

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANDREMIR LUAN CASSINELLI

**INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PAVIMENTOS NO GRAU DE IMPACTO
AMBIENTAL DE EDIFÍCIOS EM CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO**

Porto Alegre

2021

ANDREMIR LUAN CASSINELLI

**INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PAVIMENTOS NO GRAU DE IMPACTO
AMBIENTAL DE EDIFÍCIOS EM CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão do curso
apresentado para obtenção do título de
Engenheiro Civil pela Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, com
concentração na área de estruturas.

Orientador: Roberto Rios

Coorientadora: Mônica Regina Garcez

Porto Alegre

2021

CIP - Catalogação na Publicação

Cassinelli, Andreimir Luan
INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PAVIMENTOS NO GRAU DE
IMPACTO AMBIENTAL DE EDIFÍCIOS EM CONCRETO ARMADO:
ESTUDO DE CASO / Andreimir Luan Cassinelli. -- 2021.
72 f.
Orientador: Roberto Domingo Rios.

Coorientadora: Mônica Regina Garcez.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Civil, Porto Alegre,
BR-RS, 2021.

1. Estruturas de concreto armado. 2.
Sustentabilidade . 3. Análise de ciclo de vida. I.
Rios, Roberto Domingo, orient. II. Garcez, Mônica
Regina, coorient. III. Título.

ANDREMIR LUAN CASSINELLI

**INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PAVIMENTOS NO GRAU DE IMPACTO
AMBIENTAL DE EDIFÍCIOS EM CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão do curso
apresentado para obtenção do título de
Engenheiro Civil pela Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, com
concentração na área de estruturas.

Orientador: Roberto Rios

Coorientadora: Mônica Regina Garcez

18 de Maio de 2021

Banca examinadora

Prof. Roberto Rios

Escola de Engenharia - DECIV

Prof. Mônica Regina Garcez

Escola de Engenharia - DICLN

Prof. Alexandre Pacheco

Escola de Engenharia – DECIV

Prof. Paula Manica Lazzari

Escola de Engenharia – DECIV

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao prof. Roberto Rios pela orientação, pelo conhecimento transmitido, pela paciência e pela dedicação que tornaram esse trabalho possível.

Agradeço à profa. Mônica Regina Garcez pela orientação, pelo acompanhamento prévio em bolsa que me motivou a escrever este trabalho e pela ajuda ao longo de todas as etapas deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Ademir Cassinelli e Liane Terezinha Marin Cassinelli, pelo apoio, pela motivação, pela ajuda e pelo amor, sendo a base que permitiram a minha formação como engenheiro.

Agradeço a minha namorada Valentina de Bem Osório, por estar ao meu lado nesta etapa final do curso e por sempre me motivar a buscar uma boa formação e pelo futuro que teremos juntos.

Agradeço ao meu irmão Alexandre Alan Cassinelli, pela ajuda e pelos momentos de desabafo e troca de conhecimentos.

Agradeço aos engenheiros da empresa Estádio 3, pelo conhecimento, pelas amizades e pela oportunidade de trabalho oferecida.

Por fim agradeço a todos os meus amigos e colegas que fizeram parte desta etapa de minha vida, pela ajuda e companheirismo.

RESUMO

Este trabalho visa o estudo comparativo do grau de impacto ambiental para uma edificação residencial variando o número de pavimentos, por meio de uma análise de *Life-Cycle Assessment* (LCA - Avaliação do ciclo de vida) considerando a estrutura de concreto armado. O estudo de caso contempla cinco modelos estruturais, com 10, 15, 20, 25 e 30 pavimentos, com o mesmo pavimento tipo. Os edifícios são dimensionados seguindo as normas brasileiras da ABNT pelo *software* de cálculo estrutural TQS. Com as edificações dimensionadas, a partir dos quantitativos de materiais, é realizada a quantificação dos impactos. Os dados da LCA são adaptados para um cenário de construção na cidade de Porto Alegre - RS. Os resultados mostram que os modelos com o maior número de pavimentos apresentam maior grau de impacto, no cenário analisado.

Palavras-chave: estruturas de concreto armado, sustentabilidade, análise de ciclo de vida

ABSTRACT

This paper aims at a comparative study of the degree of environmental impact for a residential building by varying the number of floors, through an analysis of Life-Cycle Assessment (LCA) considering the reinforced concrete structure. The case study includes five structural models, with 10, 15, 20, 25 and 30 floors, with the same typical floor plan. The buildings are designed following the Brazilian norms with the structural design software TQS. With the designed models, based on the quantitative of materials, the quantification of impacts is carried out. LCA data are adapted to a construction scenario in the city of Porto Alegre – RS. The results show that the models with the largest number of floors have a greater degree of impact, in the analyzed scenario.

Keywords: reinforced concrete structures, sustainability, life cycle assessment

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ábaco para ventos de alta turbulência (NBR 6123, 1988)	16
Figura 2 – As quatro fases de uma análise LCA	20
Figura 3 - Procedimentos para o LCI	22
Figura 4 - Estágios do LCA pela BS 15978	23
Figura 5 - Planta simétrica, área hachurada em detalhe abaixo	26
Figura 6 - Planta arquitetônica do pavimento tipo	27
Figura 7 - Planta de formas do pavimento tipo.....	28
Figura 8 - Disposição dos pilares na planta baixa	31
Figura 9 - 10 pavimentos.....	32
Figura 10 - 15 pavimentos e 20 pavimentos	34
Figura 11 - 25 pavimentos e 30 pavimentos	36
Figura 12 - Fronteiras do sistema estudado	40
Figura 13 - Consumo médio por pavimento	49
Figura 14 - Consumo de aço por elemento por modelo (kg de aço por elemento por pavimento)	50
Figura 15 - Consumo médio por m ²	50
Figura 16 - Impactos gerados por materiais	54
Figura 17 - Impactos gerados pela construção	55
Figura 18 - Impactos gerados pelo descarte	56
Figura 19 - Impactos gerais, comparativo	57
Figura 20 - Impactos por m ² Fonte:.....	58
Figura 21 - Comparativo do impacto por material	59
Figura 22 - Comparativo do impacto por material	60
Figura 23 - Comparativo das categorias - modelo 30 pav.....	61
Figura 24 - Relação dos indicadores entre os modelos	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Emissões de carbono e consumo energético por material.....	13
Tabela 2 - Relação a/c e Classe de concreto de acordo com a Classe de agressividade	29
Tabela 3 - Cobrimentos de acordo com a Classe de agressividade ambiental	30
Tabela 4 - Cargas distribuídas aplicadas nas lajes	30
Tabela 5 - Seção dos pilares do modelo de 10 pavimentos.....	32
Tabela 6 - Seção dos pilares do modelo de 15 pavimentos.....	32
Tabela 7 - Seção dos pilares do modelo de 20 pavimentos.....	33
Tabela 8 - Seção dos pilares do modelo de 25 pavimentos.....	35
Tabela 9 - Seção dos pilares do modelo de 30 pavimentos.....	37
Tabela 10 - Proporção de materiais na mistura de concreto conforme método pela ACI 211.1.....	38
Tabela 11 - Distâncias de transporte para cada tipo de material	39
Tabela 12 - Inventário	42
Tabela 13 - Quantitativos de material – 10 pavimentos	46
Tabela 14 - Parâmetros de Instabilidade - 10 pavimentos	46
Tabela 15 - Quantitativos de material – 15 pavimentos	47
Tabela 16 - Parâmetros de Instabilidade - 15 pavimentos	47
Tabela 17 - Quantitativos de material – 20 pavimentos	47
Tabela 18 - Parâmetros de Instabilidade - 20 pavimentos	47
Tabela 19 - Quantitativos de material – 25 pavimentos	48
Tabela 20 - Parâmetros de Instabilidade - 25 pavimentos	48
Tabela 21 - Quantitativos de material – 30 pavimentos	48
Tabela 22 - Parâmetros de Instabilidade - 30 pavimentos	49
Tabela 23 – Inventário Fase de produto.....	52
Tabela 24 - Proporção média das fases da BS nos indicadores.....	53

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ACI: American Concrete Institute

BS 15978: Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method

BSI: British Standards Institution

CML: Método de análise LCA desenvolvido pela Universidade de Leiden

Ecoinvent: bando de dados utilizado na análise de impacto ambiental pelo OpenLCA

FAVt: Parâmetro de estabilidade utilizado pelo software TQS

ISO: International Organization for Standardization

LCA: Life Cycle Assessment

LCI: Life Cycle Inventory

LCIA: Life Cycle Impact Assessment

NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (2014)

NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações (2019)

NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações (1988)

OpenLCA: Software de análise LCA

TQS: Software de cálculo estrutural, desenvolvido pela TQS Informática

γ_z : GamaZ (parâmetro de estabilidade)

α : Alfa (parâmetro de estabilidade)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Objetivo	14
1.2. Limitações	15
1.3. Delimitações.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. Considerações sobre vento.....	16
2.2. Taxas de armaduras.....	17
2.3. Estabilidade.....	17
2.3.1. Estrutura de nós fixos.....	17
2.3.2. Estrutura de nós móveis.....	17
2.3.3. GamaZ	18
2.3.4. Alpha.....	18
2.4. Características da análise LCA	19
2.5. Fases de uma análise LCA	20
2.6. Análise de inventário do ciclo de vida.....	21
2.7. LCA na construção	23
3. MÉTODO.....	25
3.1. Metodologia.....	25
3.2. Características dos modelos analisados	26
3.2.1. Arquitetura.....	26
3.2.2. Considerações gerais válidas para os 5 modelos:.....	29
3.2.3. Características únicas de cada modelo.....	31
3.2.3.1. Modelo 10 de pavimentos	31
3.2.3.2. Modelo de 15 pavimentos	32
3.2.3.3. Modelo de 20 pavimentos	33
3.2.3.4. Modelo de 25 pavimentos	34
3.2.3.5. Modelo 30 de pavimentos	36
3.3. Análise de impacto ambiental.....	38
3.4. Determinação do inventário.....	38
3.5. Categorias de impacto e indicadores	43
3.5.1. Potencial de Acidificação	43
3.5.2. Mudança Climática.....	43
3.5.3. Potencial de Eutrofização.....	43
3.5.4. Ecotoxicidade ambiental	44
3.5.5. Toxicidade Humana	44

3.5.6. Uso de solo	44
3.5.7. Oxidação fotoquímica.....	44
3.5.8. Recursos (depleção abiótica de recursos)	44
3.5.9. Depleção da camada de ozônio.....	45
4. RESULTADOS	46
4.1. Projeto estrutural	46
4.1.2. Modelo 15 pavimentos	46
4.1.3. Modelo 20 pavimentos	47
4.1.4. Modelo 25 pavimentos	48
4.1.5. Modelo 30 pavimentos	48
4.1.6. Comparação dos parâmetros.....	49
4.2. Análise de impacto ambiental.....	51
5. CONCLUSÕES.....	63
REFERÊNCIAS.....	64
APÊNDICES.....	66

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil vem evoluindo constantemente durante décadas. Novas técnicas foram desenvolvidas, tecnologias foram criadas, permitindo que se construa em novos patamares de qualidade e inovação. Embora essas novas técnicas possibilitem construções cada vez mais eficientes, o setor da construção civil ainda contribui consideravelmente para a emissão de gases do efeito estufa. A construção civil é responsável por 30 % das emissões de gases do efeito estufa, de acordo com a UNEP-SBCI (*The United Nations Environment Programme Sustainable Buildings and Climate Initiative, 2007*). Tendo em mente esses dados, a estimativa dos impactos ambientais gerados pelas estruturas de edifícios torna-se relevante. Entre os materiais utilizados na construção civil, o aço e o concreto são os que têm maiores emissões de carbono e consumo energético por m² de construção, conforme apresenta os dados da Tabela 1. Logo, percebe-se que as edificações podem reduzir os impactos ambientais, visto que uma estrutura projetada de acordo com modelos estruturais ou altura da edificação mais eficientes, terá menor consumo dos materiais que têm alto grau de impacto, como aço e concreto.

Tabela 1 - Emissões de carbono e consumo energético por material

Material	Emissões de Carbono (kgCO _{2e} /m ²)	Peso (kg/m ²)	Consumo energético (MJ/m ²)
Aço	142,2	64,9	1415,8
Concreto	123,9	905,3	209,4
Paredes	68,2	334,1	260,3
Argamassa	58,1	372,8	223,7
Tubos PVC	33,4	5,9	17,0
Materiais isolamento	21,2	1,1	15,8
Cerâmicas	12,1	3,1	22,9
Portas e janelas	9,5	5,4	112,1
Tintas	5,0	0,7	19,8
Cabos de cobre	2,6	0,3	12,2
Madeira	1,4	5,0	5,9
Impermeabilização	0,6	0,5	0,02
Pedras	0,5	17,1	3,6

Fonte: Prediction of embodied carbon emissions from residential buildings with different structural forms Yujie Cangb, Liu Yanga, Zhixing Luoa, Nan Zhangb

O engenheiro deve fazer escolhas que mais se adequam a realidade das estruturas projetadas. O comparativo das soluções estruturais, ou da altura da edificação, torna-se uma ferramenta interessante e útil no contexto de projeto, pois permite a escolha de menor impacto e de melhor uso das matérias-primas.

Nesse trabalho, são utilizados edifícios com diferentes números de pavimentos em um estudo comparativo dos impactos ambientais originados por uma edificação residencial em concreto armado. Para que os parâmetros sejam válidos para comparação, as cinco edificações apresentam a mesma planta tipo, mesma arquitetura e uso, apenas variando o número de pavimentos. Os modelos têm 10, 15, 20, 25 e 30 pavimentos. O dimensionamento segue as normas brasileiras, como a NBR 6118, NBR 6120 e NBR 6123. O cálculo estrutural é feito no *software* de análise e dimensionamento estrutural TQS.

Os impactos ambientais dos diferentes modelos são avaliados através de uma análise de ciclo de vida com os quantitativos de materiais retirados dos modelos estruturais. A análise de ciclo de vida é feita através da metodologia LCA (*Life Cycle Assessment*) que considera todas as etapas envolvidas na cadeia produtiva, desde a produção, transporte, construção até a disposição final da estrutura. Essa análise foi feita com o *software* *OpenLCA*, utilizando o método CML (*Centrum voor Milieukunde Leiden*) e banco de dados *Ecoinvent*.

Os resultados do dimensionamento e quantitativos, assim como os resultados da análise de impacto ambiental foram apresentados após a discussão do método utilizado. O capítulo final do trabalho versa sobre as conclusões do estudo comparativo e qual o número de pavimentos que gera o menor impacto ambiental.

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é a realização de um estudo comparativo entre cinco modelos estruturais de uma edificação residencial, com o mesmo pavimento tipo, variando somente o número de pavimentos. Os modelos têm 10, 15, 20, 25 e 30 pavimentos. Após a realização do projeto estrutural, atendendo as normas brasileiras específicas, será feita uma análise de impacto ambiental

com os quantitativos de materiais de cada modelo por meio de uma análise LCA, a fim de avaliar a influência do número de pavimentos, ou seja, a altura da edificação, nos impactos ambientais.

1.2. Limitações

Este trabalho se limita ao estudo comparativo de edificações em concreto armado, para uso residencial na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. O dimensionamento dos modelos estruturais foi feito pelo *software* de cálculo estrutural TQS e segue as normas brasileiras NBR 6118, NBR 6120, NBR 6123.

As fundações não foram consideradas, já que o solo apresenta grande variabilidade e impacta diretamente no dimensionamento dessas. Questões tais como uso de solo, de gasto energético ao longo da vida útil da estrutura e o impacto urbano de edificações de diferentes portes não foram levadas em conta.

1.3. Delimitações

O trabalho delimita-se ao estudo de edificações para uso residencial, com o mesmo pavimento tipo, variando somente o número de andares.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo consiste na apresentação de conceitos normativos utilizados no dimensionamento e na análise LCA.

2.1. Considerações sobre vento

De acordo com a norma NBR 6123 – Forças devido ao vento em edificações – Procedimento (1988), o cálculo do carregamento imposto pelo vento segue as restrições de local no país do projeto, tipo de terreno, topografia do terreno, densidade e altura das edificações vizinhas e uso da edificação.

Para a localização dos modelos, em Porto Alegre, o velocidade básica é definida em 46 m/s. Definiu-se uma localização em terreno plano, terreno coberto por obstáculos em zona urbanizada (categoria V) e edificação classe B para os modelos até 50 m e classe C para os demais.

Com isso, o coeficiente S1 é igual a 1, o coeficiente S3 vale 1 e o coeficiente S2 é função da altura do pavimento em que a carga horizontal é aplicada. Foi definido vento de alta turbulência, no qual utiliza-se a Figura 1, da NBR 6123.

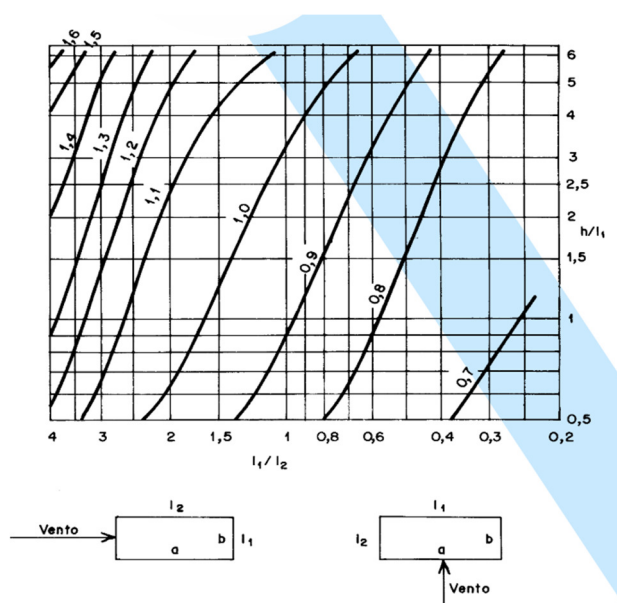


Figura 1 - Ábaco para ventos de alta turbulência (NBR 6123, 1988)

Fonte: NBR 6123, figura 5

2.2. Taxas de armaduras

A taxa de armadura máxima foi definida como um dos critérios para a definição da seção dos pilares nos modelos estudados. De acordo com item 17.3.5.3.2 da NBR 6118, a área máxima de aço em pilares deve ser menor que 8% da área de concreto. Este valor leva em consideração áreas de emenda. Logo, para fins de dimensionamento, considera-se que a área máxima de aço longitudinal deve ser inferior a 4% da área de concreto.

2.3. Estabilidade

Um critério utilizado para validar o dimensionamento dos modelos e permitir que a comparação seja mais razoável é o uso dos parâmetros de estabilidade. Como critério, os 5 modelos devem ter o coeficiente G_{mZ} , apontado adiante, na mesma ordem de magnitude.

De acordo com a NBR 6118, as estruturas podem ser classificadas com estruturas de nós fixos e estruturas de nós móveis. As definições estão atreladas a estabilidade global da estrutura e estão apresentadas a seguir.

2.3.1. Estrutura de nós fixos

Estruturas podem ser consideradas de nós fixos quando os deslocamentos horizontais são pequenos e conseqüentemente os efeitos de 2ª ordem são desprezíveis (isso ocorre quando os esforços horizontais são inferiores a 10% dos respectivos esforços de 1ª ordem).

2.3.2. Estrutura de nós móveis

São aquelas onde os deslocamentos horizontais não são pequenos e os efeitos de 2ª ordem são importantes (os esforços horizontais são superiores a 10% dos respectivos esforços de 1ª ordem).

De acordo com a norma, a classificação da estrutura se dá pelos coeficientes GamaZ e Alfa.

2.3.3. GamaZ

De acordo com a NBR 6118, item 15.5.3, o coeficiente γ_z avalia a importância dos esforços de segunda ordem globais, sendo válido para estruturas com no mínimo 4 andares. O coeficiente é obtido por análise linear de primeira ordem, para cada caso de carregamento.

O coeficiente é dado por:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tod,d}}{M_{1,tod,d}}}$$

Onde:

$\Delta M_{tod,d}$: soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura pelos deslocamentos horizontais de seus pontos de aplicação;

$M_{1,tod,d}$: é o momento de tombamento, que é a soma dos momentos de todas as forças horizontais em relação a base da estrutura.

Caso $\gamma_z \leq 1,1$ a estrutura pode ser considerada estrutura de nós fixos. Caso $\gamma_z \geq 1,1$, a estrutura é considerada de nós móveis.

2.3.4. Alpha

De acordo com o item 15.5.2:

Se $\alpha < \alpha_1$ a estrutura pode ser considerada de nós fixos.

$$\alpha = H_{tot} * \sqrt{N_k / (E_{CS} I_C)}$$

E:

$$\alpha_1 = 0,2 + 0,1n, \text{ se } n \leq 3;$$

$$\alpha_1 = 0,6, \text{ se } n \geq 4; n = \text{número de andares}; H_{tot} = \text{altura total da estrutura};$$

N_k = somatório de todas as cargas verticais;

$E_{CS}I_C$ = somatório de todos os valores de rigidez de todos os pilares na direção considerada.

2.3.5. FAVt

FAVt é o fator de amplificação de esforços horizontais que pode considerar os deslocamentos horizontais gerados pelas cargas verticais (calculado para combinações ELU com a mesma formulação do GamaZ).

Como o GamaZ é calculado para cada caso isolado de vento, os deslocamentos horizontais provocados pelas cargas verticais não são levados em conta. Para contornar isso, o TQS utiliza o coeficiente FAVt, que tem a mesma formulação do GamaZ, mas considera as combinações no ELU, ou seja, o resultado passa a depender da magnitude das forças do vento.

2.4. Características da análise LCA

A análise de impacto ambiental utiliza o método LCA (Avaliação do Ciclo de vida, ACV), seguindo os padrões internacionais ISO 14040 e ISO 14044. De maneira geral, a metodologia LCA considera os aspectos de uso de recursos, energia e disposição final, que envolvem um produto desde sua concepção até o fim de vida útil, incluindo a extração de matéria-prima, produção, distribuição e disposição final. O objetivo do método LCA é ser uma ferramenta que auxilie o projetista na comparação e tomada de decisão entre as alternativas envolvidas nas fases de desenvolvimento de um produto. (M.A. CURRAN, 2016)

De acordo com a NBR ISO 14044 (ABNT 2009):

A ACV considera todo o ciclo de vida de um produto, desde a extração e aquisição de matérias-primas, através da produção de energia e materiais, manufatura, uso, tratamento de fim de vida até a disposição final. Com base em tal visão e perspectiva sistemáticas, a transferência de cargas ambientais potenciais entre estágios do ciclo de vida ou entre processos individuais pode ser identificada e possivelmente evitada.

Ainda no item 4.3, a NBR ISO 14044 deixa claro que uma análise de ciclo de vida enfoca em impactos ambientais potenciais e não absolutos ou precisos, já que esse tipo de análise envolve incertezas inerentes a modelagem e a própria metodologia que o LCA é desenvolvido.

A análise de ciclo de vida é muitas vezes conhecida como uma análise quantitativa dos impactos ambientais de um produto. Uma ACV é uma ferramenta que permite a análise das “cargas ambientais” que um produto gera ao longo de sua vida útil e os potenciais impactos ambientais dessa carga ao meio ambiente. Produto pode ser um produto físico, como uma edificação, ou um serviço. Emissões para o ar, solo, água e consumo de recursos constituem as cargas ambientais. Os impactos ambientais são os impactos em áreas de interesse, como ecossistemas, a saúde e recursos naturais (ISO 14040, 1997).

2.5. Fases de uma análise LCA

O LCA tem quatro fases: Definição de objetivo e escopo, análise de inventário (LCI – *Life Cycle Inventory*), avaliação de impacto e interpretação da análise de ciclo de vida (ISO 14040, 1997). A Figura 2 mostra a relação das quatro fases.

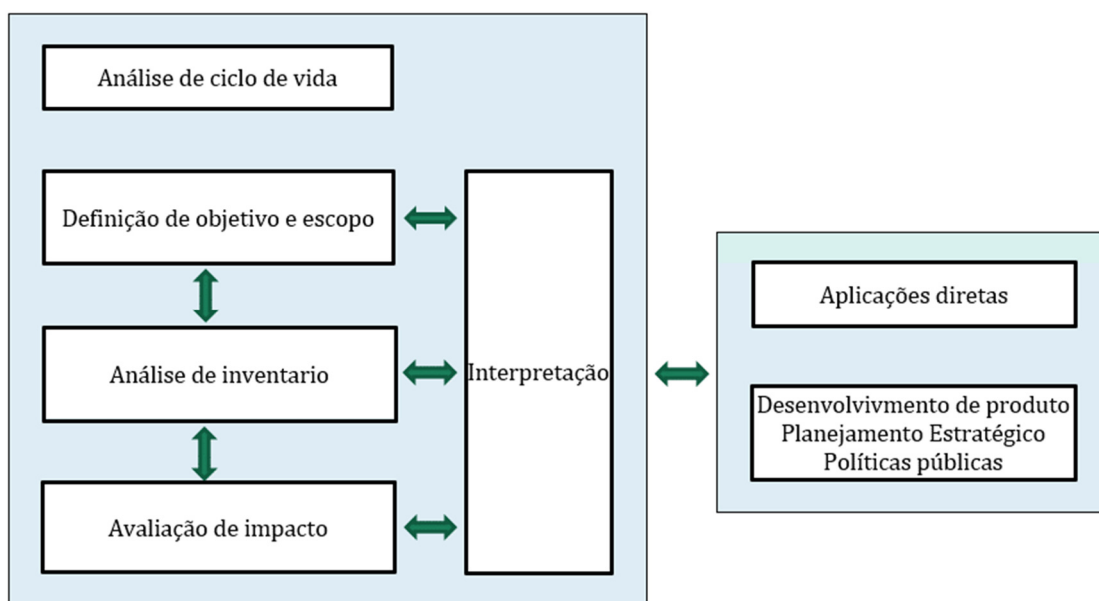


Figura 2 – As quatro fases de uma análise LCA

Fonte: Adaptado ISO 14041, 1998

A definição de objetivo e escopo está relacionada com a definição do produto estudado, qual o motivo da análise LCA e a definição das fronteiras do sistema e da unidade funcional, métodos de avaliação de impacto, entre outros. As fronteiras do sistema referem-se à identificação e justificativa de quais aspectos da vida útil de um produto devem ser incluídas na análise LCA. (MUTHU, 2020). A unidade funcional é a medida da função do sistema estudado, propiciando uma relação entre os fluxos de entrada e saída.

Após as definições iniciais, os fluxos de entrada (como os materiais e energia de cada processo) e os fluxos de saída (como o produto final e as emissões) são relacionados no inventário, pela soma das contribuições parciais de cada fluxo de entrada e saída. O inventário (LCI) gera informações sobre a quantidade de cargas ambientais de um produto em sua vida útil.

Os impactos ambientais são avaliados então através das informações do inventário, por meio de um processo que quantifica o impacto ambiental em categorias de impacto, definidas pelo usuário. A última fase envolve a interpretação dos resultados e as conclusões da análise podem ser tomadas.

2.6. Análise de inventário do ciclo de vida

O inventário do ciclo de vida é representado pela sigla LCI (Life Cycle Inventory). A análise de LCI é definida pela ISO como a fase da análise de ciclo de vida englobando a compilação e quantificação dos fluxos de entrada e saída de um produto durante seu ciclo de vida (ISO 14040, 1997). O inventário refere-se à compilação de vários fluxos de entrada e saída envolvidas no ciclo de vida de um produto. A análise LCI requer a quantificação dos seguintes elementos (MUTHU, 2020):

- a) Requerimentos de energia;
- b) Necessidade de matéria-prima;
- c) Emissões atmosféricas;
- d) Emissões relacionadas à água;

- e) Emissões ao solo;
- f) Resíduos sólidos;
- g) Outras emissões ao ambiente.

Na prática, a análise de inventário se resume à coleta de dados e a sua respectiva análise. A Figura 3 - Procedimentos para o LCI

Fonte: Adaptado ISO 14041, 1998. Figura 3 mostra o procedimento geral para a implementação do LCI.

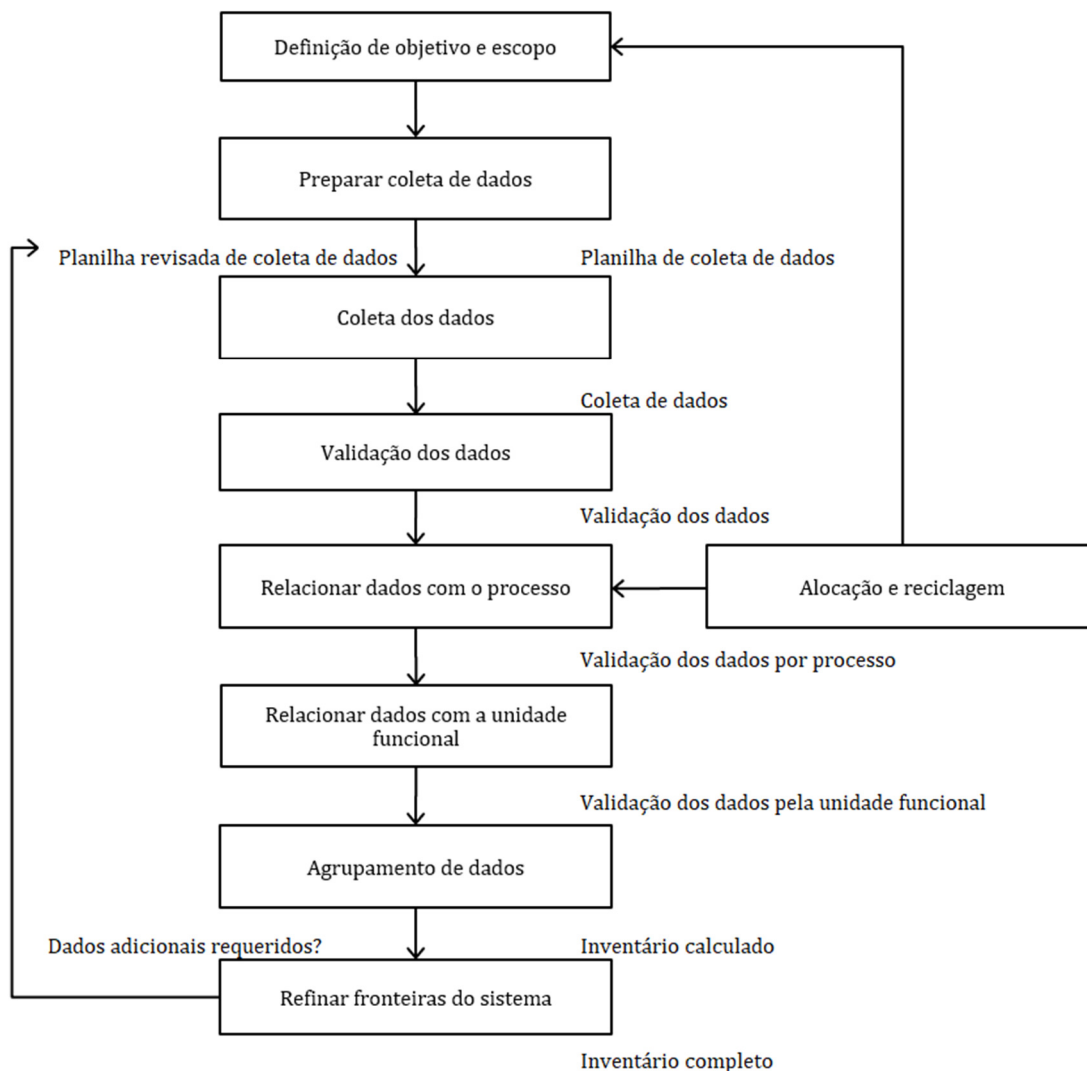


Figura 3 - Procedimentos para o LCI

Fonte: Adaptado ISO 14041, 1998

2.7. LCA na construção

Nesse trabalho, os produtos em estudo são construções residenciais. Logo, é necessário usar uma metodologia adaptada a este tipo de produto. Nesse sentido, esse trabalho baseou-se na norma britânica BS 15978 (BSI, BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2011), que especifica a metodologia LCA para construções, sendo essa uma norma de referência no continente europeu.

A Figura 4 mostra os estágios necessários na análise do ciclo de vida de uma edificação.

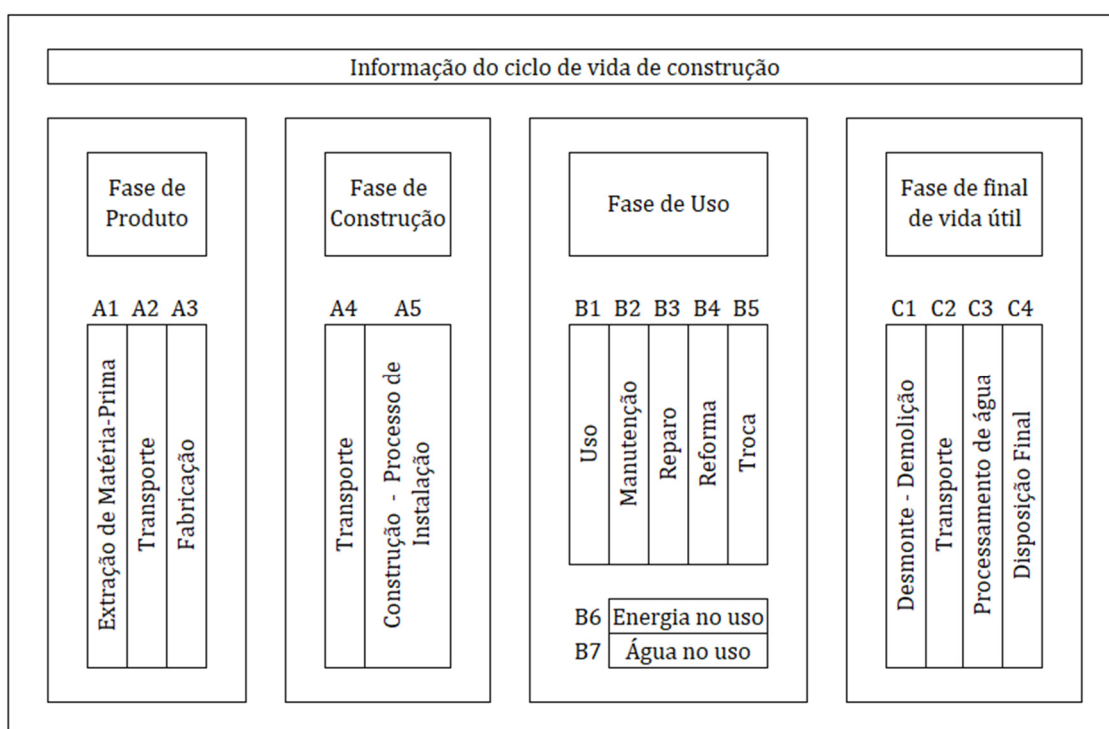


Figura 4 - Estágios do LCA pela BS 15978

Fonte: adaptado BS 15978 (2011)

Nesse estudo de caso, levou-se em conta as etapas envolvidas na fase de produto, incluindo fornecimento de matéria-prima (A1), transporte (A2), e produção (A3) de concreto e aço. A construção da estrutura de concreto armado corresponde à fase de construção, que inclui transporte (A4) e o processo de construção (A5). A fase de final de vida de projeto inclui demolição (C1), transporte (C2), processamento de água (C3) e disposição final (C4).

Não foram inclusos neste trabalho a contabilização dos impactos referentes a atividades uso (B1), de manutenção durante a vida útil das estruturas e possíveis modificações futuras nas edificações (B2, B3, B4 e B5).

3. MÉTODO

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do trabalho.

3.1. Metodologia

O estudo consiste nas etapas:

- a) Definição de arquitetura com poucas interferências, evitando assim vieses que alterassem ou tornassem a comparação volátil;
- b) Definição dos carregamentos de uso da edificação;
- c) Definição de carregamentos horizontais devido ao vento;
- d) Definição de parâmetros de estabilidade e critérios que compatibilizem os 5 modelos, a fim de normalizar os dados para melhor comparação;
- e) Modelagem dos 5 modelos no *software* TQS;
- f) Análise da estabilidade dos 5 modelos;
- g) Dimensionamento dos pilares, lajes e vigas;
- h) Extração dos quantitativos de materiais;
- i) Adaptação dos dados para o contexto brasileiro de análise LCA;
- j) Modelagem dos modelos no *software* OpenLCA;
- k) Extração e análise dos dados;
- l) Conclusões sobre os resultados;
- m) Observações finais.

3.2. Características dos modelos analisados

3.2.1. Arquitetura

A análise e dimensionamento dos elementos foi feita a partir de uma planta de arquitetura simétrica e simples, para evitar que especificidades de cálculo ocorram, mantendo assim o foco do trabalho e impedindo que outros itens fora do escopo se tornem relevantes.

Sendo assim, a planta geral está representada na Figura 5. Como a planta é simétrica e para maior detalhamento da arquitetura e da planta de formas, apenas o segmento de planta hachurado está disposto na Figura 6, que mostra a arquitetura do pavimento tipo. Cada pavimento é composto por 2 apartamentos idênticos formados por uma sala de estar e jantar, uma cozinha, uma área de serviço, um lavabo e duas suítes com closet. Cada pavimento tem área de 376,1 m², incluídas as áreas dos dois apartamentos e as áreas destinadas a elevadores, escadas e espaços de uso comum.

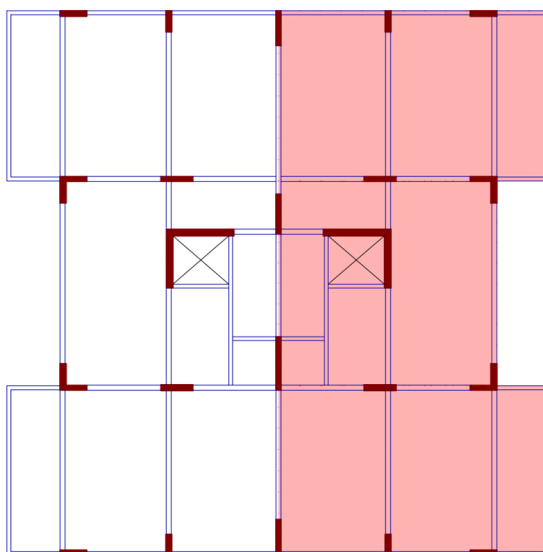


Figura 5 - Planta simétrica, área hachurada em detalhe abaixo

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 7 mostra a planta de formas, com as dimensões dos elementos estruturais. As lajes foram dimensionadas com espessura 10 cm, valor que manteve níveis de deformação de acordo com a NBR 6118. Essa espessura foi mantida em todos os 5 modelos, em todas as lajes de todos os pavimentos.

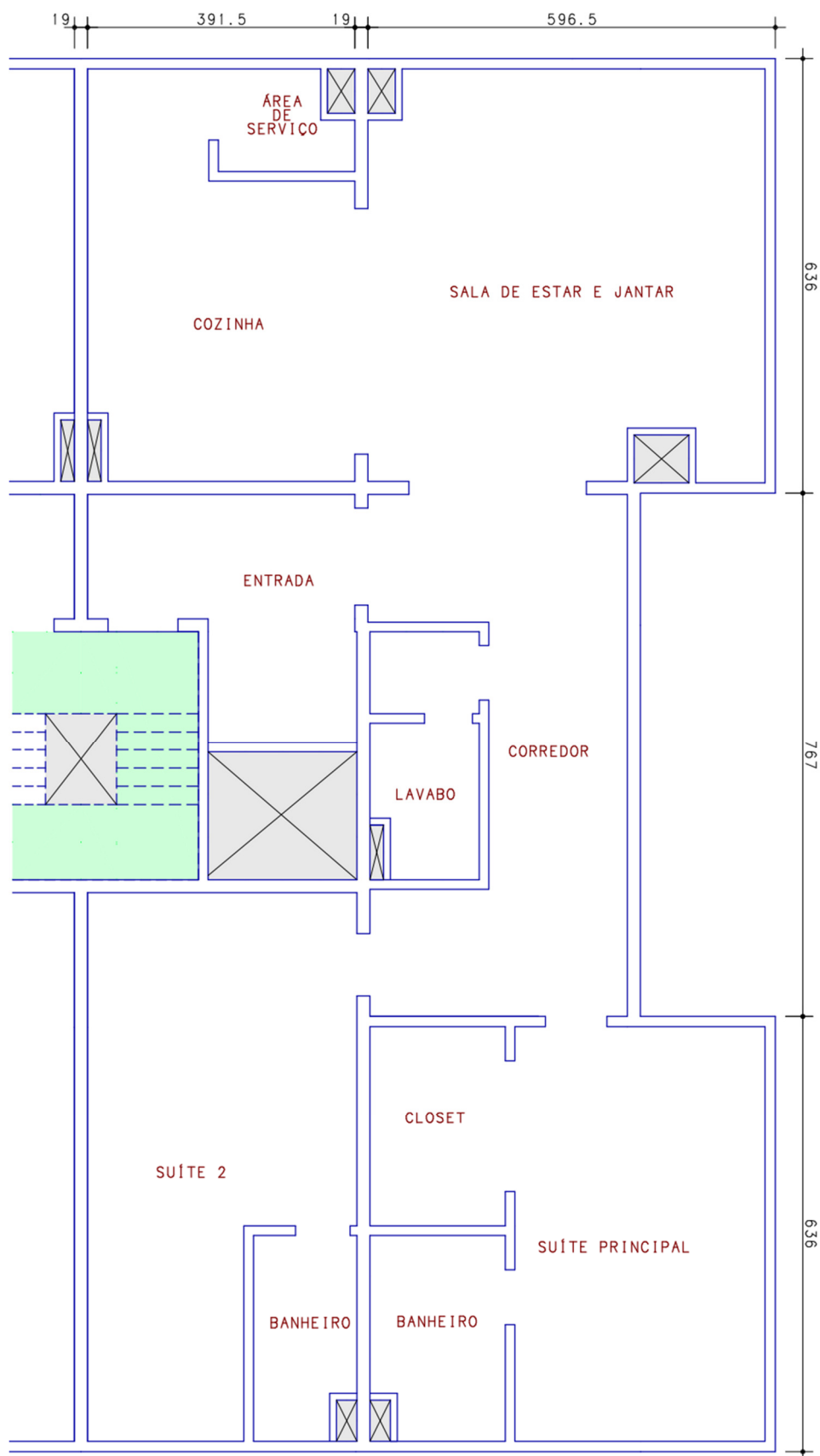


Figura 6 - Planta arquitetônica do pavimento tipo

Fonte: Elaborada pelo autor

As vigas também foram padronizadas para todos os modelos, com as dimensões mostradas na planta de formas da Figura 7. Essas dimensões foram padronizadas de tal maneira que as deformações estejam dentro dos limites da norma e que para os maiores modelos, as taxas de armaduras causadas pelos pórticos ainda fiquem dentro dos limites normativos.

A padronização das lajes e vigas foi feita para maior homogeneização do trabalho e que os parâmetros de comparação sejam melhores, já que nesse caso, o que muda é o consumo de aço entre os modelos.

Já os pilares tiveram que ser escolhidos de acordo com os esforços solicitantes de cada estrutura. Como critério, a seção dos pilares foi escolhida para atender a taxa máxima de armadura de 4% da área de concreto, pela NBR 6118.

3.2.2. Considerações gerais válidas para os 5 modelos:

O concreto tem resistência característica à compressão de 40 MPa em todos os modelos (de acordo com a tabela 9, isso influenciara o cálculo dos quantitativos para a análise LCA). A classe de agressividade ambiental é II – Moderada, de acordo com a NBR 6118, Tabela 2 e Tabela 3. A determinação da classe de agressividade ambiental tem importante impacto no dimensionamento dos elementos estruturais, já que é parâmetro para a determinação dos cobrimentos. A classe II foi escolhida e é adequada para a cidade de Porto Alegre e para o uso residencial dos modelos.

Tabela 2 - Relação a/c e Classe de concreto de acordo com a Classe de agressividade

Concreto	Tipo	Classe de agressividade do ambiente			
		I	II	III	IV
Relação água /cimento em massa	Concreto armado	≤0.65	≤0.60	≤0.55	≤0.45
	Concreto protendido	≤0.60	≤0.55	≤0.50	≤0.45
Classe de concreto (NBR 8953)	Concreto armado	≥C20	≥C25	≥C30	≥C40
	Concreto protendido	≥C25	≥C30	≥C35	≥C40

Fonte: NBR 6118 (2014)

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade do ambiente			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos em contato com o solo	30		40	50
Concreto protendido	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

Tabela 3 - Cobrimentos de acordo com a Classe de agressividade ambiental

Fonte: NBR 6118 (2014)

No modelo estrutural no *software* TQS, foi utilizado o modelo IV. Este é um modelo integrado de pórtico espacial, que considera os pavimentos como discretizados em grelha isolada de lajes e vigas, levando em conta a presença de pilares através de molas nos apoios. Cada pavimento é independente dos demais.

Os carregamentos foram baseados na norma brasileira de cargas, a NBR 6120. A Tabela 4 mostra os valores utilizados no dimensionamento estrutural.

Tabela 4 - Cargas distribuídas aplicadas nas lajes

Ambiente	Permanentes (kgf/m ²)	Acidentais (kgf/m ²)
Salas, quartos	100	150
cozinhas	110	150
corredores	100	300
banheiros	110	150
áreas de serviço	110	200

Fonte: Elaborado pelo autor

A disposição dos pilares é apresentada na Figura 8.

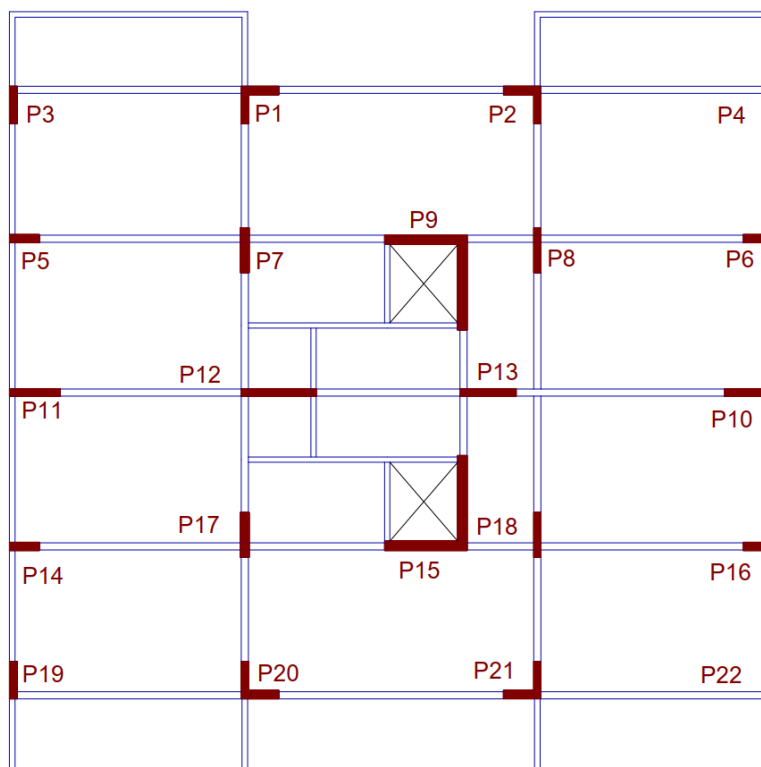


Figura 8 - Disposição dos pilares na planta baixa

Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.3. Características únicas de cada modelo

3.2.3.1. Modelo 10 de pavimentos

O modelo de 10 pavimentos apresenta um pavimento térreo e 10 pavimentos tipo. Os pilares não tem variação na seção ao longo de toda a altura da edificação. Há apenas uma planta de pavimento tipo. A Figura 9 mostra o modelo 3D da estrutura. Os pilares têm as seções representadas na Tabela 5.

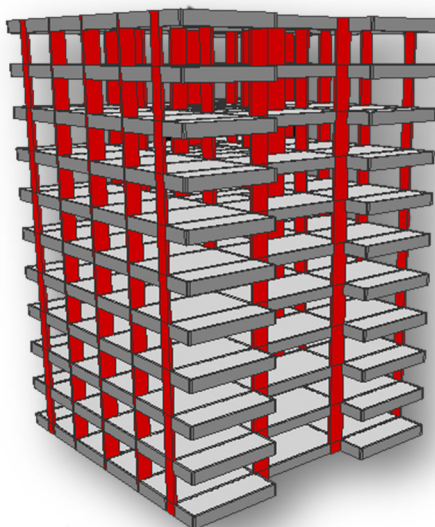


Figura 9 - 10 pavimentos

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 5 - Seção dos pilares do modelo de 10 pavimentos

Pilares	10 pavimentos		
P1	19x120	P12	24x120
P2	19x120	P13	24x90
P3	19x80	P14	19x100
P4	19x80	P15	19x220
P5	19x100	P16	19x100
P6	19x100	P17	22x110
P7	22x110	P18	19x110
P8	19x110	P19	19x80
P9	19x220	P20	19x120
P10	22x110	P21	19x120
P11	22x110	P22	19x80

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.3.2. Modelo de 15 pavimentos

O modelo de 15 pavimentos apresenta um pavimento térreo e 15 pavimentos tipo. Os pilares tem variação na seção ao longo da altura da edificação, conforme Tabela 6. A Figura 10 mostra o modelo estrutural no TQS.

Tabela 6 - Seção dos pilares do modelo de 15 pavimentos

Pilares	15 pavimentos		
P1	19x120	P12	24x120
P2	19x120	P13	24x90
P3	19x80	P14	19x100
P4	19x80	P15	L 220x270x19
P5	19x100	P16	19x100
P6	19x100	P17	22x110
P7	22x110	P18	19x110
P8	19x110	P19	19x80
P9	L 220x270x19	P20	19x120
P10	22x110	P21	19x120
P11	22x110	P22	19x80

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.3.3. Modelo de 20 pavimentos

O modelo de 20 pavimentos apresenta um pavimento térreo e 20 pavimentos tipo. Os pilares tem duas variações de seção ao longo da altura da edificação , conforme Tabela 7. A Figura 10 mostra o modelo estrutural no TQS.

Tabela 7 - Seção dos pilares do modelo de 20 pavimentos

Pilares	20 pavimentos				
P1	1 ao 6 pav.	L 80x80x19	P12	1 ao 6 pav.	24x150
	7 ao 12 pav.	L 80x80x19		7 ao 12 pav.	19x150
	13 ao 20 pav.	L 70x70x19		13 ao 20 pav.	19x130
P2	1 ao 6 pav.	L 80x80x19	P13	1 ao 6 pav.	24x110
	7 ao 12 pav.	L 80x80x19		7 ao 12 pav.	19x110
	13 ao 20 pav.	L 70x70x19		13 ao 20 pav.	19x95
P3	1 ao 6 pav.	19x90	P14	1 ao 6 pav.	19x115
	7 ao 12 pav.	19x80		7 ao 12 pav.	19x80
	13 ao 20 pav.	19x70		13 ao 20 pav.	19x80
P4	1 ao 6 pav.	19x90	P15	1 ao 6 pav.	L 220x270x19
	7 ao 12 pav.	19x80		7 ao 12 pav.	
	13 ao 20 pav.	19x70		13 ao 20 pav.	
P5	1 ao 6 pav.	19x115	P16	1 ao 6 pav.	19x120
	7 ao 12 pav.	19x80		7 ao 12 pav.	19x80
	13 ao 20 pav.	19x80		13 ao 20 pav.	19x80
P6	1 ao 6 pav.	19x115	P17	1 ao 6 pav.	22x110
	7 ao 12 pav.	19x80		7 ao 12 pav.	22x110
	13 ao 20 pav.	19x80		13 ao 20 pav.	22x80
P7	1 ao 6 pav.	22x130	P18	1 ao 6 pav.	19x110
	7 ao 12 pav.	22x110		7 ao 12 pav.	19x110
	13 ao 20 pav.	22x80		13 ao 20 pav.	19x80
P8	1 ao 6 pav.	19x130	P19	1 ao 6 pav.	19x90

P9	7 ao 12 pav.	19x110	P20	7 ao 12 pav.	19x80
	13 ao 20 pav.	19x80		13 ao 20 pav.	19x70
	1 ao 6 pav.	L 220x270x19		1 ao 6 pav.	L 80x80x19
	7 ao 12 pav.			7 ao 12 pav.	L 80x80x19
13 ao 20 pav.	13 ao 20 pav.		L 70x70x19		
P10	1 ao 6 pav.	22x115	P21	1 ao 6 pav.	L 80x80x19
	7 ao 12 pav.	19x115		7 ao 12 pav.	L 80x80x19
	13 ao 20 pav.	19x80		13 ao 20 pav.	L 70x70x19
P11	1 ao 6 pav.	22x120	P22	1 ao 6 pav.	19x90
	7 ao 12 pav.	19x120		7 ao 12 pav.	19x80
	13 ao 20 pav.	80x19		13 ao 20 pav.	19x70

Fonte: Elaborado pelo autor

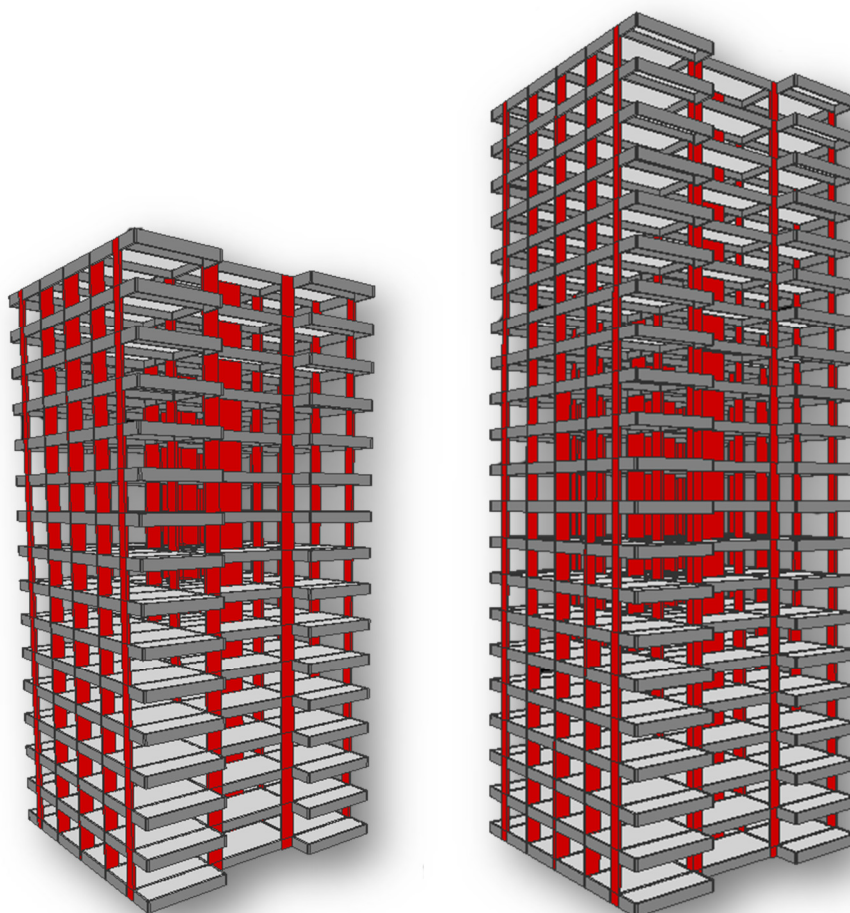


Figura 10 - 15 pavimentos e 20 pavimentos

Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.3.4. Modelo de 25 pavimentos

O modelo de 25 pavimentos apresenta um pavimento térreo e 25 pavimentos tipo. Os pilares tem duas variações de seção ao longo da altura da edificação , conforme a Tabela 8. A Figura 11 mostra o modelo estrutural no TQS.

Tabela 8 - Seção dos pilares do modelo de 25 pavimentos

Pilares	25 pavimentos				
P1	1 ao 8 pav.	L 90x90x19	P12	1 ao 8 pav.	24x180
	9 ao 16 pav.	L 90x90x19		9 ao 16 pav.	19x180
	17 ao 25 pav.	L 70x70x19		17 ao 25 pav.	19x130
P2	1 ao 8 pav.	L 90x90x19	P13	1 ao 8 pav.	24x130
	9 ao 16 pav.	L 90x90x19		9 ao 16 pav.	19x130
	17 ao 25 pav.	L 70x70x19		17 ao 25 pav.	19x95
P3	1 ao 8 pav.	19x100	P14	1 ao 8 pav.	19x115
	9 ao 16 pav.	19x100		9 ao 16 pav.	19x80
	17 ao 25 pav.	19x70		17 ao 25 pav.	19x80
P4	1 ao 8 pav.	19x100	P15	1 ao 8 pav.	L 220x270x19
	9 ao 16 pav.	19x100		9 ao 16 pav.	
	17 ao 25 pav.	19x70		17 ao 25 pav.	
P5	1 ao 8 pav.	115x19	P16	1 ao 8 pav.	19x120
	9 ao 16 pav.	80x19		9 ao 16 pav.	19x80
	17 ao 25 pav.	19x80		17 ao 25 pav.	19x80
P6	1 ao 8 pav.	19x115	P17	1 ao 8 pav.	22x150
	9 ao 16 pav.	80x19		9 ao 16 pav.	22x110
	17 ao 25 pav.	19x80		17 ao 25 pav.	22x80
P7	1 ao 8 pav.	22x150	P18	1 ao 8 pav.	19x150
	9 ao 16 pav.	22x110		9 ao 16 pav.	19x110
	17 ao 25 pav.	22x80		17 ao 25 pav.	19x80
P8	1 ao 8 pav.	19x150	P19	1 ao 8 pav.	19x100
	9 ao 16 pav.	19x110		9 ao 16 pav.	19x100
	17 ao 25 pav.	19x80		17 ao 25 pav.	19x70
P9	1 ao 8 pav.	L 220x270x19	P20	1 ao 6 pav.	L 90x90x19
	9 ao 16 pav.			7 ao 12 pav.	L 90x90x19
	17 ao 25 pav.			13 ao 20 pav.	L 70x70x19
P10	1 ao 8 pav.	22x130	P21	1 ao 6 pav.	L 90x90x19
	9 ao 16 pav.	19x120		7 ao 12 pav.	L 90x90x19
	17 ao 25 pav.	80x19		13 ao 20 pav.	L 70x70x19
P11	1 ao 8 pav.	22x140	P22	1 ao 6 pav.	19x100
	9 ao 16 pav.	19x120		7 ao 12 pav.	19x100
	17 ao 25 pav.	19x80		13 ao 20 pav.	19x70

Fonte: Elaborado pelo autor

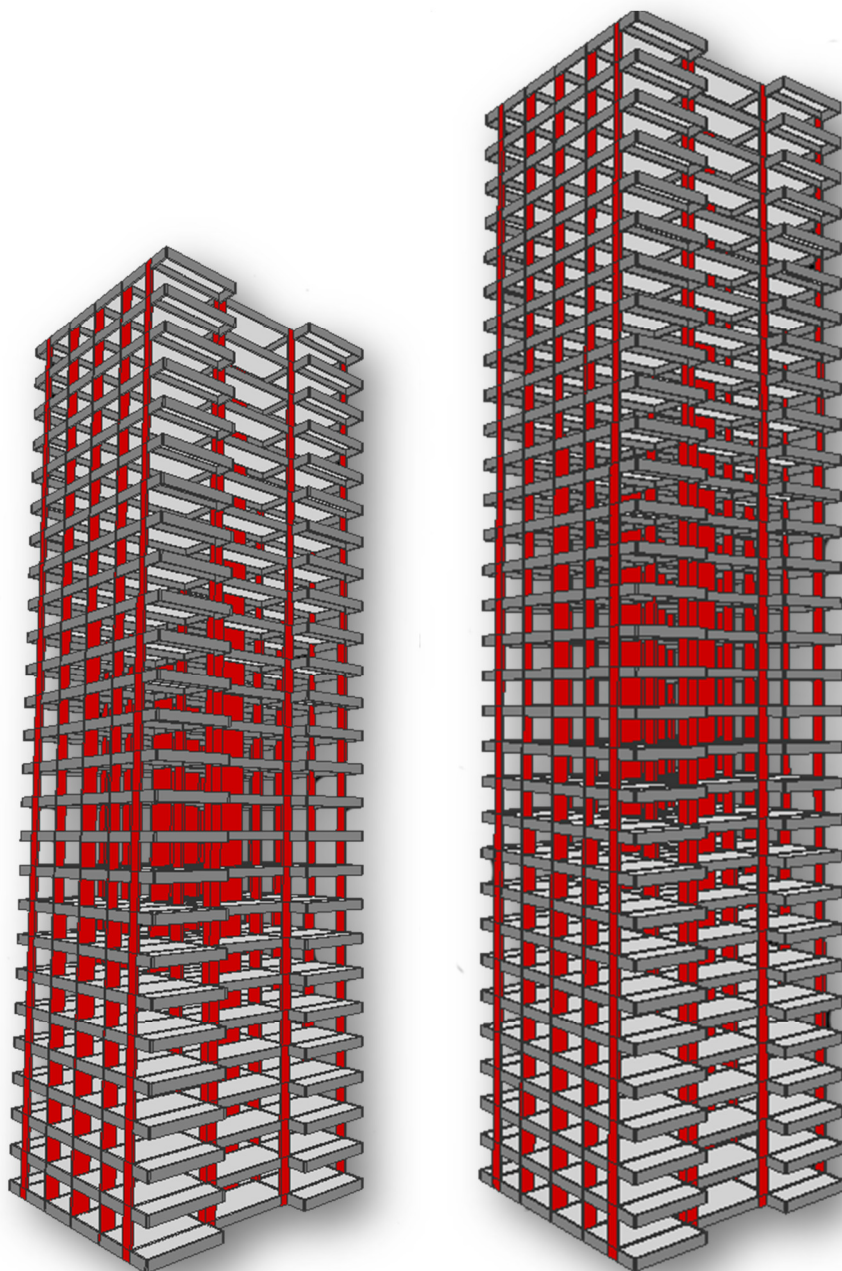


Figura 11 - 25 pavimentos e 30 pavimentos

Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.3.5. Modelo 30 de pavimentos

O modelo de 30 pavimentos apresenta um pavimento térreo e 30 pavimentos tipo. Os pilares tem duas variações de seção ao longo da altura da edificação, de acordo com a Tabela 9. A Figura 11 mostra o modelo estrutural no TQS.

Tabela 9 - Seção dos pilares do modelo de 30 pavimentos

Pilares	30 pavimentos				
P1	1 ao 10 pav.	L 100x100x19	P12	1 ao 10 pav.	24x200
	11 ao 20 pav.	L 100x100x19		11 ao 20 pav.	19x200
	21 ao 30 pav.	L 70x70x19		21 ao 30 pav.	19x130
P2	1 ao 10 pav.	L 100x100x19	P13	1 ao 10 pav.	24x150
	11 ao 20 pav.	L 100x100x19		11 ao 20 pav.	19x150
	21 ao 30 pav.	L 70x70x19		21 ao 30 pav.	19x95
P3	1 ao 10 pav.	21x100	P14	1 ao 10 pav.	25x115
	11 ao 20 pav.	21x100		11 ao 20 pav.	22x80
	21 ao 30 pav.	21x70		21 ao 30 pav.	22x80
P4	1 ao 10 pav.	21x100	P15	1 ao 10 pav.	L 220x270x19
	11 ao 20 pav.	21x100		11 ao 20 pav.	
	21 ao 30 pav.	21x70		21 ao 30 pav.	
P5	1 ao 10 pav.	25x115	P16	1 ao 10 pav.	25x115
	11 ao 20 pav.	22x80		11 ao 20 pav.	22x80
	21 ao 30 pav.	22x80		21 ao 30 pav.	22x80
P6	1 ao 10 pav.	25x115	P17	1 ao 10 pav.	24x160
	11 ao 20 pav.	22x80		11 ao 20 pav.	23x120
	21 ao 30 pav.	22x80		21 ao 30 pav.	23x80
P7	1 ao 10 pav.	24x160	P18	1 ao 10 pav.	19x160
	11 ao 20 pav.	23x120		11 ao 20 pav.	19x120
	21 ao 30 pav.	23x80		21 ao 30 pav.	19x80
P8	1 ao 10 pav.	19x160	P19	1 ao 10 pav.	21x100
	11 ao 20 pav.	19x120		11 ao 20 pav.	21x100
	21 ao 30 pav.	19x80		21 ao 30 pav.	21x70
P9	1 ao 10 pav.	L 220x270x19	P20	1 ao 6 pav.	L 100x100x19
	11 ao 20 pav.			7 ao 12 pav.	L 100x100x19
	21 ao 30 pav.			13 ao 20 pav.	L 70x70x19
P10	1 ao 10 pav.	28x130	P21	1 ao 6 pav.	L 100x100x19
	11 ao 20 pav.	19x130		7 ao 12 pav.	L 100x100x19
	21 ao 30 pav.	19x80		13 ao 20 pav.	L 70x70x19
P11	1 ao 10 pav.	28x136	P22	1 ao 6 pav.	21x100
	11 ao 20 pav.	19x136		7 ao 12 pav.	21x100
	21 ao 30 pav.	19x80		13 ao 20 pav.	21x70

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3. Análise de impacto ambiental

A análise de impacto ambiental foi feita através da metodologia LCA (Life Cycle Assessment – análise de ciclo de vida), que analisa o impacto causado por um produto ao longo de sua vida útil.

3.4. Determinação do inventário

Com os quantitativos extraídos a partir dos modelos estruturais, têm-se uma série de considerações a serem feitas e ajustes dos valores para a modelagem no *software* OpenLCA. A partir do volume de concreto de cada modelo e de seu fck, utiliza-se o método proposto pelo ACI 211.1 (ACI 211.1, 1991) para obtenção dos quantitativos das matérias-primas do concreto. Utilizando o cimento Portland brasileiro do tipo CPPII – F, conforme sugerido por Rohden e Garcez (2018), utiliza-se agregado graúdo de basalto (2.90 g/cm^3), areia (2.63 g/cm^3), aditivo plastificante e 1,5% de ar aprisionado. Obtêm-se então, as quantidades de cimento, areia, agregados graúdos, água e aditivo de cada modelo. Nos casos estudados, foi utilizada a Tabela 10 para concretos com resistência à compressão de 40 MPa.

Tabela 10 - Proporção de materiais na mistura de concreto conforme método pela ACI 211.1

Concreto	Cimento Kg/m ³	Areia Kg/m ³	Agregados graúdos Kg/m ³	Proporção água/cimento	Aditivo l/m ³
C25	278,69	829,02	1192,8	0,61	1,67
C30	314,81	798,86	1192,8	0,54	1,89
C35	361,7	759,71	1192,8	0,47	2,17
 C40	404,76	712,76	1192,8	0,42	2,43
C45	447,37	688,19	1192,8	0,38	2,68
C50	500	644,24	1192,8	0,34	3

Fonte: ACI 211.1

Um dos parâmetros utilizados na análise LCA envolve o transporte dos produtos, matérias primas e resíduos provenientes da disposição final da estrutura. Esse parâmetro deve ser adaptado ao contexto em que um produto é

inserido. A unidade utilizada no OpenLCA é *ton.× km*. O valor é resultado do produto da massa de material pela distância transportada.

As distâncias utilizadas nesse estudo são mostradas na Tabela 11. Essas distâncias se referem a um cenário de construção residencial em uma cidade de tamanho médio (496,8 km², 1,5 milhões de habitantes) no sul do Brasil (GARCEZ M.R.; ROHDEN A. B.; GODOY L. G. G. D, 2019).

Tabela 11 - Distâncias de transporte para cada tipo de material

	Modo de transporte	Distância (km)
Transporte do aditivo da fábrica até a concreteira	Caminhão (27 ton.)	1100
Transporte do cimento da fábrica até a concreteira	Trem	950
Transp. de agreg. grosseiros da fábrica até a concreteira	Caminhão (27 ton.)	60
Transporte da areia até a concreteira	Barca	100
Transporte do concreto da concreteira para o canteiro	Caminhão (27 ton.)	20
Transporte do aço da fábrica para o canteiro	Caminhão (27 ton.)	30
Transporte das formas da fábrica para o canteiro	Caminhão (27 ton.)	750
Disposição final do concreto e aço	Caminhão (27 ton.)	30

Fonte: GARCEZ M.R.; ROHDEN A. B.; GODOY L. G. G. D, 2019

A Figura 12 apresenta esquematicamente as fronteiras do sistema analisado, de acordo com o item de definição de escopo da ISO 14040. A unidade funcional considerada é o sistema estrutural de uma edificação residencial de 10, 15, 20, 25 e 30 pavimentos, em estrutura aporticada em concreto armado, formada por pilares e vigas e lajes.

O método LCA foi calculado por meio do *software* OpenLCA, um software de uso aberto e livre, que permite a utilização de diferente metodologias e bancos de dados. Neste estudo, considerou-se o modelo cut-off, que considera a produção primária de materiais alocada ao usuário primário do material. Se o material é reciclado, o produtor primário não recebe crédito pelo fornecimento de materiais reciclados O banco de dados utilizado pelo OpenLCA é o Ecoinvent, versão 3.5, adaptado às condições brasileiras.

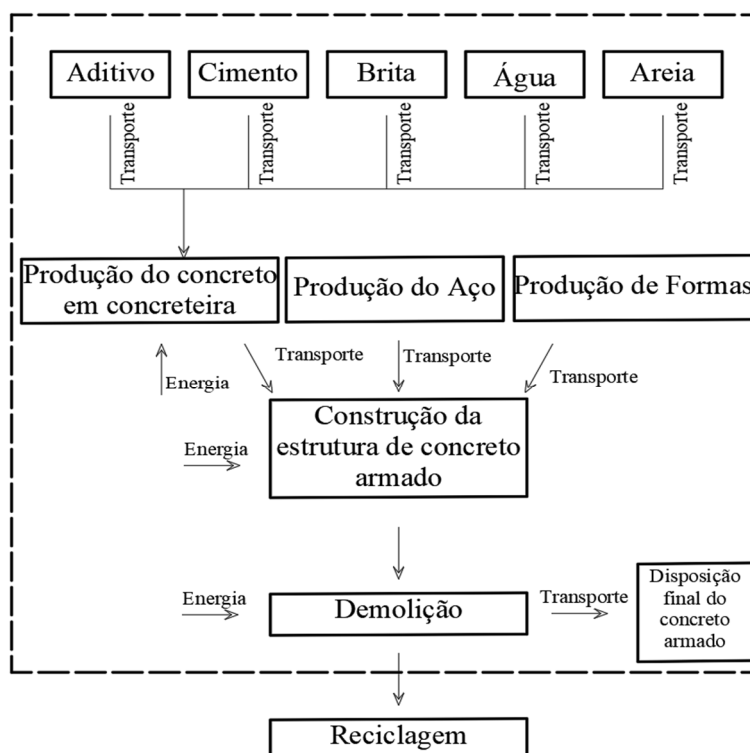


Figura 12 - Fronteiras do sistema estudado

Fonte: Elaborada pelo autor

Os processos e fluxos considerados na avaliação dos impactos ambientais, assim como os dados obtidos pela análise estrutural, estão apresentados na Tabela 12, levando em consideração quantitativos de materiais, energia utilizada na produção dos materiais, construção da estrutura de concreto armado e final de vida útil da estrutura. Os fluxos utilizados são mostrados na Tabela 12, sendo distintos em 3 processos diferentes para cada modelo. Os processos constituem o ciclo de vida de uma edificação, adaptados dos estágios definidos pela BS 15978:2011, sendo eles:

- a. Fase de Produto: envolvem os impactos gerados pelas matérias-primas e sua extração, seu transporte e produção dos materiais de construção, que nesse estudo se resumem em concreto e aço.
- b. Fase de Construção: impactos causados pelo processo construtivo de uma edificação, como bombeamento de concreto, transporte dos materiais da fábrica até o canteiro, adensamento do concreto.

- c. Fase de Final de Vida Útil: impactos associados ao processo de desmonte da estrutura, que envolvem sua demolição e transporte a aterro.

Tabela 12 - Inventário

Processo	Fluxo de Saída	Fluxo de Entrada	Un.	10 PAV	15 PAV	20 PAV	25 PAV	30 PAV
Fase de Produto	Concreto	Aditivo	t	2,09	3,18	4,22	5,30	6,44
		Transporte do aditivo da fábrica até a concreteira	t	2,09	3,18	4,22	5,30	6,44
		Água	t	130,36	198,53	263,45	330,43	402,01
		Cimento	t	310,37	472,68	627,26	786,73	957,18
		Transporte do cimento da fábrica até a concreteira	t	310,37	472,68	627,26	786,73	957,18
		Agregados grosseiros	t	914,64	1392,95	1848,48	2318,45	2820,73
		Transp. de agregados grosseiros da fábrica até a conc.	t	914,64	1392,95	1848,48	2318,45	2820,73
		Areia	t	546,54	832,36	1104,56	1385,39	1685,53
		Transporte da areia até a concreteira	t	546,54	832,36	1104,56	1385,39	1685,53
		Energia para preparo do concreto	kWh	2453,76	3736,96	4959,04	6219,84	7567,36
Aço	Aço	t	62,34	98,25	136,91	191,65	247,23	
Madeira das formas	Madeira das formas	m³	62,96	94,73	124,83	156,33	188,20	
Fase de Construção	Transporte dos materiais para o canteiro	Transporte do concreto da concreteira para o canteiro	m³	766,80	1167,80	1549,70	1943,70	2364,80
		Transporte do aço da fábrica para o canteiro	t	62,34	98,25	136,91	191,65	247,23
		Transporte das formas da fábrica para o canteiro	t	39,03	58,74	77,40	96,92	116,68
	Água para cura	Água para cura do concreto	t	622,41	947,90	1257,89	1577,70	1919,51
	Bombeamento	Diesel para bombeamento	kWh	3834,00	5839,00	7748,50	9718,50	11824,00
Compactação	Eletricidade para compactação do concreto	kWh	23004,00	35034,00	46491,00	58311,00	70944,00	
Fase de Final de Vida Útil	Disposição final das formas	Disposição final das formas	t	39,03	58,74	77,40	96,92	116,68
		Transporte das formas para aterro de materiais inertes	t	39,03	58,74	77,40	96,92	116,68
	Demolição e disposição final	Diesel para demolição da estrutura de concreto armado	kWh	254537,73	387648,87	514419,82	645207,33	784990,63
		Diesel de máquina carregadeira no canteiro	kWh	7892,60	12020,05	15950,91	20006,31	24340,65
		Transporte para aterro	t	1979,34	3017,75	4011,16	5050,90	6159,23
	Disposição final do concreto e aço	t	1979,34	3017,75	4011,16	5050,90	6159,23	

Fonte: Elaborada pelo autor

3.5. Categorias de impacto e indicadores

A análise de impacto ambiental foi baseada no método de pressão orientada CML (baseline), desenvolvido pela Universidade de Leiden em 2001 (J.B. GUINÉE, M. GORRÉE, R. HEIJUNGS, G. HUPPES, R. KLEIJN, A. KONIN, L. VAN OERS, A. WEGENER SLEESWIJK, S. SUH, H.A. UDO DE HAES, H. BRUIJN, R. VAN DUIN, M.A. J. HUIJBREGTS, 2001). Esse método utiliza vários indicadores para avaliar e medir os impactos de um sistema LCA, sendo que nesse trabalho utilizou-se 11 indicadores, sendo eles: potencial de acidificação, mudança climática, potencial de eutrofização, ecotoxicidade aquática de água doce, toxicidade humana, uso de solo, ecotoxicidade aquática de água salgada, oxidação fotoquímica, recursos, depleção da camada de ozônio, ecotoxicidade terrestre. Essas categorias apresentam as seguintes características:

3.5.1. Potencial de Acidificação

Esse indicador é causado principalmente pelo gás dióxido de enxofre (SO_2), causando a chuva ácida. O dióxido de enxofre é um gás ácido eliminado principalmente na queima de combustíveis fósseis. O potencial de acidificação é medido em kg SO_2 . Esse impacto é responsável pela redução do pH, por danos à qualidade dos ecossistemas e diminui a biodiversidade.

3.5.2. Mudança Climática

Mudança climática pode ser definida como uma mudança da temperatura global causada pelo efeito dos gases de efeito estufa criados por humanos. O aumento da temperatura global pode causar distúrbios climáticos, desertificação, aumento do nível médio dos oceanos. Esse indicador é medido em kg CO_2 .

3.5.3. Potencial de Eutrofização

Esse indicador mede o aumento da concentração de nutrientes químicos em um ecossistema. Isso causa crescimento excessivo de algas em rios, o que causa a redução na qualidade de água e de populações animais. É causada

principalmente por emissões de amônia, nitratos, óxidos de nitrogênio e fósforos para o ar ou água. O indicador é medido em kg PO₄.

3.5.4. Ecotoxicidade ambiental

É medida em 3 diferentes categorias, sendo elas:

- a) Ecotoxicidade aquática de água doce**
- b) Ecotoxicidade aquática de água salgada**
- c) Ecotoxicidade terrestre**

Esses indicadores são influenciados principalmente pela emissão de metais pesados. O impacto é avaliado pela máxima concentração desses metais na água dos ecossistemas. É expresso em 1,4 D-B (1,4-dichlorobenzene).

3.5.5. Toxicidade Humana

É um índice que reflete o potencial de dano que uma unidade de químicos lançados no ambiente, principalmente arsênico, dicromato de sódio e fluoreto de hidrogênio. Esses químicos podem ser liberados pela queima de combustíveis fósseis. Esses químicos têm potencial de causar cânceres, sendo perigosos pela inalação, ingestão ou contato com esses produtos. É medido em 1,4-dichlorobenzene.

3.5.6. Uso de solo

É causado pelo uso do solo por agricultura, assentamentos humanos e pela extração de recursos. É medido em m² a (metro quadrado de solo por ano).

3.5.7. Oxidação fotoquímica

É o potencial de criação de ozônio fotoquímico. Ozônio é protetivo na estratosfera, mas próximo ao solo é tóxico aos humanos em grandes concentrações. É medido em kg de ozônio formado. Esse indicador depende das quantidades de monóxido de carbono, de dióxido de enxofre, óxido nítrico e amônia.

3.5.8. Recursos (depleção abiótica de recursos)

É relacionado ao consumo de recursos não biológicos, como combustíveis fósseis, minerais, metais e água. Medido em kg de antimônio.

3.5.9. Depleção da camada de ozônio

É relacionado principalmente aos CFCs, halons e HCFCs, já que esses gases são estáveis o suficiente para chegar à estratosfera. Danos à camada de ozônio reduzem a habilidade da estratosfera em reduzir a entrada dos raios ultravioletas na atmosfera terrestre, aumentando a quantidade de luzes UVB com potencial carcinogênico. O indicador é medido em kg CFC-11.

4. RESULTADOS

4.1. Projeto estrutural

Os resultados do dimensionamento estrutural são apresentados nessa seção.

4.1.1. Modelo 10 pavimentos

Os quantitativos de material e os parâmetros de instabilidade do modelo estão apresentados nas Tabela 13 e Tabela 14, respectivamente.

Tabela 13 - Quantitativos de material – 10 pavimentos

Modelo	10 pav	4131,4 m ²		
Elemento	Concreto (m ³)	Formas (m ²)	Aço (kg)	Aço/m ³
Pilares	141,7	1670,0	8911,4	62,89
Vigas	255,2	3026,0	17626,5	69,07
Lajes	369,9	3698,6	35803,4	96,79
Total	766,8	8394,6	62341,3	81,30

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 14 - Parâmetros de Instabilidade - 10 pavimentos

Modelo 10 pav		Deslocamentos horizontais			
Parâmetros de Instabilidade		Altura da edificação - H (m)	28,3		
		Altura entre pisos - Hi (m)	2,8		
GamaZ	1,08	Deslocamento	Valor máximo	Valor de referência	Situação
FAVt	1,08	Topo da edificação	(H/10963) 0,26	(H/1700) 1,66	Ok
Alfa	0,65	Entre pisos	(Hi/7366) 0,04	(Hi/850) 0,33	Ok

Fonte: Elaborada pelo autor

4.1.2. Modelo 15 pavimentos

Os quantitativos de material e os parâmetros de instabilidade do modelo estão apresentados na Tabela 15 e Tabela 16, respectivamente.

Tabela 15 - Quantitativos de material – 15 pavimentos

Modelo	15 pav	6014,7 m ²		
Elemento	Concreto (m ³)	Formas (m ²)	Aço (kg)	Aço/m ³
Pilares	263,6	2903,2	18748,5	71,12
Vigas	366,3	4348,7	26709,8	72,92
Lajes	537,9	5379,3	52794,6	98,15
Total	1167,8	12631,2	98252,9	84,14

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 16 - Parâmetros de Instabilidade - 15 pavimentos

Modelo 15 pav		Deslocamentos horizontais			
Parâmetros de Instabilidade		Altura da edificação - H (m)	42,5		
		Altura entre pisos - Hi (m)	2,8		
GamaZ	1,05	Deslocamento	Valor máximo	Valor de referência	Situação
FAVt	1,08	Topo da edificação	(H/11165) 0,38	(H/1700) 2,50	Ok
Alfa	0,68	Entre pisos	(Hi/8177) 0,03	(Hi/850) 0,33	Ok

Fonte: Elaborada pelo autor

4.1.3. Modelo 20 pavimentos

Os quantitativos de material e os parâmetros de instabilidade do modelo estão apresentados na Tabela 17 e Tabela 18, respectivamente.

Tabela 17 - Quantitativos de material – 20 pavimentos

Modelo	20 pav	7899,6 m ²		
Elemento	Concreto (m ³)	Formas (m ²)	Aço (kg)	Aço/m ³
Pilares	362,6	3868,0	29026,4	80,05
Vigas	481,1	5715,8	39400,6	81,90
Lajes	706,0	7060,4	68482,0	97,00
Total	1549,7	16644,2	136909,0	88,35

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 18 - Parâmetros de Instabilidade - 20 pavimentos

Modelo 20 pav		Deslocamentos horizontais			
Parâmetros de Instabilidade		Altura da edificação - H (m)	56,6		
		Altura entre pisos - Hi (m)	2,8		
GamaZ	1,07	Deslocamento	Valor máximo	Valor de referência	Situação
FAVt	1,10	Topo da edificação	(H/7439) 0,76	(H/1700) 3,33	Ok
Alfa	0,77	Entre pisos	(Hi/5308) 0,05	(Hi/850) 0,33	Ok

Fonte: Elaborada pelo autor

4.1.4. Modelo 25 pavimentos

Os quantitativos de material e os parâmetros de instabilidade do modelo estão apresentados na Tabela 19 e Tabela 20, respectivamente.

Tabela 19 - Quantitativos de material – 25 pavimentos

Modelo	25 pav	9781,8 m ²		
Elemento	Concreto (m ³)	Formas (m ²)	Aço (kg)	Aço/m ³
Pilares	479,7	5091,5	51666,8	107,71
Vigas	590,0	7012,1	55380,9	93,87
Lajes	874,0	8740,3	84598,9	96,80
Total	1943,7	20843,9	191646,6	98,60

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 20 - Parâmetros de Instabilidade - 25 pavimentos

Modelo 25 pav		Deslocamentos horizontais			
Parâmetros de Instabilidade		Altura da edificação - H (m)	70,8		
		Altura entre pisos - Hi (m)	2,8		
GamaZ	1,1	Deslocamento	Valor máximo	Valor de referência	Situação
FAVt	1,12	Topo da edificação	(H/5198) 1,36	(H/1700) 4,16	Ok
Alfa	0,84	Entre pisos	(Hi/4157) 0,07	(Hi/850) 0,33	Ok

Fonte: Elaborada pelo autor

4.1.5. Modelo 30 pavimentos

Os quantitativos de material e os parâmetros de instabilidade do modelo estão apresentados na Tabela 21 e Tabela 22, respectivamente.

Tabela 21 - Quantitativos de material – 30 pavimentos

Modelo	30 pav	11663,8 m ²		
Elemento	Concreto (m ³)	Formas (m ²)	Aço (kg)	Aço/m ³
Pilares	626,4	6389,3	71260,2	113,76
Vigas	697,2	8292,1	75145,5	107,78
Lajes	1041,2	10412,0	100821,8	96,83
Total	2364,8	25093,4	247227,5	104,54

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 22 - Parâmetros de Instabilidade - 30 pavimentos

Modelo 30 pav		Deslocamentos horizontais			
Parâmetros de Instabilidade		Altura da edificação - H (m)	84,9		
		Altura entre pisos - Hi (m)	2,8		
GamaZ	1,11	Deslocamento	Valor máximo	Valor de referência	Situação
FAVt	1,14	Topo da edificação	(H/3806) 2,23	(H/1700) 4,99	Ok
Alfa	0,9	Entre pisos	(Hi/3175) 0,09	(Hi/850) 0,33	Ok

Fonte: Elaborada pelo autor

4.1.6. Comparação dos parâmetros

Calculou-se 3 parâmetros (consumo médio de material por pavimento, consumo de aço por elemento e consumo médio por m²). As Figura 13 (dados relativos a cada material), Figura 14 (dados relativos a cada elemento) e Figura 15 (os dados relativos a cada material) mostram os valores desses parâmetros.

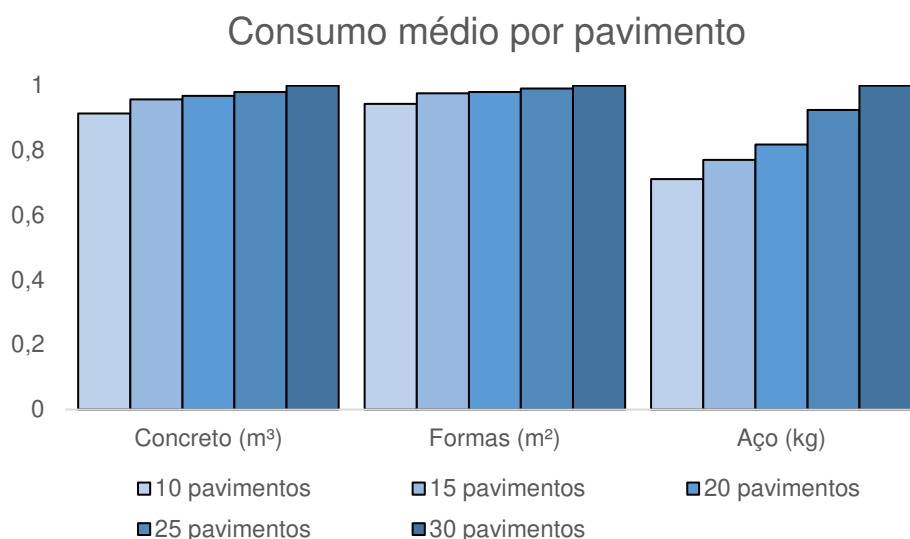


Figura 13 - Consumo médio por pavimento

Fonte: Elaborada pelo autor

Da análise desses parâmetros, percebe-se que os modelos mais altos apresentam maior consumo em vigas e pilares, de acordo com a Figura 14. Esses elementos são responsáveis pela formação dos pórticos - estruturas responsáveis pela estabilidade horizontal da estrutura, enquanto as lajes apresentam consumos semelhantes – esperado de acordo com o modelo de grelhas utilizado no TQS durante o dimensionamento. Como os esforços horizontais, devidos ao vento, aumentam com a altura da edificação, o mesmo

acontece com as solicitações, requerendo pórticos formados por pilares e vigas de maiores dimensões e maior consumo de aço, logo os parâmetros de dimensionamento estão dentro do esperado de acordo com a natureza dos modelos estudados.

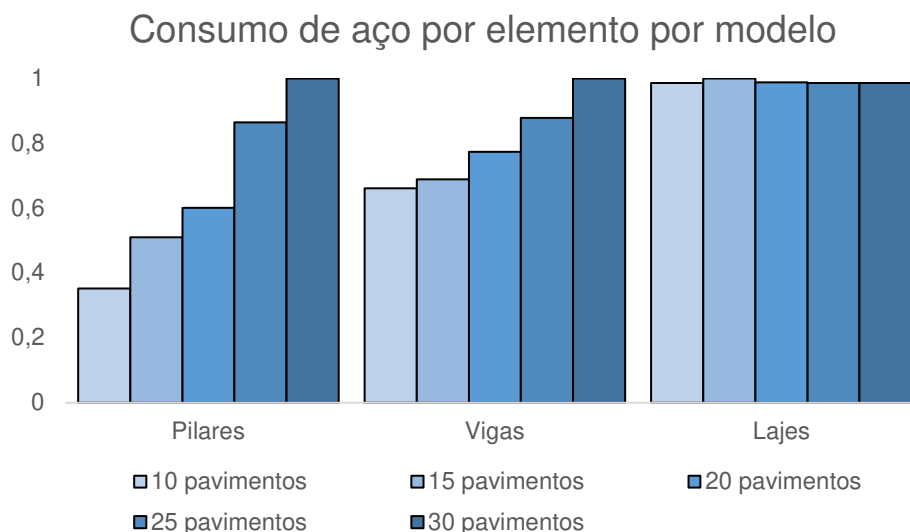


Figura 14 - Consumo de aço por elemento por modelo (kg de aço por elemento por pavimento)

Fonte: Elaborada pelo autor

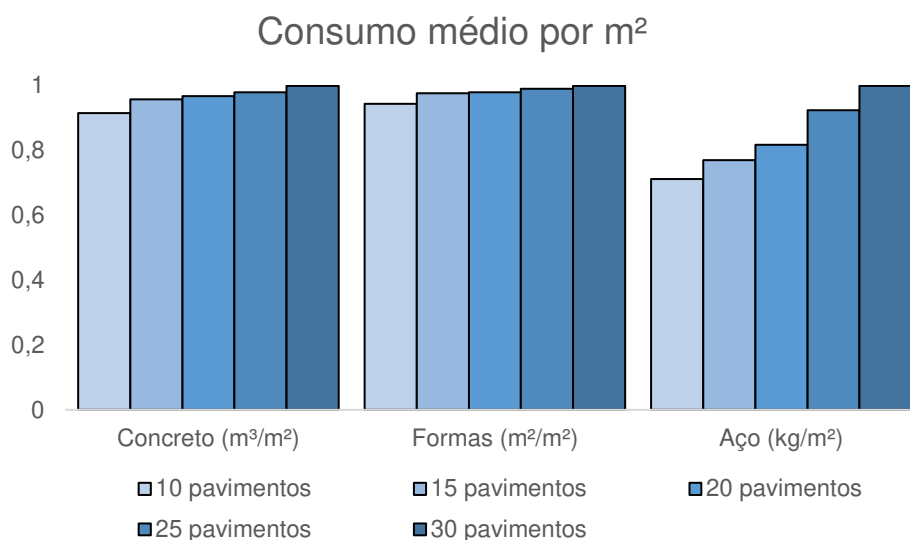


Figura 15 - Consumo médio por m²

Fonte: Elaborada pelo autor

Dá análise da Figura 13 e Figura 15, nota-se que o consumo por pavimento e por m² de aço apresenta os maiores incrementos. Desse modo,

pode-se concluir que o aço é o elemento que apresenta maior aumento no consumo em edificações com maior número de pavimentos.

4.2. Análise de impacto ambiental

Com os quantitativos resultantes do dimensionamento estrutural, faz-se a análise de impacto ambiental de acordo com os procedimentos explicados anteriormente. Os resultados da análise são aqui apresentados.

A Figura 16 apresenta os resultados causados pela fase de produto. Os dados foram normalizados para o modelo de 10 pavimentos. Nesse processo fica evidente que o modelo de 30 pavimentos apresenta maior grau de impacto ambiental, visto que apesar do aumento de 300% de sua área em relação ao modelo de 10 pavimentos, o incremento visto varia desde 332% para o indicador Mudança Climática a 377% para o indicador Toxicidade Humana.

A Figura 17 apresenta os resultados causados pela fase de construção. Nesse caso, percebe-se que o incremento no modelo de 30 pavimentos ficou na mesma magnitude do incremento de área do modelo. Esse resultado mostra que o processo de construção de uma edificação mais alta não apresenta aumento considerável nos impactos por análise LCA.

A Figura 18 apresenta os resultados causados pela fase de final de vida útil. Nota-se aqui a mesma tendência do processo de construção, sem incrementos consideráveis nos modelos mais altos.

A Figura 19 apresenta os resultados unificados dos materiais, da construção e descarte. Nota-se aqui que os materiais têm grande peso no impacto causado por uma edificação, já que as categorias construção e descarte não apresentam aumento de impacto para os modelos mais altos, quando analisadas isoladamente. Somente a categoria de materiais apresenta essa tendência, na análise individual, logo, os resultados mostram que os materiais representam os maiores percentuais de impacto. A Figura 23 apresenta para o modelo de 30 pavimentos, um comparativo das fases de vida, ficando evidente que a fase de produto materiais apresentam a maior parte do impacto.

A Figura 20 apresenta um comparativo dos processos por m². Fica claro que os modelos mais altos apresentam os maiores impactos, devido principalmente ao maior consumo de aço e concreto que as estruturas mais altas necessitam, em decorrência de maiores esforços horizontais que essas estruturas são carregadas.

Pela análise dos quantitativos de material, notou-se que o aço apresenta maior aumento nos modelos mais altos. Logo, foi feita uma análise detalhada da fase de produto da BS 15978, para detalhamento e definição dos impactos causados pelos materiais na fase de produto, principalmente o aço. Os quantitativos da fase de produto são discretizados em 3 categorias de materiais: aço, concreto e formas, de acordo com o inventário da Tabela 23.

Tabela 23 – Inventário Fase de produto

Fluxo de Saída	Fluxo de Entrada	Un.	10 PAV	15 PAV	20 PAV	25 PAV	30 PAV
Concreto	Aditivo	t	2,09	3,18	4,22	5,30	6,44
	Transporte do aditivo da fábrica até a concreteira	t	2,09	3,18	4,22	5,30	6,44
	Água	t	130,36	198,53	263,45	330,43	402,01
	Cimento	t	310,37	472,68	627,26	786,73	957,18
	Transporte do cimento da fábrica até a concreteira	t	310,37	472,68	627,26	786,73	957,18
	Agregados grosseiros	t	914,64	1392,95	1848,48	2318,45	2820,73
	Transp. de agregados grosseiros da fábrica até a conc.	t	914,64	1392,95	1848,48	2318,45	2820,73
	Areia	t	546,54	832,36	1104,56	1385,39	1685,53
	Transporte da areia até a concreteira	t	546,54	832,36	1104,56	1385,39	1685,53
	Energia para preparo do concreto	kWh	2453,76	3736,96	4959,04	6219,84	7567,36
Aço	Aço	t	62,34	98,25	136,91	191,65	247,23
Madeira das formas	Madeira das formas	m ³	62,96	94,73	124,83	156,33	188,20

Fonte: Elaborada pelo autor

As Figura 21 e Figura 22 apresentam os resultados da análise por meio dos onze indicadores. Os valores dos indicadores foram divididos pela área do seu respectivo modelo. As legendas são relativas ao material e ao modelo (por exemplo, 10A apresenta os dados relativos ao aço para o modelo de 10 pavimentos).

Nota-se que na maior parte dos indicadores, o aço apresenta maior percentual do impacto. Os indicadores de Toxicidade Humana, Exotoxicidade aquática de água doce e salgada e terrestre, Oxidação fotoquímica e depleção da camada de ozônio são altamente influenciados pelo aço, indicando que o aço realmente é responsável pelo maior impacto das edificações com maior número de pavimentos.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a relação dos indicadores entre os cinco modelos. Nota-se que, para os 5 modelos, têm-se uma proporção na relação de todos os indicadores. O modelo de 30 pavimentos é o valor máximo absoluto, valendo 1, e as demais estruturas são relativas a esse valor. As frações médias (valores obtidos da média de todos os indicadores) de cada fase da BS 15978 (fase de produto, de construção e de final de vida útil), apresentam-se na Tabela 24.

Tabela 24 - Proporção média das fases da BS nos indicadores

Fase de produto (Mat)	Fase de construção (Cons)	Fase de final de vida útil (Desc)
80,76%	2,81%	16,42%

Fonte: Elaborada pelo autor

Materiais - Impactos relativos ao modelo de 10 pavimentos

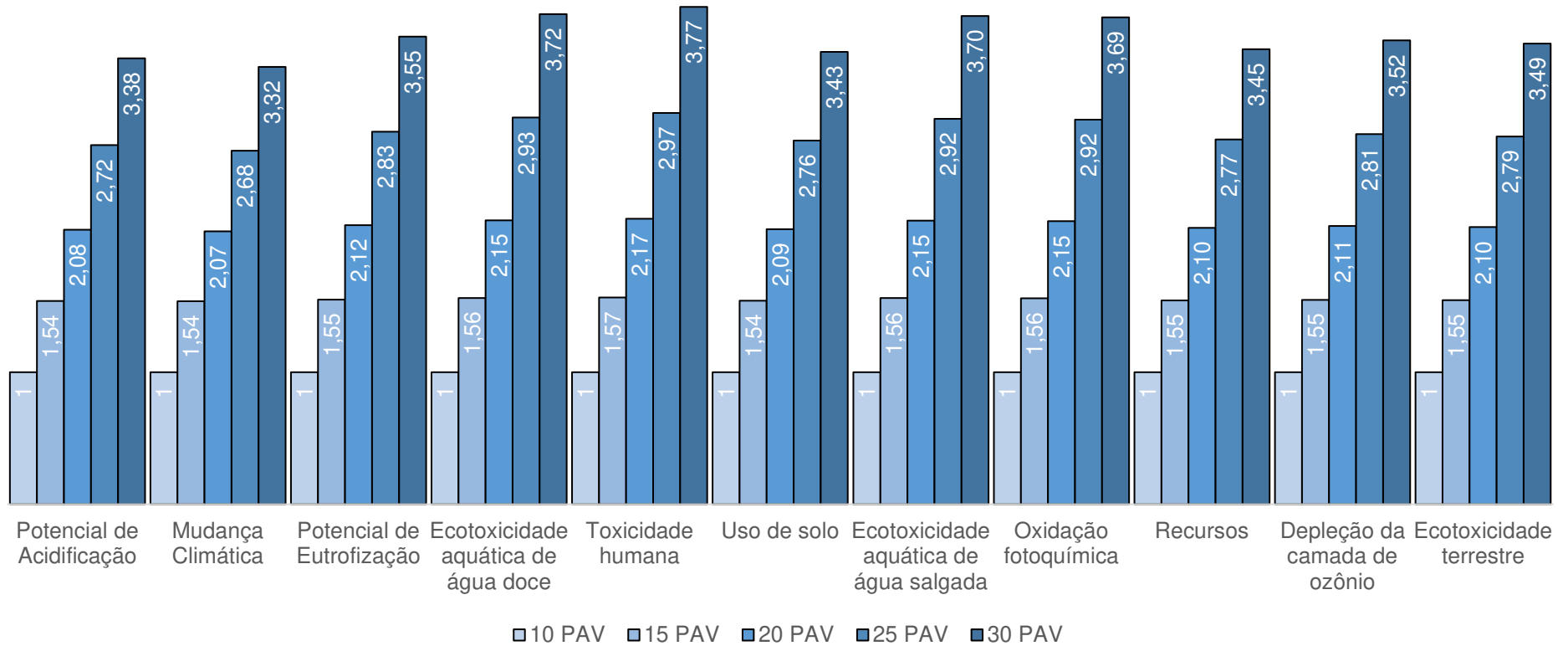


Figura 16 - Impactos gerados por materiais

Fonte: Elaborada pelo autor

Construção - Impactos relativos ao modelo de 10 pavimentos

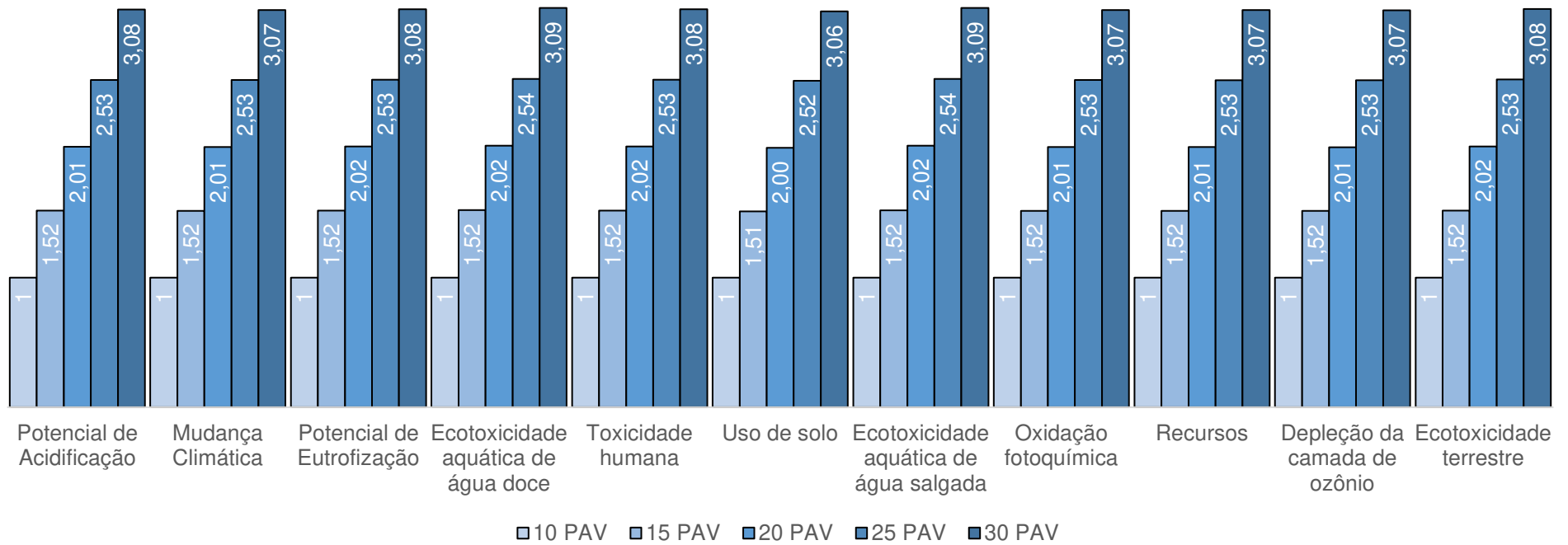


Figura 17 - Impactos gerados pela construção

Fonte: Elaborada pelo autor

Descarte - Impactos relativos ao modelo de 10 pavimentos

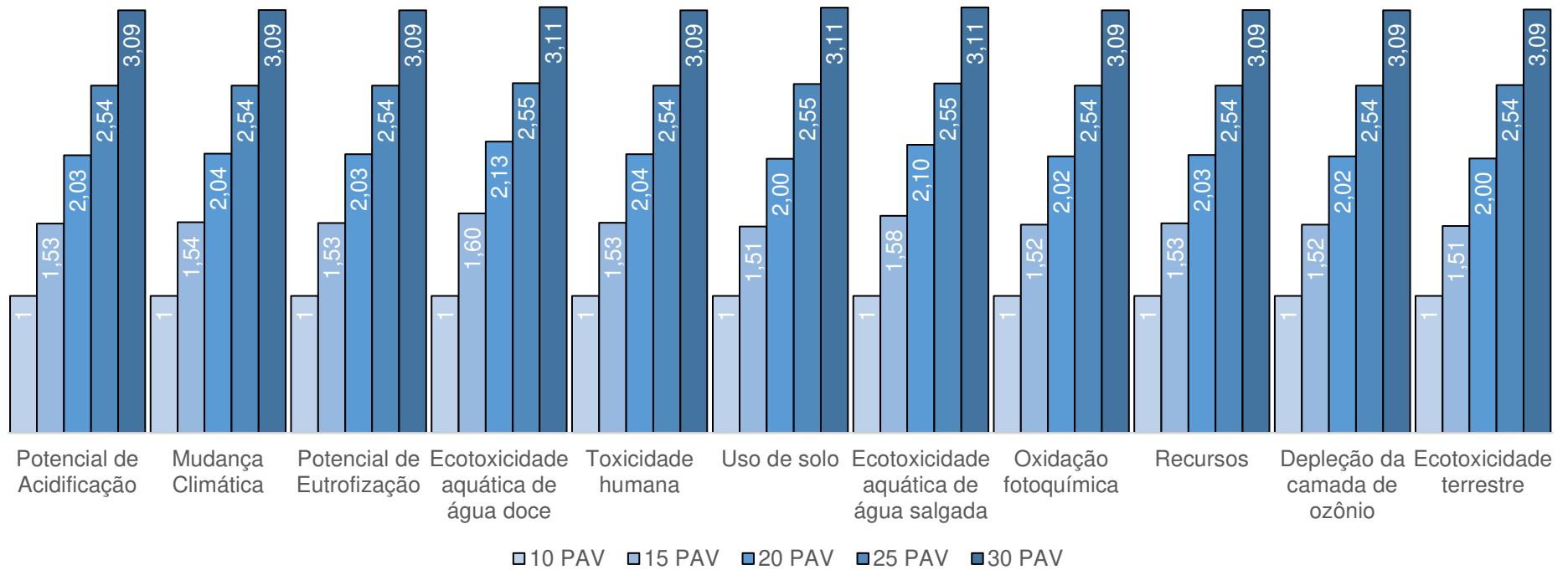


Figura 18 - Impactos gerados pelo descarte

Fonte: Elaborada pelo autor

Impactos relativos ao modelo de 10 pavimentos

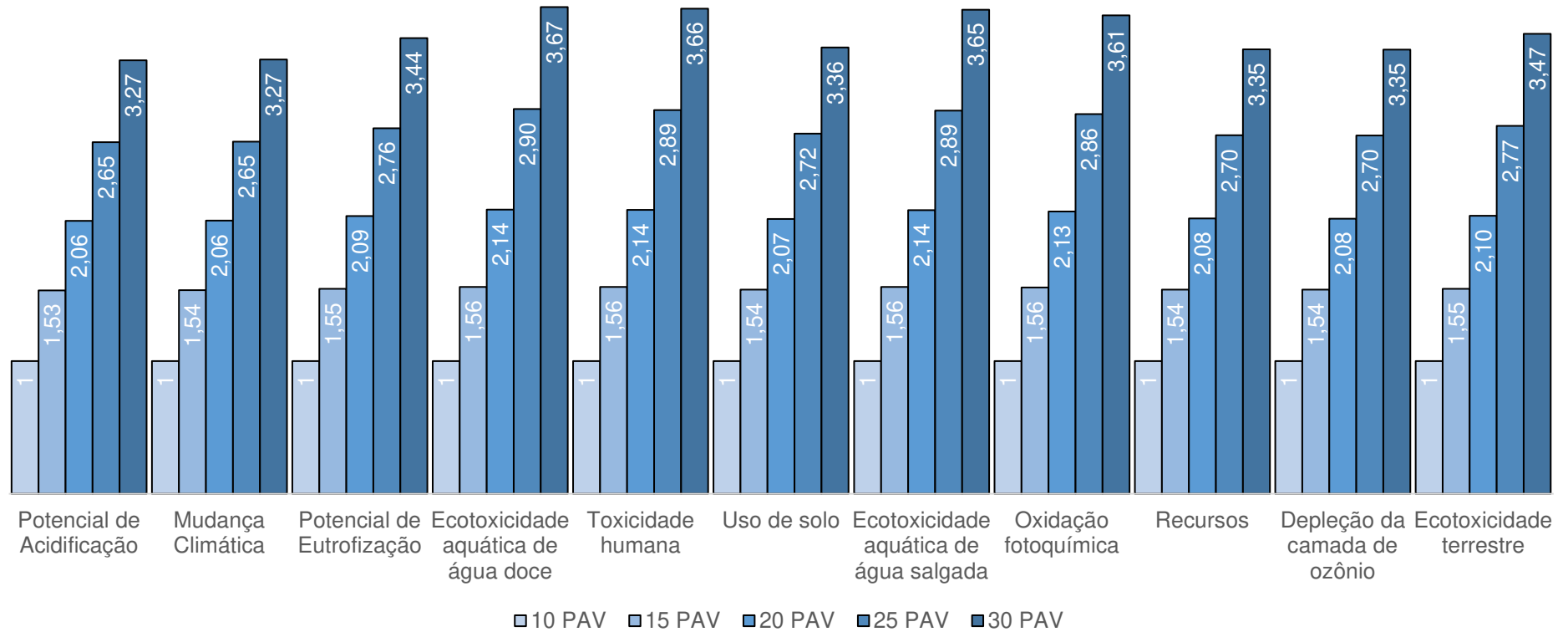


Figura 19 - Impactos gerais, comparativo

Fonte: Elaborada pelo autor

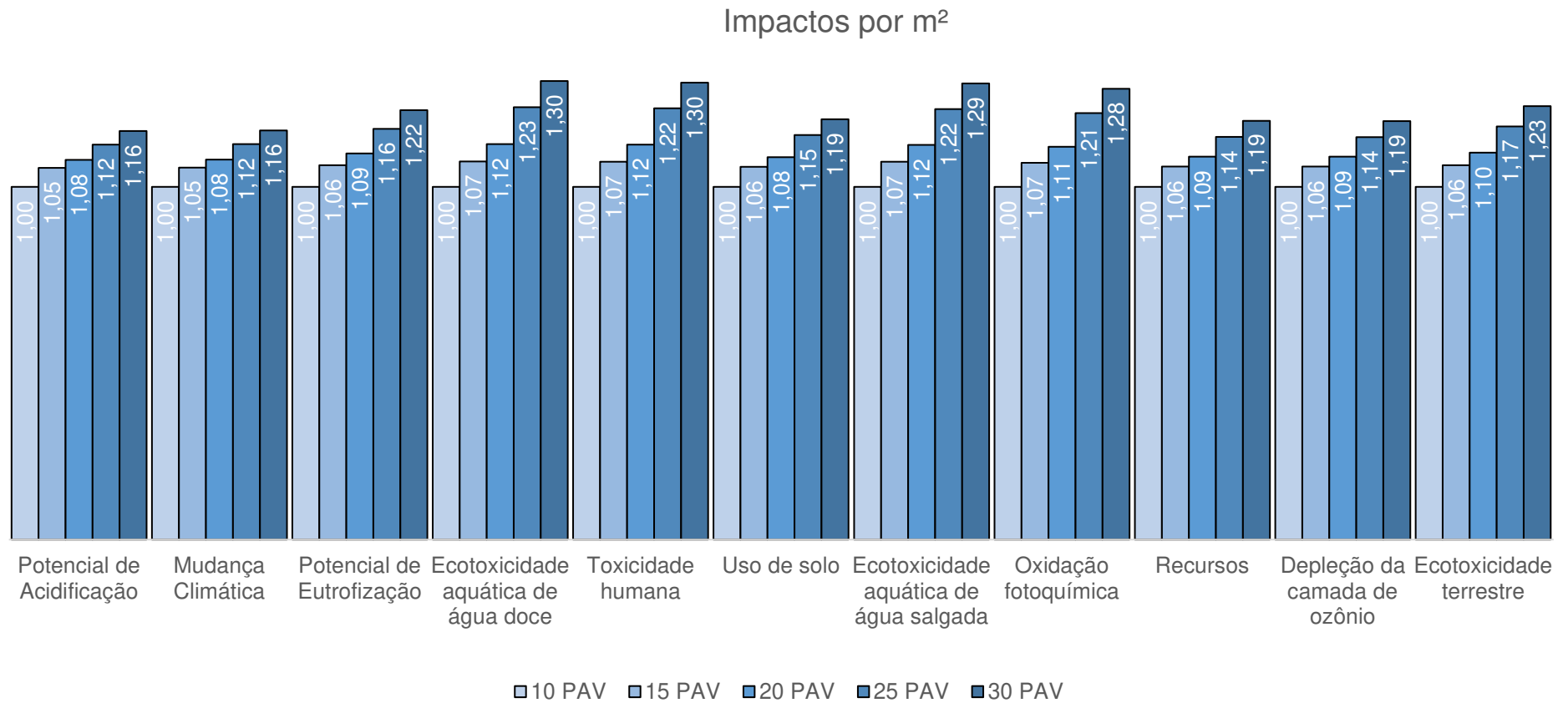


Figura 20 - Impactos por m² Fonte:

Elaborada pelo autor

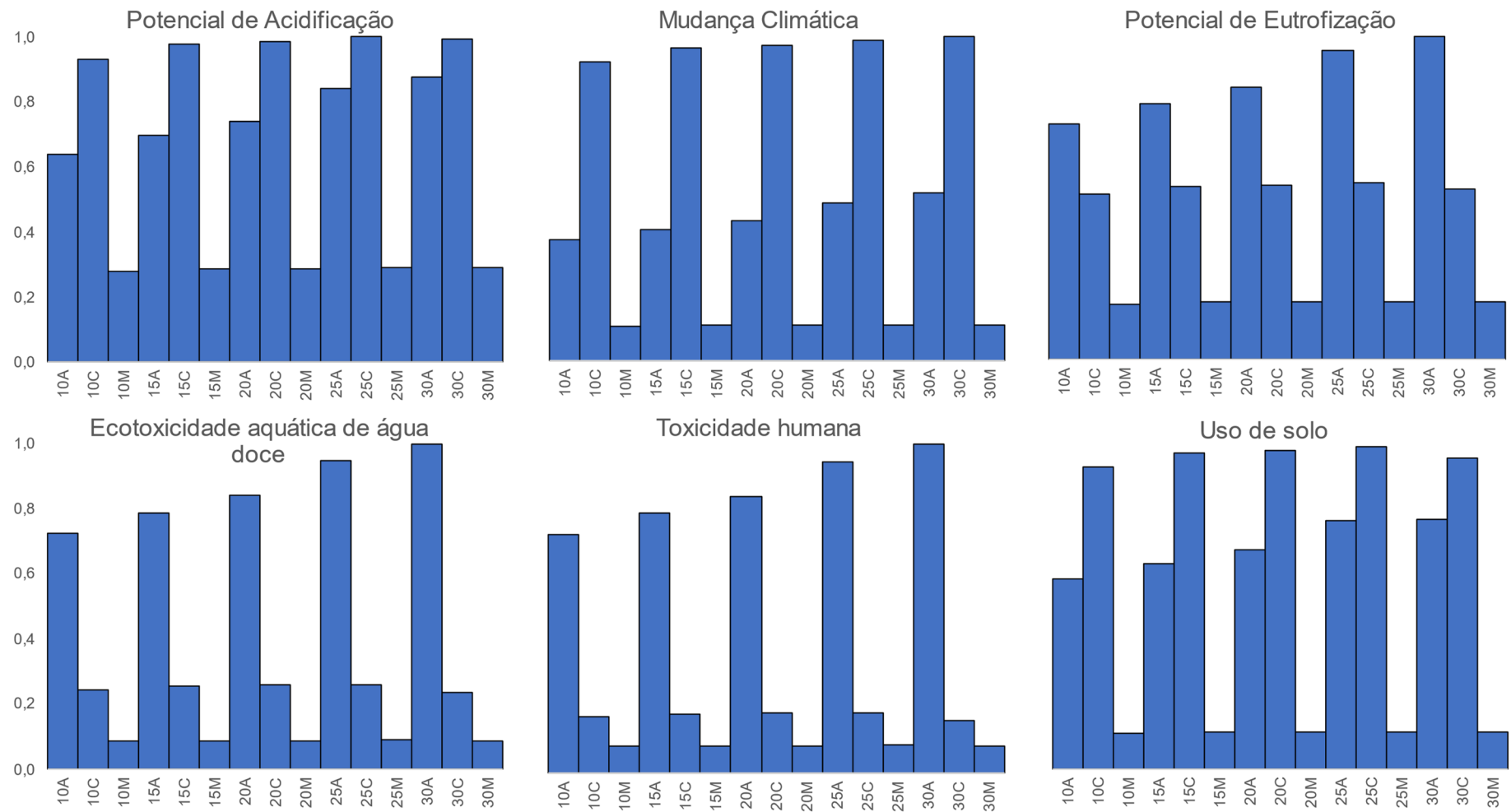


Figura 21 - Comparativo do impacto por material

Elaborada pelo autor

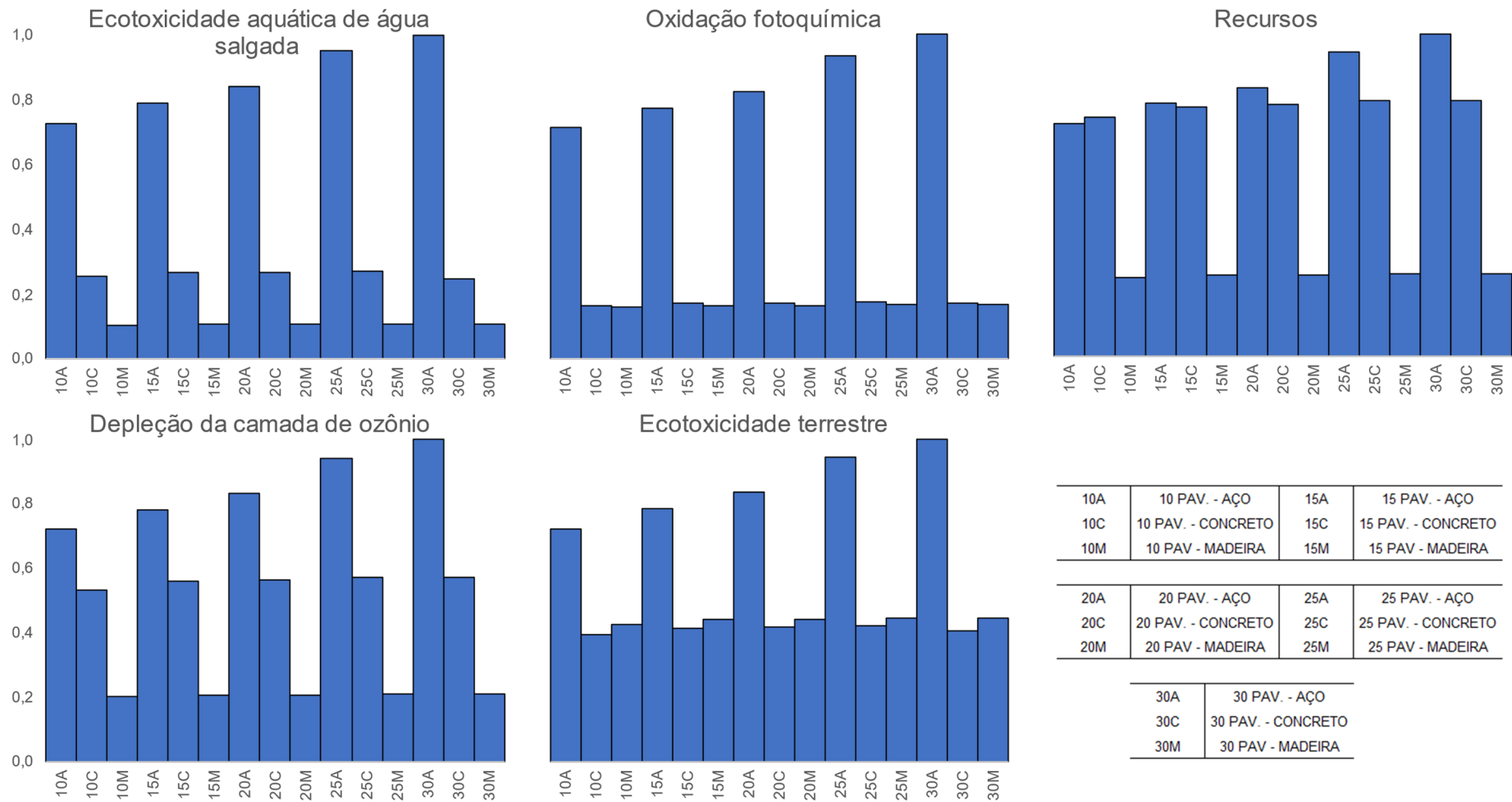


Figura 22 - Comparativo do impacto por material

Elaborada pelo autor

Modelo 30 Pavimentos - Contribuição dos estágios do LCA nos indicadores

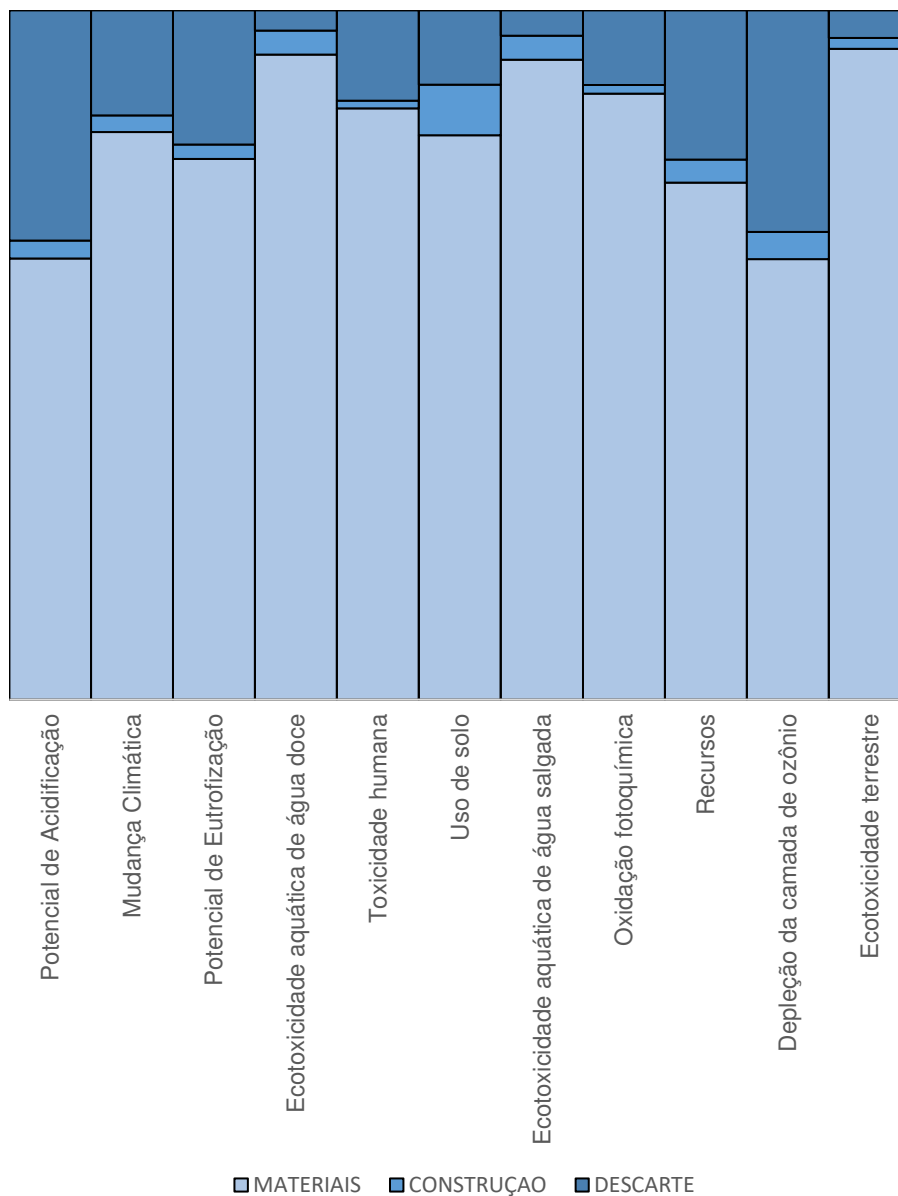


Figura 23 - Comparativo das categorias - modelo 30 pav

Fonte: Elaborada pelo autor

Relação dos indicadores entre os modelos

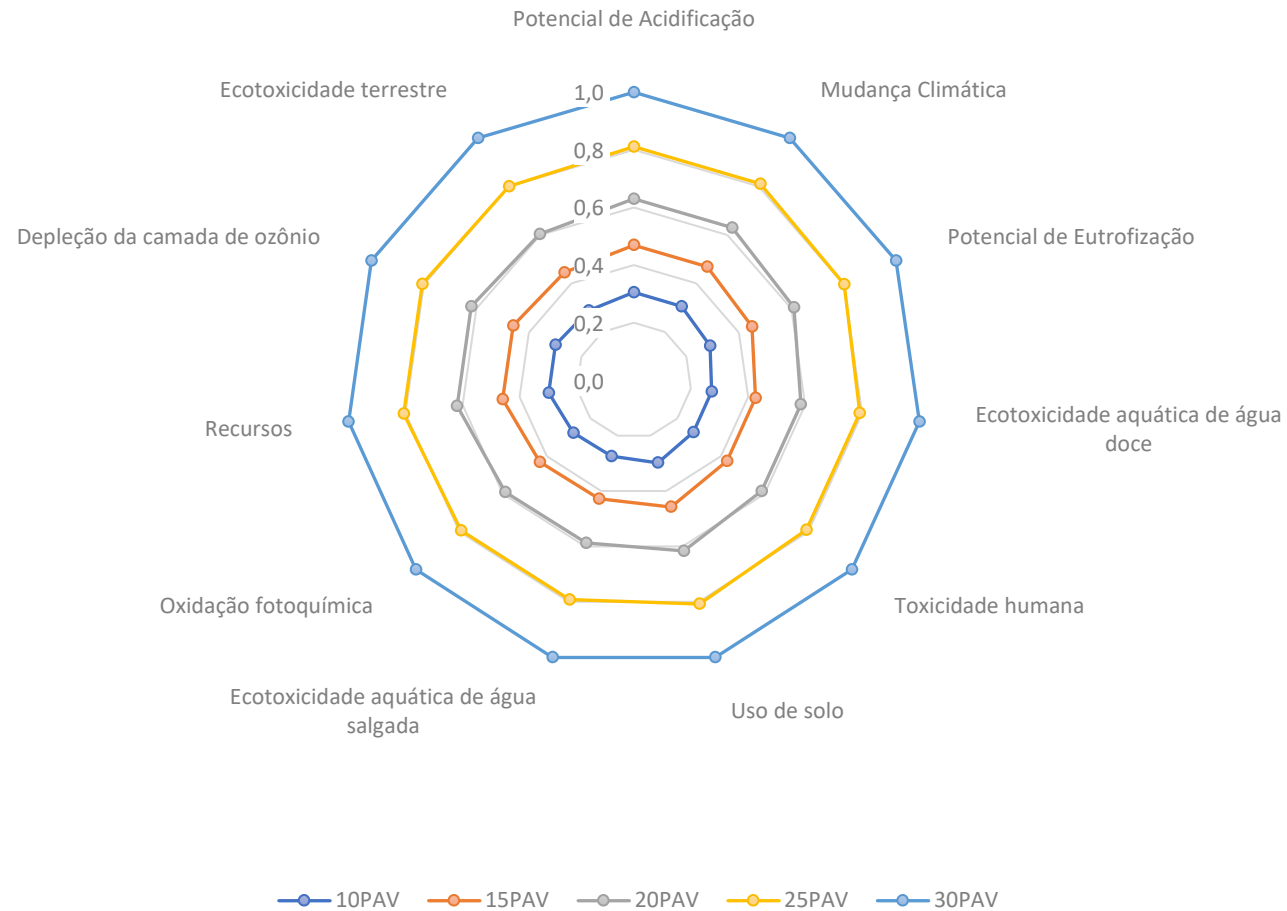


Figura 24 - Relação dos indicadores entre os modelos

Fonte: Elaborada pelo autor

5. CONCLUSÕES

Com base nos dados obtidos pela análise de impacto ambiental, pode-se afirmar que, para as condições estudadas neste trabalho, o modelo de 10 pavimentos apresenta menor grau de impacto ambiental por análise LCA, enquanto o modelo de 30 pavimentos apresenta o pior desempenho na análise.

Observa-se que a fase de produto apresenta maior grau de impacto e torna as estruturas mais altas as geradoras de maior impacto, principalmente devido ao maior consumo de aço e concreto que essas estruturas demandam, visto a necessidade de pórticos mais robustos frente aos maiores esforços de vento.

Em todos os indicadores, a estrutura de 30 pavimentos apresentou o maior grau de impacto por m² construído. O material aço também se mostrou responsável pelo maior impacto nos modelos com mais pavimentos, visto que seu consumo por m² aumenta consideravelmente nas estruturas mais altas. Pelo estudo também se conclui que o aço apresenta grande impacto na maioria dos indicadores. No escopo deste trabalho, considerando somente a estrutura da edificação nota-se que as edificações de menor porte apresentam melhor desempenho pelas análises LCA, principalmente pelas menores taxas de consumo de aço.

Esse trabalho visa mostrar a importância da análise LCA nos projetos, tornando esta uma ferramenta importante no processo de tomada de decisão dos projetistas estruturais e seus contratantes, tendo em vista o uso eficiente dos recursos disponíveis. Entretanto, em um projeto outros fatores também devem ser levados em consideração, como ocupação de solo, alocação de populações, questões de zoneamento e de transporte urbano, uso de energia ao longo da vida útil, fatores que, talvez, possam tornar as estruturas mais altas mais eficientes, valendo, outrora, como tema para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: **Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: **Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: **Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: **Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2014.

UNEP-SBCI, **Buildings and Climate Change: Status, Challenge and Opportunities**, UNEP Publication, Paris, France, 2007

YUJIE CANGB, LIU YANGA, B, ZHIXING LUOA, B, NAN ZHANGB. **Prediction of embodied carbon emissions from residential buildings with different structural forms**

ACI 211.1, **Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete**, ACI, Farmington Hills, EUA, 1991.

ROHDEN A. B.; GARCEZ M.R. **Increasing the sustainability potential of a reinforced concrete building through design strategies: Case study**

ISO, **International Standardization Organization, 2006. Environmental Management e Life Cycle Assessment - Principles and Framework**, ISO 14040, Geneve, Switzerland, p. 20.

ISO, **International Standardization Organization, 2006. Environmental Management e Life Cycle Assessment, Requirements and Guidelines**, ISO 14044, Geneve, Switzerland, p. 46.

OpenLCA, OpenLCA Software See, OpenLCA, Berlin, Germany, 2019.

M.A. Curran Life-Cycle Assessment Encyclopedia of Ecology, Volume 4, 2016, Pages 359-366

GARCEZ M.R.; ROHDEN A. B.; GODOY L. G. G. D. **The role of concrete compressive strength on the service life and life cycle of a RC structure: Case study**

BSI, British Standards Institution, BS 15978:2011 **Sustainability of Construction Works. Assessment of Environmental Performance of Buildings. Calculation Method**, BSI, British Standards Institution, London, UK, 2011.

<https://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/cut-off-system-model/allocation-cut-off-by-classification.html>

SCLCI, Ecoinvent Database v.3.5. See, SCLCI, Zurich, Switzerland, 2019.

J.B. GUINÉE, M. GORRÉE, R. HEIJUNGS, G. HUPPES, R. KLEIJN, A. KONIN, L. VAN OERS, A. WEGENER SLEESWIJK, S. SUH, H.A. UDO DE HAES, H. BRUIJN, R. VAN DUIN, M.A. J. HUIJBREGTS, **Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards**, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 2002.

R. FRISCHKNECHT, F. WYSS, S.B. KNÖPFEL, T. LÜTZKENDORF, M. BALOUKTSI, **Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach**, Int. J. Life Cycle Assess. 20 (7) (2015) 957–969.

DREW C. NOVA K.F. FANNING K. **The Environmental Impact of Tall vs Small: A Comparative Study**, International Journal of High-Rise Buildings Volume 4 Number 2, 2015

Muthu,S.S., **Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain**, Woodhead Publishing (Second Edition), 2020

CASSINELLI, A. L., RAMOS, F. G., MOHAMAD, G., GARCEZ, M. R., **Influência do sistema estrutural no grau de impacto ambiental de edifícios em alvenaria estrutural**, XXVI Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, 2020

APÊNDICES

Consumo médio por pavimento

Elemento	Concreto (m ³)	Formas (m ²)	Aço (kg)
10 pav	69,7	763,1	5667,4
15 pav	73,0	789,5	6140,8
20 pav	73,8	792,6	6519,5
25 pav	74,8	801,7	7371,0
30 pav	76,3	809,5	7975,1

Dados Figura 13 - Consumo médio por pavimento

Consumo médio de aço por elemento por modelo (kg de aço por elemento por pavimento)

Elemento	Pilares	Vigas	Lajes
10 pav	810,1	1602,4	3254,9
15 pav	1171,8	1669,4	3299,7
20 pav	1382,2	1876,2	3261,0
25 pav	1987,2	2130,0	3253,8
30 pav	2298,7	2424,0	3252,3

Dados Figura 14 - Consumo de aço por elemento por modelo (kg de aço por elemento por pavimento)

Consumo médio por m²

Elemento	Concreto (m ³ /m ²)	Formas (m ² /m ²)	Aço (kg/m ²)
10 pav	0,186	2,032	15,090
15 pav	0,194	2,100	16,335
20 pav	0,196	2,107	17,331
25 pav	0,199	2,131	19,592
30 pav	0,203	2,151	21,196

Dados Figura 15 - Consumo médio por m²

INDICADOR	10 Pav Materiais	15 Pav Materiais	20 Pav Materiais	25 Pav Materiais	30 Pav Materiais	Unidade
POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO	1,51E+08	2,33E+08	3,15E+08	4,12E+08	5,12E+08	kg SO2-Eq
MUDANÇA CLIMÁTICA	4,81E+10	7,40E+10	9,96E+10	1,29E+11	1,60E+11	kg CO2-Eq
POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO	5,50E+07	8,54E+07	1,16E+08	1,56E+08	1,95E+08	kg PO4-Eq
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA DOCE	1,34E+10	2,10E+10	2,89E+10	3,93E+10	4,99E+10	kg 1,4-DCB-Eq
TOXICIDADE HUMANA	3,06E+10	4,80E+10	6,63E+10	9,08E+10	1,16E+11	kg 1,4-DCB-Eq
USO DE SOLO	3,46E+08	5,34E+08	7,22E+08	9,55E+08	1,19E+09	m2a
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA SALGADA	4,89E+10	7,64E+10	1,05E+11	1,43E+11	1,81E+11	kg 1,4-DCB-Eq
OXIDAÇÃO FOTOQUÍMICA	1,22E+07	1,90E+07	2,61E+07	3,55E+07	4,49E+07	kg formed ozone
RECURSOS	2,06E+08	3,18E+08	4,32E+08	5,70E+08	7,11E+08	kg antimony-Eq
DEPLEÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO	2,68E+03	4,15E+03	5,65E+03	7,52E+03	9,43E+03	kg CFC-11-Eq
ECOTOXICIDADE TERRESTRE	2,05E+07	3,17E+07	4,31E+07	5,72E+07	7,16E+07	kg 1,4-DCB-Eq

Dados Figura 16 - Impactos gerados por materiais

INDICADOR	10 Pav Construção	15 Pav Construção	20 Pav Construção	25 Pav Construção	30 Pav Construção	Unidade
POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO	6,78E+06	1,03E+07	1,37E+07	1,72E+07	2,08E+07	kg SO2-Eq
MUDANÇA CLIMÁTICA	1,52E+09	2,31E+09	3,06E+09	3,85E+09	4,68E+09	kg CO2-Eq
POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO	1,67E+06	2,55E+06	3,38E+06	4,24E+06	5,16E+06	kg PO4-Eq
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA DOCE	6,02E+08	9,16E+08	1,22E+09	1,53E+09	1,86E+09	kg 1,4-DCB-Eq
TOXICIDADE HUMANA	4,83E+08	7,34E+08	9,74E+08	1,22E+09	1,49E+09	kg 1,4-DCB-Eq
USO DE SOLO	3,47E+07	5,26E+07	6,96E+07	8,76E+07	1,06E+08	m2a
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA SALGADA	2,20E+09	3,35E+09	4,46E+09	5,59E+09	6,80E+09	kg 1,4-DCB-Eq
OXIDAÇÃO FOTOQUÍMICA	2,03E+05	3,08E+05	4,08E+05	5,13E+05	6,23E+05	kg formed ozone
RECURSOS	1,04E+07	1,57E+07	2,08E+07	2,62E+07	3,18E+07	kg antimony-Eq
DEPLEÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO	1,90E+02	2,88E+02	3,81E+02	4,79E+02	5,82E+02	kg CFC-11-Eq
ECOTOXICIDADE TERRESTRE	3,92E+05	5,95E+05	7,90E+05	9,92E+05	1,21E+06	kg 1,4-DCB-Eq

Dados Figura 17 - Impactos gerados pela construção

INDICATOR	10 Pav Descarte	15 Pav Descarte	20 Pav Descarte	25 Pav Descarte	30 Pav Descarte	Unidade
POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO	8,67E+07	1,32E+08	1,76E+08	2,20E+08	2,68E+08	kg SO2-Eq
MUDANÇA CLIMÁTICA	9,59E+09	1,47E+10	1,96E+10	2,43E+10	2,96E+10	kg CO2-Eq
POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO	1,57E+07	2,41E+07	3,20E+07	3,99E+07	4,85E+07	kg PO4-Eq
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA DOCE	5,08E+08	8,14E+08	1,08E+09	1,30E+09	1,58E+09	kg 1,4-DCB-Eq
TOXICIDADE HUMANA	5,74E+09	8,80E+09	1,17E+10	1,45E+10	1,77E+10	kg 1,4-DCB-Eq
USO DE SOLO	5,06E+07	7,61E+07	1,01E+08	1,29E+08	1,57E+08	m2a
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA SALGADA	2,31E+09	3,66E+09	4,85E+09	5,89E+09	7,17E+09	kg 1,4-DCB-Eq
OXIDAÇÃO FOTOQUÍMICA	1,80E+06	2,73E+06	3,63E+06	4,56E+06	5,55E+06	kg formed ozone
RECURSOS	6,66E+07	1,02E+08	1,35E+08	1,69E+08	2,06E+08	kg antimony-Eq
DEPLEÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO	1,54E+03	2,34E+03	3,10E+03	3,90E+03	4,75E+03	kg CFC-11-Eq
ECOTOXICIDADE TERRESTRE	9,88E+05	1,49E+06	1,98E+06	2,51E+06	3,06E+06	kg 1,4-DCB-Eq

Dados Figura 18 - Impactos gerados pelo descarte

INDICATOR	10 Pav	15 Pav	20 Pav	25 Pav	30 Pav	Unidade
POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO	2,45E+08	3,76E+08	5,05E+08	6,50E+08	8,01E+08	kg SO2-Eq
MUDANÇA CLIMÁTICA	5,93E+10	9,11E+10	1,22E+11	1,57E+11	1,94E+11	kg CO2-Eq
POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO	7,25E+07	1,12E+08	1,52E+08	2,00E+08	2,49E+08	kg PO4-Eq
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA DOCE	1,46E+10	2,27E+10	3,12E+10	4,22E+10	5,34E+10	kg 1,4-DCB-Eq
TOXICIDADE HUMANA	3,69E+10	5,75E+10	7,89E+10	1,07E+11	1,35E+11	kg 1,4-DCB-Eq
USO DE SOLO	4,31E+08	6,63E+08	8,93E+08	1,17E+09	1,45E+09	m2a
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA SALGADA	5,35E+10	8,34E+10	1,14E+11	1,55E+11	1,95E+11	kg 1,4-DCB-Eq
OXIDAÇÃO FOTOQUÍMICA	1,42E+07	2,20E+07	3,01E+07	4,05E+07	5,11E+07	kg formed ozone
RECURSOS	2,83E+08	4,36E+08	5,88E+08	7,65E+08	9,49E+08	kg antimony-Eq
DEPLEÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO	4,40E+03	6,78E+03	9,14E+03	1,19E+04	1,47E+04	kg CFC-11-Eq
ECOTOXICIDADE TERRESTRE	2,19E+07	3,38E+07	4,58E+07	6,06E+07	7,58E+07	kg 1,4-DCB-Eq

Dados Figura 19 - Impactos gerais, comparativo

INDICATOR	10 Pav – m²	15 Pav – m²	20 Pav – m²	25 Pav – m²	30 Pav – m²	Unidade
POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO	5,93E+04	6,25E+04	6,39E+04	6,64E+04	6,87E+04	kg SO2-Eq
MUDANÇA CLIMÁTICA	1,44E+07	1,51E+07	1,55E+07	1,61E+07	1,67E+07	kg CO2-Eq
POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO	1,76E+04	1,86E+04	1,92E+04	2,04E+04	2,14E+04	kg PO4-Eq
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA DOCE	3,52E+06	3,78E+06	3,95E+06	4,32E+06	4,58E+06	kg 1,4-DCB-Eq
TOXICIDADE HUMANA	8,92E+06	9,56E+06	9,99E+06	1,09E+07	1,16E+07	kg 1,4-DCB-Eq
USO DE SOLO	1,04E+05	1,10E+05	1,13E+05	1,20E+05	1,24E+05	m2a
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA SALGADA	1,29E+07	1,39E+07	1,45E+07	1,58E+07	1,67E+07	kg 1,4-DCB-Eq
OXIDAÇÃO FOTOQUÍMICA	3,43E+03	3,66E+03	3,81E+03	4,14E+03	4,38E+03	kg formed ozone
RECURSOS	6,85E+04	7,25E+04	7,44E+04	7,83E+04	8,14E+04	kg antimony-Eq
DEPLEÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO	1,07E+00	1,13E+00	1,16E+00	1,22E+00	1,26E+00	kg CFC-11-Eq
ECOTOXICIDADE TERRESTRE	5,29E+03	5,62E+03	5,80E+03	6,20E+03	6,50E+03	kg 1,4-DCB-Eq

Dados Figura 20 - Impactos por m² Fonte:

INDICATOR	10 AÇO	10 CONCRETO	10 MADEIRA	Unidade
POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO	5,39E+07	7,84E+07	2,34E+07	kg SO2-Eq
MUDANÇA CLIMÁTICA	1,30E+10	3,20E+10	3,67E+09	kg CO2-Eq
POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO	2,96E+07	2,07E+07	7,03E+06	kg PO4-Eq
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA DOCE	9,69E+09	3,23E+09	1,14E+09	kg 1,4-DCB-Eq
TOXICIDADE HUMANA	2,40E+10	5,61E+09	2,60E+09	kg 1,4-DCB-Eq
USO DE SOLO	1,34E+08	2,13E+08	2,46E+07	m2a
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA SALGADA	3,44E+10	1,20E+10	4,80E+09	kg 1,4-DCB-Eq
OXIDAÇÃO FOTOQUÍMICA	8,48E+06	1,94E+06	1,89E+06	kg formed ozone
RECURSOS	8,88E+07	9,10E+07	3,00E+07	kg antimony-Eq
DEPLEÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO	1,35E+03	1,00E+03	3,73E+02	kg CFC-11-Eq
ECOTOXICIDADE TERRESTRE	9,88E+06	5,38E+06	5,81E+06	kg 1,4-DCB-Eq

Dados Figura 21 e Figura 22

INDICADOR	15 AÇO	15 CONCRETO	15 MADEIRA	Unidade
POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO	8,53E+07	1,19E+08	3,53E+07	kg SO2-Eq
MUDANÇA CLIMÁTICA	2,05E+10	4,88E+10	5,54E+09	kg CO2-Eq
POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO	4,68E+07	3,16E+07	1,06E+07	kg PO4-Eq
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA DOCE	1,53E+10	4,93E+09	1,72E+09	kg 1,4-DCB-Eq
TOXICIDADE HUMANA	3,79E+10	8,56E+09	3,92E+09	kg 1,4-DCB-Eq
USO DE SOLO	2,11E+08	3,25E+08	3,71E+07	m2a
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA SALGADA	5,44E+10	1,83E+10	7,24E+09	kg 1,4-DCB-Eq
OXIDAÇÃO FOTOQUÍMICA	1,34E+07	2,96E+06	2,85E+06	kg formed ozone
RECURSOS	1,40E+08	1,39E+08	4,52E+07	kg antimony-Eq
DEPLEÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO	2,13E+03	1,52E+03	5,62E+02	kg CFC-11-Eq
ECOTOXICIDADE TERRESTRE	1,56E+07	8,20E+06	8,77E+06	kg 1,4-DCB-Eq

Dados Figura 21 e Figura 22

INDICADOR	20 AÇO	20 CONCRETO	20 MADEIRA	Unidade
POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO	1,19E+08	1,58E+08	4,64E+07	kg SO2-Eq
MUDANÇA CLIMÁTICA	2,87E+10	6,48E+10	7,29E+09	kg CO2-Eq
POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO	6,54E+07	4,19E+07	1,39E+07	kg PO4-Eq
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA DOCE	2,14E+10	6,53E+09	2,26E+09	kg 1,4-DCB-Eq
TOXICIDADE HUMANA	5,30E+10	1,13E+10	5,16E+09	kg 1,4-DCB-Eq
USO DE SOLO	2,95E+08	4,31E+08	4,88E+07	m2a
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA SALGADA	7,61E+10	2,43E+10	9,52E+09	kg 1,4-DCB-Eq
OXIDAÇÃO FOTOQUÍMICA	1,87E+07	3,93E+06	3,76E+06	kg formed ozone
RECURSOS	1,96E+08	1,84E+08	5,95E+07	kg antimony-Eq
DEPLEÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO	2,98E+03	2,02E+03	7,39E+02	kg CFC-11-Eq
ECOTOXICIDADE TERRESTRE	2,18E+07	1,09E+07	1,15E+07	kg 1,4-DCB-Eq

Dados Figura 21 e Figura 22

INDICADOR	25 AÇO	25 CONCRETO	25 MADEIRA	Unidade
POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO	1,67E+08	1,99E+08	5,79E+07	kg SO2-Eq
MUDANÇA CLIMÁTICA	4,02E+10	8,13E+10	9,10E+09	kg CO2-Eq
POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO	9,16E+07	5,25E+07	1,74E+07	kg PO4-Eq
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA DOCE	3,00E+10	8,20E+09	2,82E+09	kg 1,4-DCB-Eq
TOXICIDADE HUMANA	7,43E+10	1,42E+10	6,45E+09	kg 1,4-DCB-Eq
USO DE SOLO	4,14E+08	5,41E+08	6,09E+07	m2a
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA SALGADA	1,07E+11	3,05E+10	1,19E+10	kg 1,4-DCB-Eq
OXIDAÇÃO FOTOQUÍMICA	2,63E+07	4,93E+06	4,69E+06	kg formed ozone
RECURSOS	2,75E+08	2,31E+08	7,42E+07	kg antimony-Eq
DEPLEÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO	4,18E+03	2,54E+03	9,23E+02	kg CFC-11-Eq
ECOTOXICIDADE TERRESTRE	3,06E+07	1,36E+07	1,44E+07	kg 1,4-DCB-Eq

Dados Figura 21 e Figura 22

INDICADOR	30 AÇO	30 CONCRETO	30 MADEIRA	Unidade
POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO	2,08E+08	2,35E+08	6,91E+07	kg SO2-Eq
MUDANÇA CLIMÁTICA	5,07E+10	9,80E+10	1,09E+10	kg CO2-Eq
POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO	1,14E+08	6,02E+07	2,07E+07	kg PO4-Eq
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA DOCE	3,77E+10	8,89E+09	3,31E+09	kg 1,4-DCB-Eq
TOXICIDADE HUMANA	9,33E+10	1,46E+10	7,54E+09	kg 1,4-DCB-Eq
USO DE SOLO	4,96E+08	6,20E+08	7,15E+07	m2a
ECOTOXICIDADE AQUÁTICA DE ÁGUA SALGADA	1,34E+11	3,31E+10	1,40E+10	kg 1,4-DCB-Eq
OXIDAÇÃO FOTOQUÍMICA	3,35E+07	5,77E+06	5,61E+06	kg formed ozone
RECURSOS	3,46E+08	2,76E+08	8,88E+07	kg antimony-Eq
DEPLEÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO	5,29E+03	3,03E+03	1,10E+03	kg CFC-11-Eq
ECOTOXICIDADE TERRESTRE	3,86E+07	1,57E+07	1,73E+07	kg 1,4-DCB-Eq

Dados Figura 21 e Figura 22

	10PAV	15PAV	20PAV	25PAV	30PAV
Potencial de Acidificação	30,58%	46,98%	63,02%	81,10%	100,00%
Mudança Climática	30,54%	46,97%	63,01%	81,08%	100,00%
Potencial de Eutrofização	29,09%	45,02%	60,99%	80,20%	100,00%
Ecotoxicidade aquática de água doce	27,23%	42,57%	58,47%	79,07%	100,00%
Toxicidade humana	27,33%	42,68%	58,58%	79,13%	100,00%
Uso de solo	29,72%	45,67%	61,54%	80,70%	100,00%
Ecotoxicidade aquática de água salgada	27,38%	42,77%	58,67%	79,17%	100,00%
Oxidação fotoquímica	27,71%	43,10%	58,99%	79,34%	100,00%
Recursos	29,82%	45,96%	61,97%	80,64%	100,00%
Depleção da camada de ozônio	29,86%	45,94%	61,93%	80,66%	100,00%
Ecotoxicidade terrestre	28,83%	44,54%	60,42%	79,97%	100,00%

Dados Figura 24