vida útil, é fortemente influenciado pelos materiais

empregados na construção da edificação, levando em consideração a produção de energia na matriz energética brasileira.

A interpretação dos dados obtidos com o desenvolvimento da análise do ciclo de vida possibilitou a identificação de tendências entre os componentes construtivos analisados. Para as paredes, a composta por blocos cerâmicos de dimensões 9x19x19 apresentou menor impacto ao longo do ciclo de vida, enquanto a parede de blocos cerâmicos de dimensões 14x9x19 apresentou resultados próximos. Assim, não houve destaque significativo para nenhum componente construtivo de parede. Quanto às esquadrias, a esquadria de madeira apresenta menor impacto no ciclo de vida. Quanto às coberturas, a combinação de telha cerâmica com forro de PVC apresentou os menores valores de impacto, seguida pela telha de fibrocimento com forro de PVC e a telha de fibrocimento com forro de *Drywall*. As coberturas com uso de laje maciça de concreto para vedação horizontal da edificação tiveram grande variação no impacto ambiental. No momento de construção da edificação, a laje maciça aumenta significativamente o impacto no ciclo de vida.

Através da análise realizada, considerando inicialmente as categorias de dano e subsequentemente as categorias de impacto, foi determinado o conjunto de componentes construtivos que apresentou o menor impacto ao longo do ciclo de vida para uso em instituições públicas de ensino na Grande Florianópolis. Esta seleção levou em conta tanto a fase de construção quanto o primeiro ano de operação da edificação. O conjunto escolhido é composto por parede de bloco cerâmico de dimensões 9x19x19, esquadria de madeira e vidro comum e cobertura com telha de fibrocimento e forro de PVC.

## **5.2. Limitações do estudo**

Os objetivos do estudo foram atingidos, apesar de terem sido identificadas algumas limitações. Foram elas:

- Simplificação das análises: a abrangência e estudo de diversos tópicos para a realização do estudo acarretou no desenvolvimento de análises de forma simplificada, resultando em dados com limitações de aplicação;

- Imprecisão de dados: a falta de precisão nos dados do arquivo climático usado para simulação e a imprecisão ao considerar o consumo energético ao longo da vida útil foram reconhecidas como limitações;
- Inexistência de padrão: a inexistência de padronização na modelagem da edificação para a simulação e na uniformidade dos dados utilizados para o desenvolvimento do inventário dos componentes construtivos é considerada uma limitação do estudo.
- Falta de dados: a escassez de dados sobre os padrões de componentes construtivos empregados em instituições públicas de ensino na Grande Florianópolis, juntamente com a falta de bancos de dados nacionais para a avaliação do ciclo de vida, é reconhecida como uma limitação.
- Omissão de análises econômicas e sociais: o estudo não incorporou análises econômicas e os impactos sociais resultantes da construção utilizando os materiais analisados. Dado o foco do estudo em instituições públicas de ensino e no desenvolvimento sustentável do setor, essas análises são essenciais para direcionar a tomada de decisões no processo de criação de projetos.
- Tem-se como limitação a adoção de um projeto arquitetônico pré-existente como projeto arquitetônico modelo, em que o posicionamento dos cômodos de longa permanência não foi otimizado.

### **5.3. Sugestões para trabalhos futuros**

Sugere-se a exploração de outros temas para discussão em futuros trabalhos:

- Avaliação do ciclo de vida: recomenda-se a avaliação do ciclo de vida de edificações em diferentes zonas bioclimáticas do Brasil, bem como para projetos de instituições públicas de ensino de maior porte, como universidades.
- Elaboração de bases de dados: sugere-se o desenvolvimento de bancos de dados nacionais que abranjam a fabricação de materiais para utilização em avaliações do ciclo de vida, juntamente com a criação de métodos padronizados para interpretar os dados resultantes de avaliações do ciclo de vida no setor da construção civil.

- Viabilidade econômica: propõe-se a comparação da viabilidade econômica entre os conjuntos de componentes construtivos analisados.
- Análise da influência da incorporação de reciclados: recomenda-se analisar a influência no impacto ambiental decorrente da incorporação de materiais reciclados nos componentes construtivos examinados.

## Referências

- ALVES, F. **Políticas educacionais e desempenho escolar nas capitais brasileiras.** Cadernos de Pesquisa, v. 38, n. 134, p. 413-440, ago. 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-15742008000200008>
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE STANDARD 55-2013:** Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: ANSI (Approved American National Standard), 2013.
- ASADOLLAHFARDI, G.; ASADI, M.; KARIMI, S. Life-Cycle Assessment of Construction in a Developing Country. **Environmental Quality Management**, v. 24, n. 4, p.11-21, jun. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/tqem.21398>.
- ASSEMBLEIA GERAL DA ONU. **Declaração Universal dos Direitos Humanos**, res. 217 A III. Paris, dez. 1948.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040:2009: Gestão ambiental – **Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura.** 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 21 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISSO 9241-110: Ergonomia da interação humano-sistema Parte 110: **Princípios de diálogo.** 1ª ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 26 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações Parte 2: **Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica e do fator solar de elementos e componentes de edificações.** 1ª ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 34 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações Parte 3: **Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.** 1ª ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 36 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-5: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 5: **Requisitos para os sistemas de coberturas.** 4ª ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 73 p.
- AVILA, Antonio Victorino; LIBRELOTTO, Lizeane Ilha; LOPES, Oscar Ciro. **Orçamento de Obras:** Construção Civil. Florianópolis: Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL), 2003.

- AZEVEDO, Giselle Arteiro Nielsen. As escolas públicas do Rio de Janeiro: **Considerações sobre o conforto térmico das edificações**. 1995. Dissertação (Mestrado) – Curso de Arquitetura, Área de Concentração – Conforto Ambiental, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1995.
- AZEVEDO, Leticia Dalpaz de. **Avaliação do ciclo de vida de diferentes envoltórias para habitações de interesse social na cidade de Florianópolis**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2018.
- BEKKER, P.C.F. A life-cycle approach in building. **Building and Environment**; v. 17, p.55-61, 1982. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(82\)90009-9](https://doi.org/10.1016/0360-1323(82)90009-9).
- BITTAR, Marisa; BITTAR, Mariluce. **História da Educação no Brasil: a escola pública no processo de democratização da sociedade**, Acta Scientiarum. Education, vol. 34, nº 2, p. 157-168, dez. 2012. <https://doi.org/10.4025/actascieduc.v34i2.17497>
- BRASIL. Agência Nacional de águas. Ministério do Meio Ambiente (Ed.). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2021: Relatório pleno**. Brasília: ANA (Agência Nacional de Águas), 2021. 132 p.
- BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**, promulgada em 05 de outubro de 1988. Contêm as emendas constitucionais posteriores. Brasília, DF: Senado, 1988.
- BRASIL. Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação. Diretoria de Gestão, Articulação e Projetos Educacionais. **Elaboração de projetos de edificações escolares: educação infantil**, Brasília, 2017. 175 p
- BRASIL. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. Notas estatísticas: **Censo escolar 2018**. Brasília/DF, jan. 2019. 9 p.
- BRASIL. **Lei Nº 9.394**, de 20 de dezembro de 1996. Dispõe sobre as diretrizes e bases da educação nacional. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1996.
- BRASIL. **Lei Nº 13.005**, de 25 de junho de 2014. Aprova o Plano Nacional de Educação - PNE e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 26 de junho de 2014.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Plano de dados abertos FNDE**. Brasília/DF, 2023. 27 p.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco**

- Energético Nacional.** Rio de Janeiro: Epe, 2022. 264 p.
- BRASKEM. **Boletim Técnico Nº 03 PVC:** Propriedades de referência dos compostos de PVC. Braskem, 2002. 12 p.
- BUYLE, Matthias; BRAET, Johan; AUDENAERT, Amaryllis. Life cycle assessment in the construction sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p.379-388, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.001>.
- CASTRO, C. M.; FLETCHER, P. **A escola que os brasileiros frequentaram em 1985.** Rio de Janeiro: Ipea: Iplan,1986.
- CIROTH, Andreas. ICT for environment in life cycle applications OpenLCA — A new open source software for life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s.l.], v. 12, n. 4, p.209-210, jun. 2007.
- CHPS - Collaborative for High Performance Schools. **Best Practices Manual:** Volume I - Planning (2006); Volume II - Design (2006); Volume III - Criteria (2006); Volume IV - Maintenance & Operations (2004); Volume V - Commissioning (2006) e Volume VI - Relocatable (2006). California, EUA.
- COSTA, Tamirys Felix de Assis; OLIVEIRA, Camila Tâmires Alves; LOBO, Francisco Bruno Silva; MOURÃO, Ielpo Charles. Aspectos e impactos ambientais em uma unidade escolar de São Gonçalo do Amarante/CE: Um estudo de caso. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, e18122, mar. 2023. <https://doi.org/10.59306/rgsa.v12e12023e18122>
- CURRAN, Mary Ann. Life Cycle Assessment: A review of the methodology and its application to sustainability. **Current Opinion in Chemical Engineering, Cincinnati**, v. 2, n. 3, p.273-277, ago. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coche.2013.02.002>.
- CURY, C. R. J. Direito à educação: direito à igualdade, direito à diferença. **Cadernos de Pesquisa**, n. 116, p. 245-262, jul. 2002
- D'OCA, Simona; HONG, Tianzhen; LANGEVIN, Jared. The human dimensions of energy use in buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 81, p.731-742, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.019>.
- FLORIANÓPOLIS. **Plano municipal de educação 2015 - 2025**, abr. 2016. 133 p.

- GARCIA, P. S. Um estudo de caso analisando a infraestrutura das escolas de ensino fundamental. **Cadernos de Pesquisa: Pensamento Educacional**, Curitiba, v. 9, n. 23, p. 137-159, dez. 2014.
- GHISI, EneDir; VIEIRA, Abel Silva; ROSA, Aline Schaefer da; MARINOSKI, Ana Kelly; SILVA, Arthur Santos; BALVEDI, Bruna Faitão; ALMEIDA, Laiane Susan Silva. **Uso racional de água e eficiência energética em habitações de interesse social: Volume 1 – Hábitos e indicadores de consumo de água e energia**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - LABEEE, 2015. 82 p.
- GREENDELTA. OpenLCA 1.7: **Comprehensive User Manual**. Berlim, v. 1.1, nov. 2017.
- GRUPO AMBIENTE EDUCAÇÃO (GAE). **Padrões de infra-estrutura para o espaço físico destinado à educação infantil**. Rio de Janeiro, jun. 2004.
- HARISH, V.s.k.v.; KUMAR, Arun. A review on modeling and simulation of building energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p.1272-1292, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.040>.
- HERRMANN, Ivan T.; MOLTESEN, Andreas. Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? – a comparative assessment of SimaPro and GaBi. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 86, p.163-169, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.004>.
- HUMBERT, Sébastien; SCHRYVER, An De; BENGGOA, Xavier; MARGNI, Manuele; JOLLIET, Olivier. **IMPACT 2002+**: User guide. Quantis, 2012. 40 p.
- INMETRO. **Instrução Normativa do Inmetro para Edificações Comerciais, de Serviço e Públicas**, dez. 2022.
- INMETRO. **Portaria Nº 50, de 01 de Fevereiro de 2013: ANEXO GERAL V – CATÁLOGO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE PAREDES, COBERTURAS E VIDROS**. Rio de Janeiro, RJ: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO, 27 nov. 2017.
- JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.3.2000.tde-27072022-082553>.
- KYLILI, Angeliki; ILIC, Milos; FOKAIDES, Paris A. Whole-building Life Cycle Assessment (LCA) of a passive house of the sub-tropical climatic zone.

- Resources, Conservation and Recycling**, v. 116, p.169-177, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.010>.
- LIMA, L. C. A. Da universalização do ensino fundamental ao desafio de democratizar o ensino médio em 2016: o que evidenciam as estatísticas? **Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos**, Brasília, DF, v. 92, n. 231, p. 268-284, ago. 2011. <https://doi.org/10.24109/2176-6681.rbep.92i231.532>
- MASOSO, O.T.; GROBLER, L.J. The dark side of occupants' behaviour on building energy use. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 2, p.173-177, fev. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.009>.
- MEDEIROS, L. M.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I, J. A. Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 365-385, abr./jun. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000200259>
- MORALES, M.; MORAGA, G.; KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELO, A. Regionalized inventory data in LCA of public housing: **A comparison between two conventional typologies in southern Brazil**. **Journal of Cleaner Production**, ago. 2019. doi:10.1016/j.jclepro.2019.117
- NOI, Claudia di; CIROTH, Andreas; SROCKA, Michael. OpenLCA 1.7: **Comprehensive User Manual**. Berlim: GREENDELTA, 2017. 104 p.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Declaração Universal dos Direitos Humanos**, dez. 1948.
- PAES, Rosângela Fulche de Souza. **Materiais de Construção e Acabamento para Escolas Públicas na Cidade do Rio de Janeiro: Uma Reflexão sob critérios de Sustentabilidade**. Rio de Janeiro, mar. 2008.
- PEREIRA, Cláudia Donald; GHISI, Eneidr. The influence of the envelope on the thermal performance of ventilated and occupied houses. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 12, p.3391-3399, dez. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.001>.
- PRÉ SUSTAINABILITY. **About SimaPro**. 2023. Disponível em: <<https://simapro.com/>>. Acesso em: 22 abr. 2023.
- RAMESH, T.; PRAKASH, Ravi; SHUKLA, K.k. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 19, p.1592-1600, out. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.007>.

- RASHID, Ahmad Faiz Abd; YUSOFF, Sumiani. A review of life cycle assessment method for building industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 244-248, mai. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.043>.
- RIBEIRO, M. L. S. **História da Educação Brasileira: a organização escolar**. 6. ed. São Paulo: Moraes, 1986.
- ROMANELLI, O. O. **História da Educação no Brasil (1930/1973)**. 8. ed. Petrópolis: Vozes, 1986.
- ROTH, C. D. G.; GARCIAS, C. M. Construção civil e a degradação ambiental. **Desenvolvimento em Questão**, v. 7, n. 13, p. 111-128, 2009. <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2009.13.111-128>.
- SANTA CATARINA. Plano Estadual de Educação 2015 – 2024: **Fundamentação Legal, Histórico dos Planos e Análise Situacional**. Florianópolis, 2015. 112
- SANTOS, Adriana de Paula Lacerda; ANTUNES, Cristiano Eduardo; BALBINOT, Guilherme Bastos. Levantamento de Quantitativos de Obras: Comparação Entre o Método Tradicional e Experimentos em Tecnologia Bim. **Revista Iberoamericana de Engenharia Industrial**, Florianópolis, v. 6, n. 12, p.134-155, out. 2014. Semestral.
- SCHENINI, P. C.; BAGNATI, A. M. Z.; CARDOSO, A. C. F. **Gestão de Resíduos da Construção Civil**. Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. COBRAC 2004. Florianópolis. 13p, out. 2004.
- SILVA, G. L. **Avaliação da eficiência energética em escolas públicas municipais e estaduais de Maceió - Alagoas**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2015.
- SILVA, M. R. **Perspectivas curriculares contemporâneas**. 1ª ed. Curitiba: Ibpex, 2011.
- SINAPI. **Relatório de insumos e composições – SEM DESONERAÇÃO**. Brasília, set. 2023.
- TCPO, **Tabelas de Composição de Preços para Orçamentos**. 13ª ed. São Paulo: PINI, 2010. ISBN 978-85-7266-201-7.
- TREVISAN, A. M.; CHIZZOTTI, A.; IANHEZ, J. A.; CHIZZOTTI, J.; VERILLO, J. **O combate à corrupção nas prefeituras do Brasil**. 2ª ed. São Paulo, 2003.

- VAN OOTEGHEM, Kevin; XU, Lei. The life-cycle assessment of a single-storey retail building in Canada. **Building and Environment**, v. 49, p.212-226, mar. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.09.028>.
- VASCONCELOS, J. C.; LIMA, P. V. P. S.; ROCHA, L. A.; KHAN, A. S. Infraestrutura escolar e investimentos públicos em Educação no Brasil: a importância para o desempenho educacional. **Ensaio: Avaliação e Políticas Públicas em Educação**, dez. 2021. <https://doi.org/10.1590/S0104-40362020002802245>
- U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus™ Version 22.1.0 Documentation: Engineering Reference**. Estados Unidos, 2022. 1774 p.
- U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus™ Version 22.2.0 Documentation: Getting Started**. Estados Unidos, 2022. 88 p.
- WANG, Haidong; ZHAI, Zhiqiang (John). Advances in building simulation and computational techniques: A review between 1987 and 2014. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 319-335, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.080>.
- WEBER, F.S.; MELO, A.P.; MARINOSKI, D.L.; LAMBERTS, R. **Elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Florianópolis: LABEEE, 2017. 52p. [<http://www.labeee.ufsc.br/node/714>]
- ZARARAH, Lina M. **Life Cycle Assessment for buildings in developing countries**. Proceedings of Academics World 81st International Conference, Cairo, Egito, jun. 2018.

## ANEXO A – Características das instituições de ensino em Florianópolis

Quadro 7 – Componentes construtivos de instituições de ensino na Grande Florianópolis

Instituição	Tipologia	Componente construtivo
Instituição 1	Paredes	Bloco cerâmico 14x9x19 cm
	Pintura	Branco Azul royal
	Pisos	Concreto revestido em cerâmica
	Portas	Madeira Alumínio
	Janelas	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
	Laje	Sim
Instituição 2	Paredes	Bloco cerâmico 14x9x19 cm
	Pintura	Branco Cinza
	Pisos	Concreto sem revestimento
	Portas	Madeira Alumínio
	Janelas	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
	Laje	Sim
Instituição 3	Paredes	Bloco cerâmico 14x9x19 cm
	Pintura	Branco Azul royal
	Pisos	Concreto sem revestimento
	Portas	Madeira Alumínio
	Janelas	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
	Laje	Sim

Quadro 7 – Componentes construtivos de instituições de ensino na Grande Florianópolis

Instituição	Tipologia	Componente construtivo
Instituição 4	Paredes	Bloco cerâmico 14x19x39 cm
	Pintura	Branco Vermelho
	Pisos	Concreto revestido em cerâmica
	Portas	Madeira Alumínio
	Janelas	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Sem
	Laje	Sim
Instituição 5	Paredes	Bloco cerâmico 14x9x19 cm
	Pintura	Branco Cinza Vermelho
	Pisos	Concreto revestido em cerâmica
	Portas	Madeira Alumínio
	Janelas	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Sem
	Laje	Sim
Instituição 6	Paredes	Bloco cerâmico (sem dimensões)
	Pintura	Branco
	Pisos	Concreto revestido em cerâmica
	Portas	Madeira
	Janelas	Madeira Alumínio
	Telha	Cerâmica Fibrocimento
	Forro	PVC Madeira
	Laje	Sim

Quadro 7 – Componentes construtivos de instituições de ensino na Grande Florianópolis

Instituição	Tipologia	Componente construtivo
Instituição 7	Paredes	Bloco cerâmico (sem dimensões)
	Pintura	Branco Azul
	Pisos	Concreto revestido em cerâmica
	Portas	Madeira
	Janelas	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Sem
	Laje	Sim
Instituição 8	Paredes	Bloco cerâmico (sem dimensões)
	Pintura	Branco Azul
	Pisos	Concreto revestido em cerâmica
	Portas	Madeira
	Janelas	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Sem
	Laje	Sim
Instituição 9	Paredes	Bloco cerâmico 9x9x19cm
	Pintura	Dados não fornecidos
	Pisos	Concreto revestido em cerâmica
	Portas	Madeira
	Janelas	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
	Laje	Sim
Instituição 10	Paredes	Bloco cerâmico 11,5x19x19cm
	Pintura	Dados não fornecidos
	Pisos	Concreto revestido em cerâmica
	Portas	Madeira
	Janelas	Alumínio
	Telha	Cerâmica
	Forro	PVC
	Laje	Não

Fonte: Baseado no levantamento realizado pela Prefeitura Municipal de Palhoça (2023)

## ANEXO B – Padrão de Ocupação

Tabela 16 – Valores de referência para edificações educacionais

Uso típico	Condição real	Condição de referência		
		Educação infantil	Ensino fundamental e médio	Ensino superior
<b>Geometria</b>				
Área (m <sup>2</sup> )			Condição real	
Orientação solar			Condição real	
Pé direito (piso a teto) (m)			Condição real	
<b>Aberturas</b>				
PAF - Percentual da área de cobertura da fachada (%)	Condição real		40 (0,40)	
<b>Componentes construtivos</b>				
Parede	Condição real	Argamassa interna (2,5 cm), bloco cerâmico furado (9 cm), argamassa externa (2,5 cm)		
Upar - Transmitância da parede externa (W/(m <sup>2</sup> .K))	Condição real		2,39	
αPAR - Absortância da parede (adimensional)	Condição real		0,5	
CTpar - Capacidade térmica da parede externa (kJ/(m <sup>2</sup> .K))	Condição real		150	
Cobertura	Condição real	Telha de fibrocimento, câmara de ar (>5 cm) e laje maciça de concreto (10 cm)		
Ucob - Transmitância da cobertura (W/(m <sup>2</sup> .K))	Condição real		2,06	
αCOB - Absortância da cobertura (adimensional)	Condição real		0,8	
CTcob - Capacidade térmica da cobertura (kJ/(m <sup>2</sup> .K))	Condição real		233	
Vidro	Condição real		Vidro simples incolor 6mm	
FS – Fator solar do vidro (adimensional)	Condição real		0,82	
Uvid - Transmitância do vidro (W/(m <sup>2</sup> .K))	Condição real		5,7	
AHS - Ângulo horizontal de sombreamento (°)	Condição real		0	
AVS - Ângulo vertical de sombreamento (°)	Condição real		0	
AOV - Ângulo de obstrução vizinha (°)*			Condição real	

Tabela 16 – Valores de referência para edificações educacionais

Uso típico	Condição real	Condição de referência		
		Educação infantil	Ensino fundamental e médio	Ensino superior
<b>Iluminação e ganhos internos</b>				
DPI - Densidade de potência de iluminação (W/m <sup>2</sup> )	Condição real		15,5**	
Ocupação (m <sup>2</sup> /pessoa)	Condição de referência	2,5	1,5	1,5
DPE - Densidade de potência de equipamentos (W/m <sup>2</sup> )***	Condição de referência		15	
Horas de ocupação (horas)			8	
Dias de ocupação (N <sub>ano</sub> )****			200	
Situação do piso		Condição real		
Situação da cobertura		Condição real		
Isolamento do piso	Condição real	Sem isolamento		
<b>Condicionamento de ar (refrigeração)</b>				
COP - Coeficiente de performance (W/W)	Condição real		2,6	
Temperatura setpoint (°C)*****			24	
<b>Aquecimento de água*****</b>				
Eficiência do sistema de aquecimento de água sem acumulação <sub>a</sub>	Condição real		0,95	
Eficiência do sistema de aquecimento de água com acumulação <sub>b</sub>	Condição real		0,85	
Temperatura de armazenamento		Mínimo 50 °C		
Temperatura de uso de água quente		38 °C (norte e nordeste)		
		40 °C (demais regiões)		
Temperatura de uso de água fria (°C)		Condição real		
Perdas na tubulação – sistema de aquecimento de água sem acumulação	Condição real		0	
Perdas de recirculação – sistema de aquecimento de água sem acumulação	Condição real		0	
Perdas de armazenamento – sistema de aquecimento de água sem acumulação	Condição real		0	
Perdas na tubulação – sistema de aquecimento de água com acumulação	Condição real	Isolamento de 5 mm, $\lambda=0,03$ W/(m.K)		
Perdas da recirculação – sistema de aquecimento de água com acumulação	Condição real	Isolamento de 5 mm, $\lambda=0,03$ W/(m.K)		

Tabela 16 – Valores de referência para edificações educacionais

Uso típico	Condição real	Condição de referência		
		Educação infantil	Ensino fundamental e médio	Ensino superior
Perdas de armazenamento – sistema de aquecimento de água com acumulação		Condição real		
* A utilização do ângulo de obstrução por vizinhança (AOV) é opcional.				
** Adotar este valor para a avaliação parcial da envoltória no caso da utilização do método do edifício completo (Subitem B.III.4.1). Para o método da atividade dos edifícios e potência ajustada, devem ser adotados os valores de potência de iluminação limite (DPIL) para a classificação D.				
*** Em casos em que se deseje utilizar os valores reais ou levantados por meio de projeto, a DPE para a condição real e de referência devem ser iguais. Caso sejam adotados valores não tabelados, deve ser entregue memorial de cálculo e declaração de responsabilidade técnica (ART/RRT).				
**** Os dias de ocupação desta tipologia foram calculados com base na média de dias úteis por ano, excluindo-se os meses de férias, feriados nacionais e fins de semana.				
***** Caso exista a necessidade da edificação operar com um setpoint diferente, deverá ser entregue uma carta de justificativa ao OIA, seguindo-se então com o método de simulação; nestes casos, deve-se utilizar o mesmo setpoint para a edificação real e sua condição de referência.				
***** Válido para edificações educacionais com alojamento/internatos.				
a Sistema de referência: chuveiro elétrico				
b Sistema de referência: boiler elétrico.				

Fonte: Baseado na Portaria nº 309/2022 do INMETRO (2022)

## APÊNDICE A

Tabela 17 – Inventário do ciclo de vida para a parede com blocos cerâmicos de dimensões 14x9x19

Parede de tijolo cerâmico 14x9x19					
Material	Tijolo	Cimento	Cal hidratada	Areia	-
Massa (kg)	73513,82	12606,27	32918,90	22952,21	-
Volume (m <sup>3</sup> )	-	8,75	14,90	16,81	-
Massa por área (kg/m <sup>2</sup> )	48,46	8,31	21,70	15,13	-
Material	Água	Barra de aço	Selador acrílico	Tinta látex acrílica	Transporte (tkm)
Massa (kg)	19614,81	3003,66	637,14	470,27	31486,25
Volume (m <sup>3</sup> )	20,08	-	0,00	0,00	-
Massa por área (kg/m <sup>2</sup> )	12,93	1,98	0,42	0,31	20,76

Tabela 18 – Inventário do ciclo de vida para a parede com blocos cerâmicos de dimensões 9x19x19

Parede de tijolo cerâmico 9x19x19					
Material	Tijolo	Cimento	Cal hidratada	Areia	-
Massa (kg)	19868,60	3407,1	8897	6203,3	-
Volume (m <sup>3</sup> )	-	2,37	4,03	4,54	-
Massa por área (kg/m <sup>2</sup> )	13,10	2,25	5,86	4,09	-
Material	Água	Barra de aço	Selador acrílico	Tinta látex acrílica	Transporte (tkm)
Massa (kg)	5301,30	811,80	637,14	470,27	8663,34
Volume (m <sup>3</sup> )	5,43	-	0	0	-
Massa por área (kg/m <sup>2</sup> )	3,49	0,54	0,42	0,31	5,71

Tabela 19 – Inventário do ciclo de vida para janela em madeira

Janela com esquadria em madeira						
Material	Vidro	Esquadria	Cimento	Areia	Água	Transporte (tkm)
Massa (kg)	18543,46	2286,18	732,75	2565,60	465,05	236,09
Volume (m <sup>3</sup> )	7,73	-	0,51	1,88	0,48	-
Massa por área (kg/m <sup>2</sup> )	94,90	11,70	3,75	13,13	2,38	1,21

Tabela 20 – Inventário do ciclo de vida para janela em alumínio

Janela com esquadria em alumínio				
Material	Vidro	Esquadria e caixilho	Espuma	Transporte (tkm)
Massa (kg)	18543,46	1748,83	48,85	1545,93
Volume (m <sup>3</sup> )	7,73	-	-	-
Massa por área (kg/m <sup>2</sup> )	94,9	8,95	0,25	7,91

Tabela 21 – Inventário do ciclo de vida para porta em madeira

Porta de madeira					
Material	Madeira	Cimento	Areia	Água	Transporte (tkm)
Massa (kg)	1282,89	178,63	586,64	107,58	799,78
Volume (m <sup>3</sup> )	-	0,12	0,43	0,11	-
Massa por área (kg/m <sup>2</sup> )	18,96	2,64	8,67	1,59	11,82

Tabela 22 – Inventário do ciclo de vida para porta em alumínio

Porta de alumínio			
Material	Alumínio	Espuma	Transporte (tkm)
Massa (kg)	1308,60	6,09	964,98
Volume (m <sup>3</sup> )	-	-	-
Massa por área (kg/m <sup>2</sup> )	19,34	0,09	14,26

Tabela 23 – Inventário do ciclo de vida para cobertura com forro em *Drywall* e telha de fibrocimento

Telha de fibrocimento e forro de Drywall				
Material	Telha fibrocimento	Parafusos	Drywall	Transporte (tkm)
Massa (kg)	15955,62	1427,04	8245,12	6970,76
Volume (m <sup>3</sup> )	-	-	12,49	-
Massa por área (kg/m <sup>2</sup> )	12,93	1,44	8,32	3,13

Tabela 24 – Inventário do ciclo de vida para cobertura com forro de PVC e telha de fibrocimento

Telha de fibrocimento e forro de PVC				
Material	Telha fibrocimento	Parafusos	PVC	Transporte (tkm)
Massa (kg)	15955,62	872,08	1892,81	3912,59
Volume (m <sup>3</sup> )	-	-	1,40	-
Massa por área (kg/m <sup>2</sup> )	12,93	0,88	1,91	1,76

Tabela 25 – Inventário do ciclo de vida para cobertura com laje maciça de concreto e telha de fibrocimento

Telha de fibrocimento e laje maciça de concreto				
Material	Telha fibrocimento	Cimento	Areia	Aço
Massa (kg)	15955,62	13092,74	67635,54	147944,26
Volume (m <sup>3</sup> )	-	9,09	49,55	18,82
Massa por área (kg/m <sup>2</sup> )	12,93	10,61	54,81	119,89
Material	Cal hidratada	Água	Madeira	Transporte (tkm)
Massa (kg)	3159,04	24692,34	15400,32	78303,32
Volume (m <sup>3</sup> )	1,43	25,27	25,67	-
Massa por área (kg/m <sup>2</sup> )	2,56	20,01	12,48	35,19

Tabela 26 – Inventário do ciclo de vida para cobertura com forro de PVC e telha cerâmica

Telha cerâmica e forro de PVC				
Material	Telha cerâmica	Cimento	Cal hidratada	-
Massa (kg)	77384,14	1122,94	3159,04	-
Volume (m <sup>3</sup> )	-	0,78	1,43	-
Massa por área (kg/m <sup>2</sup> )	62,71	0,91	2,56	-
Material	Areia	Água	PVC	Transporte (tkm)
Massa (kg)	11723,00	2122,48	1892,81	18117,22
Volume (m <sup>3</sup> )	8,59	2,17	1,40	-
Massa por área (kg/m <sup>2</sup> )	9,5	1,72	1,91	8,14

## APÊNDICE B

Quadro 8 – Conjuntos de componentes construtivos e orientações considerados na simulação

Combinação	Componente construtivo	Orientação
Combinação 1	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
Combinação 2	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
Combinação 3	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	PVC
Combinação 4	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	PVC
Combinação 5	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Laje maciça
Combinação 6	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Laje maciça
Combinação 7	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Cerâmica
	Forro	PVC
Combinação 8	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Cerâmica
	Forro	PVC

Quadro 8 – Conjuntos de componentes construtivos e orientações considerados na simulação

Combinação	Componente construtivo	Orientação
Combinação 9	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
Combinação 10	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
Combinação 11	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	PVC
Combinação 12	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	PVC
Combinação 13	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Laje maciça
Combinação 14	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Laje maciça
Combinação 15	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Cerâmica
	Forro	PVC
Combinação 16	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Cerâmica
	Forro	PVC

Quadro 8 – Conjuntos de componentes construtivos e orientações considerados na simulação

Combinação	Componente construtivo	Orientação
Combinação 17	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
Combinação 18	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
Combinação 19	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	PVC
Combinação 20	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	PVC
Combinação 21	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Laje maciça
Combinação 22	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Laje maciça
Combinação 23	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Cerâmica
	Forro	PVC
Combinação 24	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Cerâmica
	Forro	PVC

Quadro 8 – Conjuntos de componentes construtivos e orientações considerados na simulação

Combinação	Componente construtivo	Orientação
Combinação 25	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
Combinação 26	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
Combinação 27	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	PVC
Combinação 28	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	PVC
Combinação 29	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Laje maciça
Combinação 30	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Laje maciça
Combinação 31	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Cerâmica
	Forro	PVC
Combinação 32	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Cerâmica
	Forro	PVC

Quadro 8 – Conjuntos de componentes construtivos e orientações considerados na simulação

Combinação	Componente construtivo	Orientação
Combinação 33	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
Combinação 34	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
Combinação 35	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	PVC
Combinação 36	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	PVC
Combinação 37	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Laje maciça
Combinação 38	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Laje maciça
Combinação 39	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Cerâmica
	Forro	PVC
Combinação 40	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Cerâmica
	Forro	PVC

Quadro 8 – Conjuntos de componentes construtivos e orientações considerados na simulação

Combinação	Componente construtivo	Orientação
Combinação 41	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
Combinação 42	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
Combinação 43	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	PVC
Combinação 44	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	PVC
Combinação 45	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Laje maciça
Combinação 46	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Laje maciça
Combinação 47	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Cerâmica
	Forro	PVC
Combinação 48	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Cerâmica
	Forro	PVC

Quadro 8 – Conjuntos de componentes construtivos e orientações considerados na simulação

Combinação	Componente construtivo	Orientação
Combinação 49	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
Combinação 50	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
Combinação 51	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	PVC
Combinação 52	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	PVC
Combinação 53	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Laje maciça
Combinação 54	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Laje maciça
Combinação 55	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Cerâmica
	Forro	PVC
Combinação 56	Parede	Bloco cerâmico 14x9x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Cerâmica
	Forro	PVC

Quadro 8 – Conjuntos de componentes construtivos e orientações considerados na simulação

Combinação	Componente construtivo	Orientação
Combinação 57	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
Combinação 58	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	<i>Drywall</i>
Combinação 59	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	PVC
Combinação 60	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	PVC
Combinação 61	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Laje maciça
Combinação 62	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Fibrocimento
	Forro	Laje maciça
Combinação 63	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Madeira
	Telha	Cerâmica
	Forro	PVC
Combinação 64	Parede	Bloco cerâmico 9x19x19
	Esquadrias	Alumínio
	Telha	Cerâmica
	Forro	PVC

## APÊNDICE C

Tabela 27 – Relação das 36 combinações com menor impacto nas categorias de dano

Conjunto	Orientação	Categorias de dano			
		Saúde humana (DALY)	Qualidade do ecossistema (PDF*m <sup>2</sup> *yr)	Mudanças Climáticas (kg CO <sub>2</sub> eq)	Recursos (MJ primária)
Bloco 14x9x19/Cerâmica/PVC/Alumínio	0°	0,672	18400	213000	2580000
	90°	0,672	18400	214000	2580000
	180°	0,672	18400	213000	2580000
	270°	0,672	18500	213000	2580000
Bloco 14x9x19/Cerâmica/PVC/Madeira	0°	0,602	21900	152000	1940000
	90°	0,602	22000	152000	1940000
	180°	0,602	21900	152000	1940000
	270°	0,602	21900	152000	1940000
Bloco 14x9x19/Fibrocimento/Drywall/Madeira	0°	0,118	64000	128000	1380000
	90°	0,118	64000	128000	1380000
	180°	0,118	64000	128000	1380000
	270°	0,118	64000	128000	1380000
Bloco 14x9x19/Fibrocimento/PVC/Madeira	0°	0,109	32100	124000	1390000
	90°	0,109	32100	124000	1390000
	180°	0,109	32100	124000	1390000
	270°	0,110	32200	124000	1390000
Bloco 9x19x19/Cerâmica/PVC/Alumínio	0°	0,654	13600	185000	2290000
	90°	0,654	13600	185000	2300000
	180°	0,654	13700	185000	2300000
	270°	0,654	13600	185000	2300000
Bloco 9x19x19/Cerâmica/PVC/Madeira	0°	0,583	17100	123000	1650000
	90°	0,584	17200	124000	1660000
	180°	0,584	17200	124000	1660000
	270°	0,583	17200	124000	1660000
Bloco 9x19x19/Fibrocimento/Drywall/Madeira	0°	0,100	59200	99200	1090000
	90°	0,100	59200	99200	1090000
	180°	0,100	59300	99300	1090000
	270°	0,100	59300	99200	1090000
Bloco 9x19x19/Fibrocimento/PVC/Alumínio	0°	0,161	23600	157000	1740000
	90°	0,161	23600	157000	1740000
	180°	0,161	23600	157000	1740000
	270°	0,161	23600	157000	1740000
Bloco 9x19x19/Fibrocimento/PVC/Madeira	0°	0,091	27200	95900	1100000
	90°	0,091	27300	96100	1110000
	180°	0,091	27300	96000	1100000
	270°	0,090	27300	96100	1100000

## APÊNDICE D

Figura 36 – Valor de cada categoria de impacto na categoria de dano de saúde humana

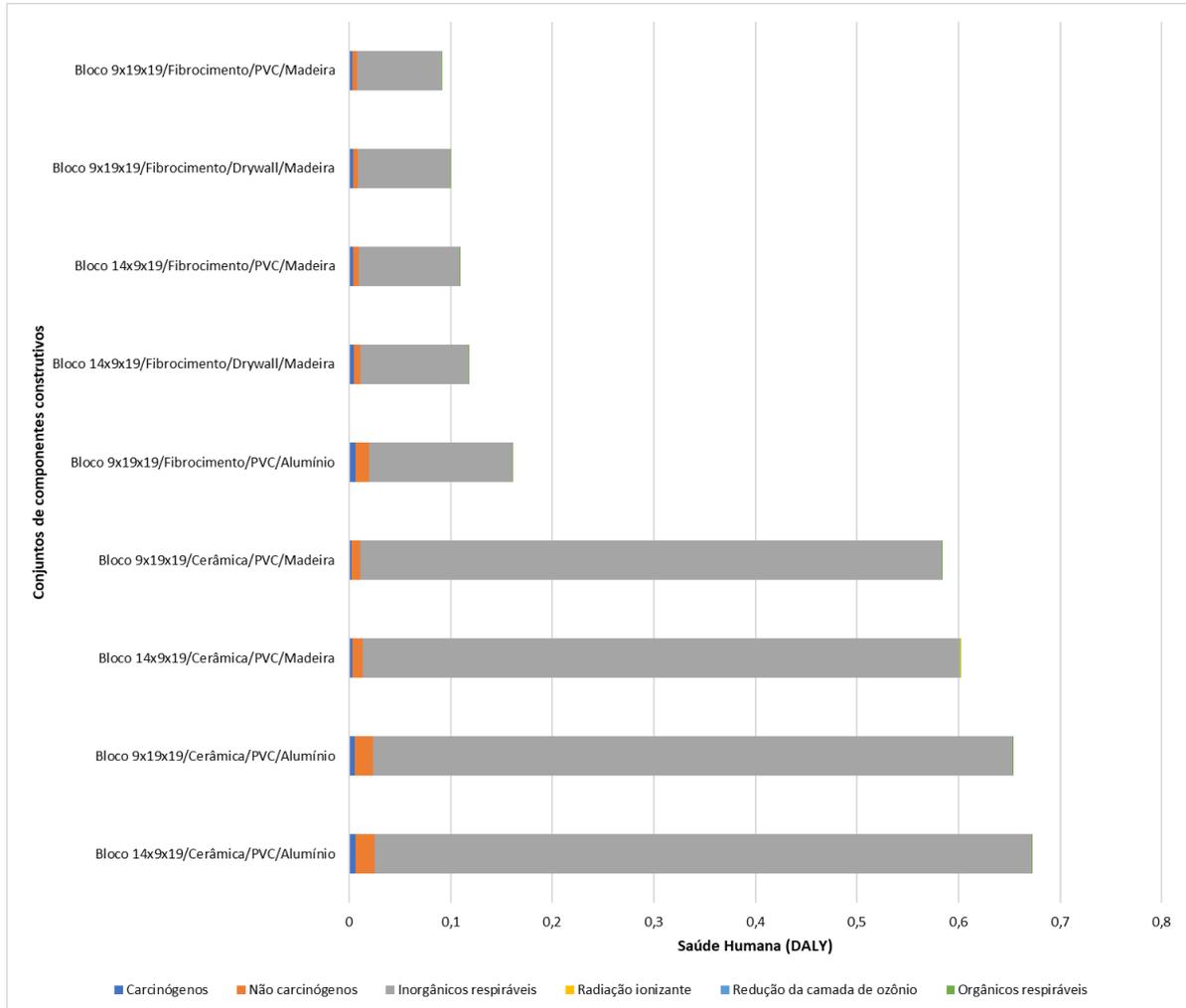


Figura 37 – Valor de cada categoria de impacto na categoria de dano de qualidade do ecossistema

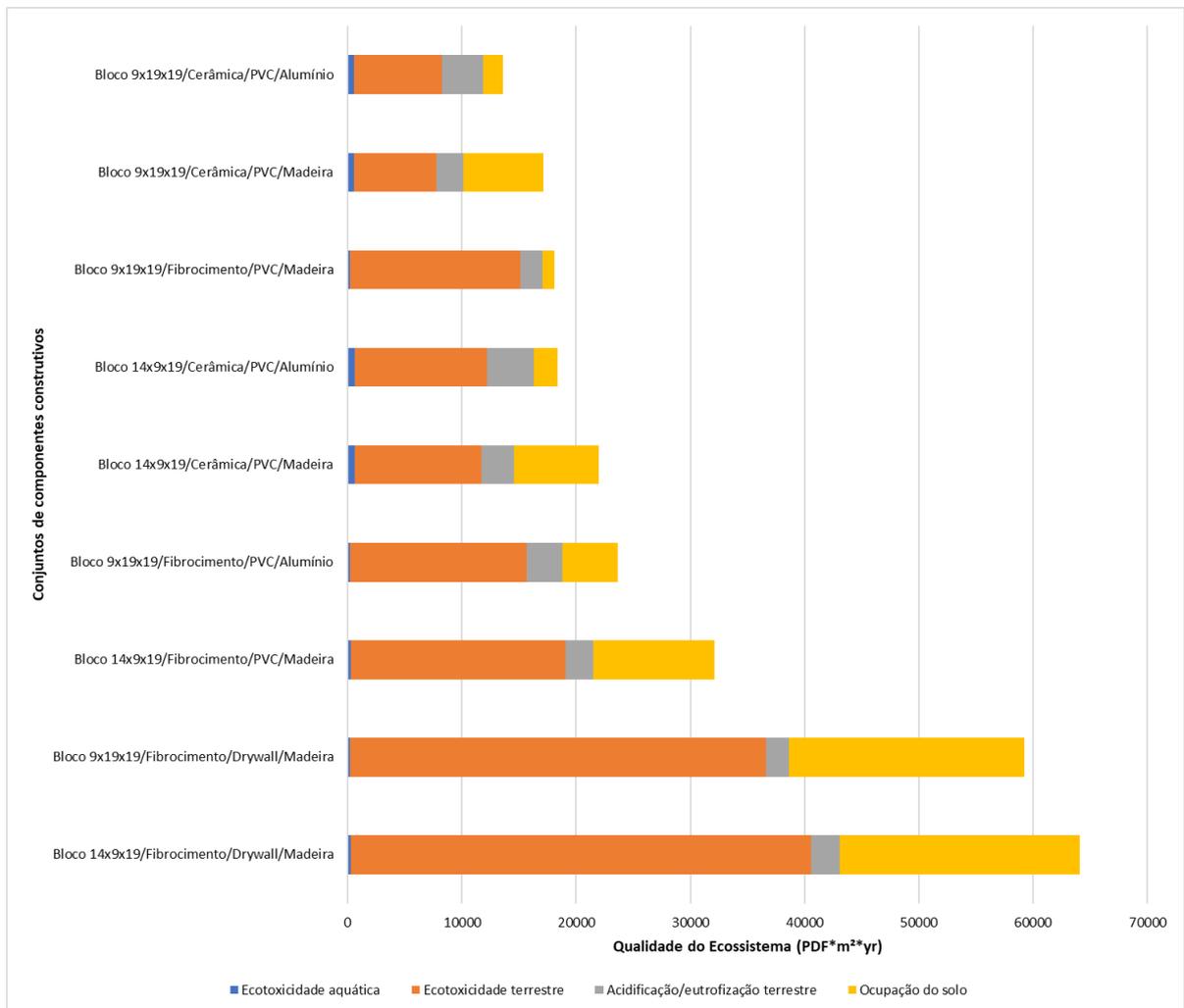


Figura 38 – Valor de cada categoria de impacto na categoria de dano de mudanças climáticas

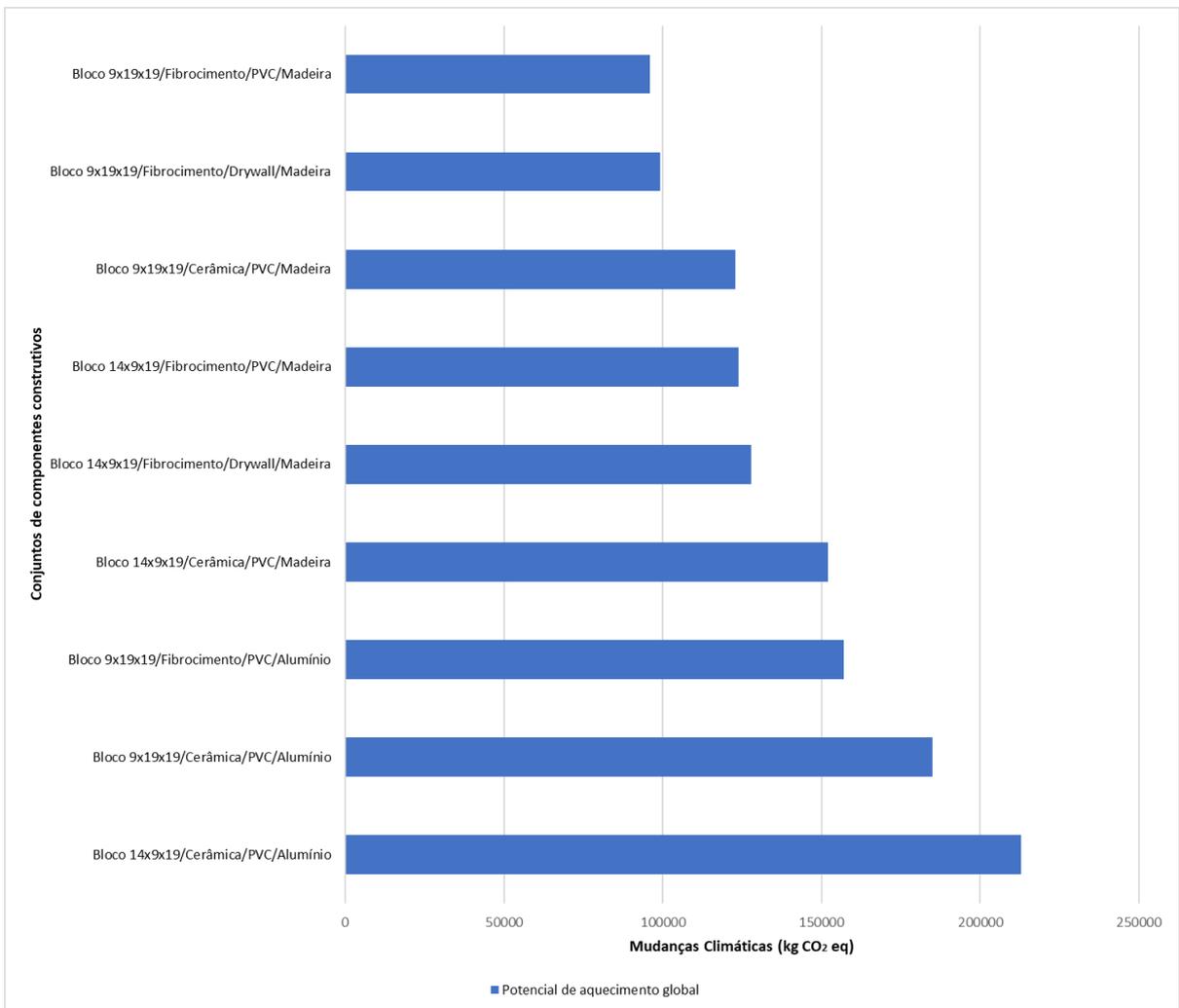


Figura 39 – Valor de cada categoria de impacto na categoria de dano de recursos

