

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Tese de Doutorado

SUBSÍDIOS PARA A MINIMIZAÇÃO DO IMPACTO  
AMBIENTAL DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO

Jair Frederico Santoro

Passo Fundo

2021



CIP – Catalogação na Publicação

---

S237s Santoro, Jair Frederico  
Subsídios para a minimização do impacto ambiental  
de estruturas em concreto armado [recurso eletrônico] /  
Jair Frederico Santoro. – 2020.  
16 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Moacir Kripka.  
Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de  
Passo Fundo, 2020.

1. Construção civil. 2. Concreto armado – Aspectos  
ambientais. 3. Dióxido de carbono. 4. Otimização  
estrutural. I. Kripka, Moacir, orientador. II. Título.

CDU: 691.328

---

Catálogo: Bibliotecária Juliana Langaro Silveira - CRB 10/2427

**JAIR FREDERICO SANTORO**

**SUBSÍDIOS PARA A MINIMIZAÇÃO DO IMPACTO  
AMBIENTAL DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO**

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

Data da Aprovação: 07 de abril de 2021

Membros componentes da banca examinadora:

Professor Doutor Moacir Kripka

Universidade de Passo Fundo (UPF)

Orientador

Professor Doutor Élcio Casemiro Alves

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Professor Doutor Gray Farias Moita

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET – MG)

Professor Doutor Zacarias Martin Chamberlain Praiva

Universidade de Passo Fundo (UPF)

Professor Doutor Fernando Busato Ramires

Universidade de Passo Fundo (UPF)

Passo Fundo  
2021

## AGRADECIMENTOS

Foram muitas as pessoas que estiveram e participaram ao meu lado da construção deste estudo, fica aqui o meu agradecimento.

À minha família, esposa Joice e filhas Vitória e Luiza, pela paciência, incentivo e entendimento de minha dedicação, nesses últimos quatro anos, para a realização de mais esta etapa de estudos em minha vida.

Ao professor Dr. Moacir Kripka, pela oportunidade de tê-lo em minha vida acadêmica como orientador de iniciação científica, mestrado e doutorado, sempre disponibilizando o seu conhecimento com dedicação e paciência para que os objetivos traçados sempre fossem alcançados.

Aos professores membros da banca examinadora, Dr. Gray Farias Moita, Dr. Élcio Cassimiro Alves, Dr. Zacarias Martin Chamberlain Praiva e Dr. Fernando Busato Ramires, por aceitarem avaliar e pelas contribuições relevantes dadas nesta tese.

A todos os colegas de estudo que de alguma forma contribuíram com trocas de informações e conhecimentos para a realização deste estudo.

À Universidade de Passo Fundo, à Faculdade de Engenharia e Arquitetura através de seu Programa de Pós-Graduação em Engenharia, e a todos seus professores, pela oportunidade e disponibilização das condições para a realização dos estudos no âmbito da instituição.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-Grandense, pelo incentivo e liberação das minhas atividades acadêmicas para realização deste estudo.

## RESUMO

Estudar os impactos ambientais das diversas atividades econômicas tem se tornado cada dia mais relevante; nesse contexto, pode-se destacar as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) liberadas na atmosfera e que contribuem para o efeito estufa. A saber, dentre as principais atividades econômicas com maior impacto ambiental encontra-se a indústria da construção civil e sua cadeia produtiva – com os processos de extração, produção e transporte dos materiais – tendo o concreto entre os materiais de construção mais empregados no mundo com considerável e importante parcela de contribuição nestas emissões. Para tanto, novos estudos vêm sendo realizados a fim de reduzir a emissão desse gás, concentrando-se nas análises e avaliações da produção dos aglomerantes e suas adições, bem como nos dimensionamentos com definições das resistências características do concreto mais viáveis. Assim sendo, este estudo objetivou a busca de subsídios que possam ser considerados para a obtenção e minimização desse impacto ambiental e, paralelamente, do impacto econômico. Desse modo, quatro cenários de estudo foram propostos, considerando a fase do berço ao portão, sendo três de emissões de CO<sub>2</sub> e um de custos, levando em consideração concretos de diferentes resistências características, aços e formas de madeira. No primeiro cenário, as emissões de CO<sub>2</sub> foram quantificadas a partir do levantamento da contribuição de cada matéria-prima utilizada na região de estudo, desde a sua extração até a sua utilização na obra. Para o segundo e o terceiro cenários, as quantificações das contribuições das matérias-primas em termos de emissões de CO<sub>2</sub> foram geradas a partir da base de dados Ecoinvent 3.5, de 2018, e do software SimaPro, versão 9.0.0.48, diferenciando um cenário do outro por meio de ajustes realizados na base de dados global do software com dados regionais. Nesse sentido, diferenças significativas nos valores de emissões de CO<sub>2</sub> foram verificadas, sempre tendo o aglomerante com grande influência e contribuição. O quarto cenário ateu-se à obtenção dos custos médios dos materiais na região. Portanto, avaliações a partir dos valores obtidos nos cenários de estudo foram realizadas, dimensionando-se vigas de maneira otimizada com diferentes vãos, obtendo-se os melhores resultados ambientais nos concretos de menor resistência, e os econômicos atrelados às dimensões dos vãos das vigas. Já quando dimensionados pilares de maneira otimizada, com diferentes esforços atuantes, os melhores resultados em todos os cenários foram obtidos para as resistências características maiores. Uma edificação também foi avaliada, tendo-se como mais viável ambientalmente para todos os cenários de estudo a estrutura dimensionada com as resistências características menores. Além disso, contribuições diferenciadas nas emissões de CO<sub>2</sub> dos materiais e semelhantes dos elementos estruturais foram verificadas, quando comparados esses mesmos cenários. Em relação ao cenário econômico, as resistências maiores se apresentaram mais viáveis.

Palavras-chave: Concreto armado. Emissão de CO<sub>2</sub>. Otimização. Avaliação do ciclo de vida.

## ABSTRACT

Studying the environmental impacts of the various economic activities has become increasingly relevant; in this context, it can be highlighted as a condition of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) released into the atmosphere and which contributes to the greenhouse effect. Namely, among the main economic activities with the greatest environmental impact is the civil construction industry and its production chain - with the processes of extraction, production and transportation of materials - having the concrete among the most used building materials in the world with a considerable and important contribution to these emissions. For this purpose, new studies have been carried out in order to reduce the emission of this gas, focusing on the analysis and evaluations of the production of the binders and their additions, as well as on the dimensioning with definitions of the most viable concrete characteristics. Therefore, this study aimed to search for subsidies that can be considered to obtain and minimize this environmental impact and, in parallel, the economic impact. In this way, four study scenarios were proposed, considering the phase from the cradle-to-gate, three of CO<sub>2</sub> emissions and one of costs, taking into account concrete with different characteristic resistances, steel and wooden shapes. In the first scenario, CO<sub>2</sub> emissions were quantified from the survey of the contribution of each raw material used in the study region, from its extraction to its use in the construction. For the second and third scenarios, the quantifications of raw material contributions in terms of CO<sub>2</sub> emissions were generated from the 2018 Ecoinvent 3.5 database and the SimaPro software, version 9.0.0.48, differentiating a scenario from another through adjustments made to the global software database with regional data. In this sense, considerable differences in the values of CO<sub>2</sub> emissions were verified, always having the binder with great influence and contribution. The fourth scenario focused on obtaining average material costs in the region. Therefore, evaluations based on the values obtained in the study scenarios were carried out, dimensioning wood beams in an optimized way with different spans, obtaining the best environmental results in the concretes of less resistance, and economic ones linked to the dimensions of the spans of the beams. When the wooden pillars were dimensioned in an optimized way, with different acting efforts, the best results in all scenarios were obtained for the higher characteristic resistances. A building was also evaluated, being considered more environmentally viable for all scenarios of study, the dimensioned structure with the smaller characteristic resistances. In addition, differentiated contributions to CO<sub>2</sub> emissions from materials and similar structural elements were verified, when comparing these same scenarios. In relation to the economic scenario, the bigger resistance was more viable.

Keywords: Reinforced concrete. CO<sub>2</sub> emission. Optimization. Life cycle assessment.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	9
<b>LISTA DE GRÁFICOS</b> .....	10
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	17
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	19
1.1 JUSTIFICATIVA .....	21
1.2 OBJETIVOS .....	23
1.2.1 Objetivo geral.....	23
1.2.2 Objetivos específicos.....	23
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	24
2.1 MATÉRIAS-PRIMAS COMPONENTES DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO.....	24
2.1.1 Aglomerante .....	24
2.1.2 Agregado miúdo.....	26
2.1.3 Agregado graúdo .....	27
2.1.4 Aço .....	28
2.1.5 Formas.....	29
2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) .....	30
2.3 SOFTWARES DE ANÁLISE DO CICLO DE VIDA - ACV .....	34
2.4 OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO VISANDO A MINIMIZAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL .....	38
2.5 ESTUDOS ACERCA DAS EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO.....	39
2.6 ANÁLISE DAS CONCENTRAÇÕES DOS ESTUDOS DE ACV DAS ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO EM RELAÇÃO ÀS EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> .....	49
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	52
<b>4 QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> E DOS CUSTOS DAS MATÉRIAS-PRIMAS DO CONCRETO ARMADO PARA CADA CENÁRIO DE ESTUDO</b> .....	55
4.1 EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> DAS MATÉRIAS-PRIMAS DO CONCRETO ARMADO A PARTIR DA REGIÃO DE ESTUDO – CENÁRIO 1 .....	55
4.2 EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> DAS MATÉRIAS-PRIMAS DO CONCRETO ARMADO A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE SIMAPRO – CENÁRIO 2 .....	66
4.3 EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> DAS MATÉRIAS-PRIMAS DO CONCRETO A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE SIMAPRO COM OS VALORES AJUSTADOS PARA A REGIÃO DE ESTUDO – CENÁRIO 3 .....	70

4.4 CUSTOS DAS MATÉRIAS-PRIMAS DO CONCRETO ARMADO A PARTIR DO CUSTO MÉDIO DO MERCADO NA REGIÃO DE ESTUDO – CENÁRIO 4.....	74
4.5 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS VALORES QUANTIFICADOS PARA CADA UM DOS CENÁRIOS DE ESTUDO.....	75
<b>5 DIMENSIONAMENTOS E AVALIAÇÕES DE ELEMENTOS E ESTRUTURA EM CONCRETO ARMADO A PARTIR DE CADA CENÁRIO DE ESTUDO .....</b>	<b>78</b>
5.1 DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO VISANDO A MINIMIZAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS E DOS CUSTOS. ....	78
5.1.1 Avaliação das emissões de CO <sub>2</sub> do dimensionamento otimizado de vigas com a utilização de dados gerados para o cenário 1 .....	79
5.1.2 Avaliação das emissões de CO <sub>2</sub> do dimensionamento otimizado de vigas com a utilização de dados gerados para o cenário 2 .....	81
5.1.3 Avaliação das emissões de CO <sub>2</sub> do dimensionamento otimizado de vigas com a utilização de dados gerados para o cenário 3 .....	82
5.1.4 Avaliação financeira do dimensionamento otimizado de vigas com a utilização dos dados gerados para o cenário 4 .....	84
5.2 DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE PILARES DE CONCRETO ARMADO VISANDO A MINIMIZAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS E DOS CUSTOS .....	86
5.2.1 Avaliação das emissões de CO <sub>2</sub> do dimensionamento otimizado de pilares com a utilização de dados gerados para o cenário 1 .....	87
5.2.2 Avaliação das emissões de CO <sub>2</sub> do dimensionamento otimizado de pilares com a utilização de dados gerados para o cenário 2 .....	89
5.2.3 Avaliação das emissões de CO <sub>2</sub> do dimensionamento otimizado de pilares utilizando dados gerados para o cenário 3 .....	91
5.2.4 Avaliação financeira do dimensionamento otimizado de pilares com a utilização dos dados gerados para o cenário 4 .....	93
5.3 DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURA EM CONCRETO ARMADO COM AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> E DOS CUSTOS .....	95
5.3.1 Avaliações das emissões de CO <sub>2</sub> a partir do dimensionamento de estrutura em concreto armado considerando os valores obtidos para o cenário 1 de estudo .....	98
5.3.1.1 Contribuições e comportamentos dos materiais .....	98
5.3.1.2 Contribuições e comportamentos dos elementos estruturais.....	102
5.3.1.3 Comportamento da estrutura em concreto armado.....	104
5.3.2 Avaliações das emissões de CO <sub>2</sub> a partir do dimensionamento de estrutura em concreto armado considerando os valores obtidos para o cenário 2 de estudo .....	104
5.3.2.1 Contribuições e comportamentos dos materiais .....	105
5.3.2.2 Contribuições e comportamentos dos elementos estruturais.....	108
5.3.2.3 Comportamento da estrutura em concreto armado.....	110



5.3.3 Avaliações das emissões de CO <sub>2</sub> a partir do dimensionamento de estrutura em concreto armado considerando os valores obtidos para o cenário 3 de estudo .....	110
5.3.3.1 Contribuições e comportamentos dos materiais .....	111
5.3.3.2 Contribuições e comportamentos dos elementos estruturais .....	114
5.3.3.3 Comportamento da estrutura em concreto armado .....	116
5.3.4 Avaliações dos custos a partir do dimensionamento de estrutura em concreto armado considerando os valores obtidos para o cenário 4 de estudo .....	116
5.3.4.1 Contribuições e comportamentos dos materiais .....	117
5.3.4.2 Contribuições e comportamentos dos elementos estruturais .....	120
5.3.4.3 Comportamento da estrutura em concreto armado .....	121
<b>6 AVALIAÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DA ESTRUTURA EM CONCRETO ARMADO EM ESTUDO .....</b>	<b>123</b>
6.1 DESEMPENHO AMBIENTAL DA ESTRUTURA EM CONCRETO ARMADO PARA AS 18 CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL .....	123
6.2 DESEMPENHO AMBIENTAL DA ESTRUTURA EM CONCRETO ARMADO PARA AS TRÊS CATEGORIAS DE DANOS .....	125
<b>7 ANÁLISES E COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS .....</b>	<b>128</b>
7.1 ELEMENTOS ESTRUTURAIS DIMENSIONADOS DE MANEIRA ISOLADA....	128
7.1.1 Vigas dimensionadas de maneira otimizada .....	128
7.1.2 Pilares dimensionados de maneira otimizada.....	130
7.2 ELEMENTOS ESTRUTURAIS DIMENSIONADOS NA ESTRUTURA .....	131
7.2.1 Vigas dimensionadas na estrutura em concreto armado .....	132
7.2.2 Pilares dimensionados na estrutura em concreto armado.....	132
7.2.3 Lajes, escadas e fundações dimensionadas na estrutura de concreto armado.....	133
7.3 ESTRUTURA DIMENSIONADA EM CONCRETO ARMADO .....	134
7.3.1 Contribuições e comportamentos dos materiais.....	134
7.3.2 Contribuições e comportamentos dos elementos estruturais.....	135
7.3.3 Comportamento da estrutura em concreto armado .....	138
7.3.4 Comportamento das categorias de impacto e danos ambientais da estrutura .....	139
<b>8 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>140</b>
8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	144
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>145</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>153</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estágios do ciclo de vida.....	31
Figura 2: Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	31
Figura 3: Ciclo de vida do concreto.....	33
Figura 4: Fluxograma das fases de emissões de CO <sub>2</sub> do concreto armado .....	51
Figura 5: Síntese das fases desenvolvidas no estudo.....	54
Figura 6: Localização geográfica e distâncias dos deslocamentos das matérias-primas.....	56
Figura 7: Processo de extração, produção e transporte do agregado graúdo e miúdo (areia de britagem) .....	56
Figura 8: Processo extração, produção e transporte do agregado miúdo (areia natural) .....	57
Figura 9: Processo extração, produção e transporte da madeira.....	58
Figura 10: Madeiras utilizadas para a forma .....	59
Figura 11: Fluxograma com os quantitativos ajustados para o aço.....	70
Figura 12: Fluxograma com os quantitativos ajustados para a forma de madeira .....	70
Figura 13: Fluxograma com os quantitativos ajustados para os diferentes concretos.....	71
Figura 14: Viga biapoiada otimizada .....	79
Figura 15: Variáveis de projeto da otimização do pilar.....	86
Figura 16: Planta de arquitetura do pavimento tipo da edificação .....	96
Figura 17: Planta de forma da estrutura do pavimento tipo da edificação .....	96
Figura 18: Vistas em 3D da estrutura dimensionada.....	97

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Contribuições percentuais nas emissões de CO <sub>2</sub> da extração/produção e do transporte nos valores obtidos para cada matéria-prima .....	60
Gráfico 2: Contribuições percentuais das matérias-primas nas emissões CO <sub>2</sub> de cada metro cúbico de concreto (cenário 1) .....	63
Gráfico 3: Contribuições percentuais das matérias-primas em um metro cúbico de concreto de 50 MPa.....	64
Gráfico 4: Contribuições percentuais dos processos da dosadora de concreto nas emissões de CO <sub>2</sub> .....	65
Gráfico 5: Contribuições percentuais das matérias-primas e da dosadora de concreto nas emissões de CO <sub>2</sub> de um metro cúbico de concreto (cenário 1) .....	65
Gráfico 6: Variações percentuais das emissões de CO <sub>2</sub> e dos quantitativos das matérias-primas utilizadas no concreto a partir da resistência de 20 MPa (cenário 1) .....	66
Gráfico 7: Contribuições percentuais das matérias-primas e da dosadora de concreto nas emissões de CO <sub>2</sub> de um metro cúbico de concreto (cenário 2) .....	67
Gráfico 8: Contribuições percentuais das matérias-primas nas emissões de CO <sub>2</sub> de cada metro cúbico de concreto (cenário 2) .....	68
Gráfico 9: Variações percentuais das emissões de CO <sub>2</sub> e dos quantitativos das matérias-primas utilizadas no concreto a partir da resistência de 20 MPa (cenário 2) .....	69
Gráfico 10: Contribuições percentuais das matérias-primas nas emissões de CO <sub>2</sub> para cada metro cúbico de concreto (cenário 3) .....	72
Gráfico 11: Contribuições percentuais das matérias-primas e da dosadora de concreto nas emissões de CO <sub>2</sub> de um metro cúbico de concreto (cenário 3) .....	73
Gráfico 12: Variações percentuais das emissões CO <sub>2</sub> e dos quantitativos das matérias-primas utilizadas no concreto a partir da resistência de 20 MPa (cenário 3) .....	74
Gráfico 13: Variações percentuais dos custos e dos quantitativos das matérias-primas utilizadas no concreto a partir da resistência de 20 MPa (cenário 4) .....	75
Gráfico 14: Valores das emissões de CO <sub>2</sub> do concreto para as diferentes resistências e cenários de estudo.....	76

Gráfico 15: Variações percentuais das emissões de CO <sub>2</sub> e custos do concreto a partir da resistência de 20 MPa.....	76
Gráfico 16: Emissões de CO <sub>2</sub> das vigas otimizadas nos diferentes vãos e resistências de concreto (cenário 1).....	79
Gráfico 17: Variações das emissões de CO <sub>2</sub> das vigas otimizadas a partir da resistência de 20 MPa (cenário 1). ....	80
Gráfico 18: Contribuições médias dos materiais nas emissões de CO <sub>2</sub> das vigas otimizadas (cenário 1) .....	80
Gráfico 19: Emissões de CO <sub>2</sub> das vigas otimizadas com diferentes vãos e resistências de concreto (cenário 2) .....	81
Gráfico 20: Variações das emissões de CO <sub>2</sub> das vigas otimizadas a partir da resistência de 20 MPa (cenário 2) .....	82
Gráfico 21: Contribuições médias dos materiais nas emissões de CO <sub>2</sub> das vigas otimizadas (cenário 2) .....	82
Gráfico 22: Emissões de CO <sub>2</sub> das vigas otimizadas com diferentes vãos e resistências de concreto (cenário 3) .....	83
Gráfico 23: Variações das emissões de CO <sub>2</sub> das vigas otimizadas a partir da resistência de 20 MPa (cenário 3) .....	83
Gráfico 24: Contribuições médias dos materiais nas emissões de CO <sub>2</sub> das vigas otimizadas (cenário 3) .....	84
Gráfico 25: Custos das vigas otimizadas com diferentes vãos e resistências de concreto (cenário 4) .....	84
Gráfico 26: Variações dos custos das vigas otimizadas a partir da resistência de 20 MPa (cenário 4) .....	85
Gráfico 27: Contribuições médias dos materiais nos custos das vigas otimizadas (cenário 4). .....	85
Gráfico 28: Emissões CO <sub>2</sub> dos pilares otimizados com diferentes esforços e resistências de concreto (cenário 1) .....	88
Gráfico 29: Variações das emissões de CO <sub>2</sub> dos pilares otimizados a partir da resistência de 20 MPa (cenário 1) .....	88

Gráfico 30: Contribuições dos materiais nas emissões de CO <sub>2</sub> dos pilares otimizados (cenário 1) .....	89
Gráfico 31: Emissões CO <sub>2</sub> dos pilares otimizados com diferentes esforços e resistências de concreto (cenário 2) .....	90
Gráfico 32: Variações das emissões de CO <sub>2</sub> dos pilares otimizados a partir da resistência de 20 MPa (cenário 2) .....	90
Gráfico 33: Contribuições dos materiais nas emissões de CO <sub>2</sub> dos pilares otimizados (cenário 2) .....	91
Gráfico 34: Emissões CO <sub>2</sub> dos pilares otimizados com diferentes esforços e resistências de concreto (cenário 3) .....	92
Gráfico 35: Variações das emissões de CO <sub>2</sub> dos pilares otimizados a partir da resistência de 20 MPa (cenário 3) .....	92
Gráfico 36: Contribuições dos materiais nas emissões de CO <sub>2</sub> dos pilares otimizados (cenário 3) .....	93
Gráfico 37: Custos dos pilares otimizados com diferentes esforços e resistências de concreto (cenário 4) .....	94
Gráfico 38: Variações dos custos dos pilares otimizados a partir da resistência de 20 MPa (cenário 4) .....	94
Gráfico 39: Contribuições dos materiais nos custos dos pilares otimizados (cenário 4) .....	95
Gráfico 40: Emissões de CO <sub>2</sub> do concreto da estrutura a partir do cenário 1 .....	99
Gráfico 41: Variações percentuais das emissões de CO <sub>2</sub> do concreto da estrutura do cenário 1 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.....	99
Gráfico 42: Emissões de CO <sub>2</sub> do aço da estrutura a partir do cenário 1.....	100
Gráfico 43: Variações percentuais das emissões de CO <sub>2</sub> do aço da estrutura do cenário 1 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	100
Gráfico 44: Emissões de CO <sub>2</sub> da forma da estrutura a partir do cenário 1.....	101
Gráfico 45: Variações percentuais das emissões de CO <sub>2</sub> da forma da estrutura do cenário 1 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.....	101
Gráfico 46: Contribuições percentuais dos materiais nas emissões de CO <sub>2</sub> para a estrutura a partir do cenário 1.....	102

Gráfico 47: Emissões de CO <sub>2</sub> dos elementos estruturais a partir do cenário 1 .....	102
Gráfico 48: Variações percentuais das emissões de CO <sub>2</sub> dos elementos estruturais do cenário 1 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	103
Gráfico 49: Contribuições percentuais dos elementos estruturais nas emissões de CO <sub>2</sub> da estrutura em concreto armado a partir do cenário 1 .....	103
Gráfico 50: Emissões totais de CO <sub>2</sub> das estruturas em concreto armado dimensionadas a partir do cenário 1 .....	104
Gráfico 51: Emissões de CO <sub>2</sub> do concreto da estrutura a partir do cenário 2 .....	105
Gráfico 52: Variações percentuais das emissões de CO <sub>2</sub> do concreto da estrutura do cenário 2 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	105
Gráfico 53: Emissões de CO <sub>2</sub> do aço da estrutura a partir do cenário 2 .....	106
Gráfico 54: Variações percentuais das emissões de CO <sub>2</sub> do aço da estrutura do cenário 2 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	106
Gráfico 55: Emissões de CO <sub>2</sub> da forma da estrutura a partir do cenário 2 .....	107
Gráfico 56: Variações percentuais das emissões de CO <sub>2</sub> da forma da estrutura do cenário 2 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	107
Gráfico 57: Contribuições percentuais dos materiais nas emissões de CO <sub>2</sub> da estrutura a partir do cenário 2 .....	108
Gráfico 58: Emissões de CO <sub>2</sub> do concreto armado dos elementos estruturais a partir do cenário 2 .....	108
Gráfico 59: Variações percentuais das emissões de CO <sub>2</sub> do concreto armado dos elementos estruturais do cenário 2 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	109
Gráfico 60: Contribuições percentuais dos elementos estruturais nas emissões de CO <sub>2</sub> da estrutura em concreto armado a partir do cenário 2 .....	109
Gráfico 61: Emissões totais de CO <sub>2</sub> das estruturas em concreto armado dimensionadas a partir do cenário 2 .....	110
Gráfico 62: Emissões de CO <sub>2</sub> do concreto da estrutura a partir do cenário 3 .....	111
Gráfico 63: Variações percentuais das emissões de CO <sub>2</sub> do concreto da estrutura do cenário 3 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	111
Gráfico 64: Emissões de CO <sub>2</sub> do aço da estrutura a partir do cenário 3 .....	112

Gráfico 65: Variações percentuais das emissões de CO <sub>2</sub> do aço da estrutura do cenário 3 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	112
Gráfico 66: Emissões de CO <sub>2</sub> da forma da estrutura a partir do cenário 3.....	113
Gráfico 67: Variações percentuais das emissões de CO <sub>2</sub> da forma da estrutura do cenário 3 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.....	113
Gráfico 68: Contribuições percentuais dos materiais nas emissões de CO <sub>2</sub> da estrutura a partir do cenário 3. ....	114
Gráfico 69: Emissões de CO <sub>2</sub> do concreto armado da estrutura a partir do cenário 3 .....	114
Gráfico 70: Variações percentuais das emissões de CO <sub>2</sub> do concreto armado dos elementos estruturais do cenário 3 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	115
Gráfico 71: Contribuições percentuais dos elementos estruturais nas emissões de CO <sub>2</sub> da estrutura em concreto armado a partir do cenário 3 .....	115
Gráfico 72: Emissões totais de CO <sub>2</sub> das estruturas em concreto armado dimensionadas a partir do cenário 3 .....	116
Gráfico 73: Custos do concreto da estrutura a partir do cenário 4 .....	117
Gráfico 74: Variações percentuais dos custos do concreto da estrutura do cenário 4 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	117
Gráfico 75: Custos do aço da estrutura a partir do cenário 4 .....	118
Gráfico 76: Variações percentuais dos custos do aço da estrutura do cenário 4 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	118
Gráfico 77: Custos da forma da estrutura a partir do cenário 4.....	119
Gráfico 78: Variações percentuais dos custos da forma da estrutura do cenário 4 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	119
Gráfico 79: Contribuições percentuais dos materiais nos custos da estrutura a partir do cenário 4 .....	119
Gráfico 80: Custos do concreto armado dos elementos estruturais a partir do cenário 4.....	120
Gráfico 81: Variações percentuais dos custos do concreto armado dos elementos estruturais do cenário 4 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	120
Gráfico 82: Contribuições percentuais dos elementos estruturais nos custos da estrutura em concreto armado a partir do cenário 4 .....	121

Gráfico 83: Custos das estruturas em concreto armado dimensionadas a partir do cenário 4 .....	122
Gráfico 84: Danos à Saúde Humana da estrutura em concreto armado para os dois cenários de estudo avaliados nas diferentes resistências características do concreto.....	126
Gráfico 85: Danos aos Ecossistemas da estrutura em concreto armado nos dois cenários de estudo avaliados nas diferentes resistências características do concreto.....	127
Gráfico 86: Danos aos Recursos da estrutura em concreto armado nos dois cenários de estudo avaliados nas diferentes resistências características do concreto .....	127
Gráfico 87: Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para as vigas otimizadas com vão de 3 metros a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	128
Gráfico 88: Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para as vigas otimizadas com vão livre 6 metros a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	129
Gráfico 89: Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para as vigas otimizadas com vão livre 9 metros a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	129
Gráfico 90: Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para as vigas otimizadas com vão livre 12 metros a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	129
Gráfico 91: Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para os P1 otimizados a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	130
Gráfico 92: Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para os P2 otimizados a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	130
Gráfico 93: Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para os P3 otimizados a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	131
Gráfico 94: Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para os P4 otimizados a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	131
Gráfico 95: Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para as vigas dimensionadas na estrutura a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	132



Gráfico 96: Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para os pilares dimensionados na estrutura a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	133
Gráfico 97: Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para as lajes dimensionadas na estrutura a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	133
Gráfico 98: Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para as escadas dimensionadas na estrutura a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	134
Gráfico 99: Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para as fundações dimensionadas na estrutura a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	134
Gráfico 100: Contribuições percentuais dos materiais nos resultados obtidos para as estruturas em cada cenário de estudo e nas diferentes resistências características do concreto .....	135
Gráfico 101: Contribuições percentuais de cada elemento estrutural nos resultados obtidos para a estrutura em concreto armado em cada cenário de estudo e nas diferentes resistências características do concreto.....	137
Gráfico 102: Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para a estrutura dimensionada a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto .....	138
Gráfico 103: Resistências características do concreto da estrutura mais viáveis ambientalmente para as diferentes categorias de impactos e danos.....	139

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Emissões atmosféricas totais nas etapas de ciclo de vida da areia .....	26
Tabela 2: Emissões de gases efeito estufa do aço no Brasil .....	29
Tabela 3: Emissões de CO <sub>2</sub> da extração e produção do agregado graúdo e miúdo (areia de britagem) .....	57
Tabela 4: Emissões de CO <sub>2</sub> do transporte do agregado graúdo e miúdo (areia britagem) até a dosadora de concreto .....	57
Tabela 5: Emissões de CO <sub>2</sub> da extração e produção do agregado miúdo natural. ....	58
Tabela 6: Emissões de CO <sub>2</sub> do transporte do agregado miúdo natural até a dosadora de concreto .....	58
Tabela 7: Emissões de CO <sub>2</sub> da produção e beneficiamento da madeira.....	58
Tabela 8: Emissões de CO <sub>2</sub> do transporte da madeira até a obra. ....	59
Tabela 9: Emissões de CO <sub>2</sub> do transporte do cimento até a dosadora de concreto .....	59
Tabela 10: Emissões de CO <sub>2</sub> do transporte do aço até a obra. ....	60
Tabela 11: Emissões de CO <sub>2</sub> do concreto a partir do traço de 20 MPa. ....	61
Tabela 12: Emissões de CO <sub>2</sub> do concreto a partir do traço de 25 MPa .....	61
Tabela 13: Emissões de CO <sub>2</sub> do concreto a partir do traço de 30 MPa .....	61
Tabela 14: Emissões de CO <sub>2</sub> do concreto a partir do traço de 35 MPa .....	61
Tabela 15: Emissões de CO <sub>2</sub> do concreto a partir do traço de 40 MPa. ....	62
Tabela 16: Emissões de CO <sub>2</sub> do concreto a partir do traço de 45 MPa .....	62
Tabela 17: Emissões de CO <sub>2</sub> do concreto a partir do traço de 50 MPa. ....	62
Tabela 18: Emissões de CO <sub>2</sub> geradas nos processos de produção e transporte da central dosadora de concreto .....	64
Tabela 19: Emissões finais de CO <sub>2</sub> para a produção do concreto armado (cenário 1).....	66
Tabela 20: Materiais e processos SimaPro (cenário 2) .....	67
Tabela 21: Dosagem dos traços do concreto do software SimaPro (cenário 2) .....	67
Tabela 22: Emissões de CO <sub>2</sub> geradas no software SimaPro (cenário 2) .....	69
Tabela 23: Emissões de CO <sub>2</sub> geradas no software SimaPro ajustado (cenário 3). ....	73

Tabela 24: Custos médios dos materiais na região de estudo (cenário 4). .....	75
Tabela 25: Valores dos esforços atuantes nas seções dos pilares.....	87
Tabela 26: Comportamentos das categorias de impacto ambiental para as estruturas dimensionadas a partir dos cenários de estudo 2 e 3 .....	124

## 1 INTRODUÇÃO

Ao estudar os materiais utilizados na área da construção civil, verifica-se que o concreto armado é um dos mais empregados no dia a dia, sendo responsável por uma parcela significativa das emissões de dióxido de carbono, ou CO<sub>2</sub>, na atmosfera (EDVARDSEN; TOLLOSE, 2001).

Cabello *et al.* (2016) afirmam que as emissões de CO<sub>2</sub> são compreendidas pela nossa sociedade como uma das causas da mudança climática, assim, a fim de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, suas fontes devem ser identificadas. Tratando-se da constituição do concreto, observa-se que as suas matérias-primas, durante os processos de produção e de transporte, consomem energia ou geram emissões que contribuem para o efeito estufa e o aquecimento global. Destacam-se como fontes, dentre as matérias-primas utilizadas na produção do concreto armado, os vários tipos de aglomerante, os agregados graúdo e miúdo, e o aço.

Sabe-se que o concreto armado se apresenta como um material de construção versátil, pois pode ser moldado em diferentes formas para atender exigências arquitetônicas específicas, também resiste ao fogo, corrosão e condições climáticas adversas e, além disso, é relativamente barato em comparação ao aço e outros materiais de construção. No entanto, vários estudos têm demonstrado que o concreto não só consome uma grande quantidade de energia e de recursos naturais, mas também emite uma quantidade considerável de CO<sub>2</sub> durante sua fabricação e transporte. Entre as abordagens sugeridas para reduzir esses custos ambientais, é possível destacar a utilização de materiais de alto desempenho, materiais reciclados e subprodutos, como também a substituição por materiais com menores emissões de CO<sub>2</sub> (PAIK; NA; YOON, 2019).

Já sobre o aglomerante, Mikulcic *et al.* (2016) destacam que a indústria de produção de cimento em todo o mundo é um dos maiores setores industriais emissores de CO<sub>2</sub> e é responsável por uma quantidade considerável de emissões, em nível global, de gases de efeito estufa.

Quanto à produção de agregados rochosos, que envolve a retirada de matérias-primas nos processos de extração nas pedreiras, gasta-se energia e consome-se diesel e, por conseguinte, gera-se CO<sub>2</sub> devido à detonação de rochas com explosivos, aos trabalhos com roçadeiras e com escavadeiras a diesel, à operação de transportadores e de trituradores alimentados por eletricidade, e ao transporte movido a diesel dos agregados para o local em que se produz o concreto (COLLINS, 2013).

Isso posto, embora a construção de edifícios traga inegáveis benefícios à comunidade, também está associada a altos custos em termos de impactos ambientais. Conseqüentemente, a adoção de procedimentos e de estratégias para minimizar esses impactos necessita de uma mudança nas atitudes e na cultura dos construtores e de todos os demais envolvidos no processo (PULLEN *et al.*, 2012).

Segundo Zhang e Wang (2015), a indústria da construção desempenha um papel importante no desenvolvimento econômico e social, contudo, é uma fonte primária de emissões de carbono. Nesse sentido, devido à mudança climática global, a conservação de energia e a redução de emissões de carbono tornaram-se questões críticas na indústria da construção.

À medida que a investigação sobre a redução das emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida dos edifícios se torna cada vez mais importante, é essencial que haja o desenvolvimento de técnicas que possam avaliar quantitativamente as emissões de CO<sub>2</sub> de um edifício em relação aos materiais de construção.

Conforme Yeo e Potra (2015), estão sendo realizados esforços para conseguir um funcionamento mais eficiente dos edifícios, com o objetivo de reduzir a contribuição da indústria da construção no que tange o consumo de energia e as emissões de gases do efeito estufa. Essa contribuição também inclui a energia incorporada às estruturas, ou seja, aquela consumida nos processos de extração, fabricação, transporte e utilização dos materiais de construção (incluindo materiais reciclados). Em particular, as estruturas de concreto armado – que são grandes consumidoras de cimento – são responsáveis por uma proporção considerável das emissões mundiais de carbono.

Portanto, considerar de modo integrado os aspectos ambientais e econômicos para a seleção de materiais e componentes a serem utilizados torna-se um meio importante e imprescindível para promover uma maior sustentabilidade na execução das construções, e isso pode ser viabilizado com a utilização de ferramentas de avaliação.

Diante disso, Silva (2013) relata que diversas metodologias vêm sendo empregadas no estudo dos impactos ambientais das edificações, dentre elas a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que consiste em um método que permite a realização de um estudo detalhado de todas as fases da edificação, como a de materiais, de construção, de uso e manutenção, e de fim de vida.

De acordo com Hájek, Fiala e Kynclová (2011), a metodologia da análise de ciclo de vida é conhecida há muitos anos, no entanto, a aplicação eficaz e a qualidade dos resultados dependem da disponibilidade de dados de entrada relevantes, bem como de uma análise de inventário detalhada baseada em fontes de dados regionais específicos.

Além disso, pesquisas desenvolvidas têm apontado também em direção à otimização estrutural por meio da consideração de custos ambientais, como exemplo de trabalhos podem ser citados os estudos de Payá-Zaforteza *et al.* (2009), Yeo e Gabbai (2011), Yepes *et al.* (2012), Medeiros e Kripkra (2014), Kim *et al.* (2016), e García-Segura *et al.* (2017).

Assim sendo, para atender essas questões, através do presente estudo realizado na região Norte do Rio Grande do Sul, busca-se a obtenção de subsídios, parâmetros, que possam direcionar para melhores escolhas em relação a estudos e projetos de estruturas em concreto armado, levando em conta aspectos ambientais e econômicos.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo Oh, Choi e Park (2016), dados de emissão de CO<sub>2</sub> incorporados em materiais de construção variam significativamente, dependendo da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), da nação e do tempo de formação de dados. Nos dados de emissão utilizados na literatura recente as diferenças percentuais em emissões de CO<sub>2</sub> sobre concreto e aço, como dois materiais de construção típicos, foram de 267% e 863%, respectivamente.

O concreto é de longe o material de construção mais difundido no mundo devido à competitividade econômica, à confiabilidade e à versatilidade. Ele é um material estrutural tradicional, mas apresenta uma evolução contínua em razão de pesquisas de materiais aplicados nesse campo. Mesmo assim, por causa de seu grande uso e dos processos de produção relacionados, o concreto ainda contribui para aproximadamente 7% das emissões de CO<sub>2</sub> no mundo (D'ALESSANDRO *et al.*, 2017).

Jahandideh *et al.* (2020) relatam que o crescimento exponencial do desenvolvimento das cidades e o aumento da demanda por construções são fatores de degradação ambiental, sendo importante o controle das emissões de CO<sub>2</sub>. Em geral, as estruturas de concreto contribuem com o impacto ambiental e são uma das maiores fontes de emissão de CO<sub>2</sub> nas cidades. Afinal, nos diferentes estágios do ciclo de vida das estruturas de concreto analisadas (produção, execução, operação e demolição), o consumo de energia e a fase de produção de uma estrutura se apresentaram como as principais fontes de emissões de CO<sub>2</sub>.

Já Oliveira *et al.* (2014), em seu estudo de estratégias para a minimização da emissão de CO<sub>2</sub> do concreto, argumentam que muitas variáveis que influenciam a pegada ambiental de um concreto podem ser controladas por aqueles que especificam e produzem os concretos, no

entanto, outras são controladas pelos produtores das matérias-primas, com destaque ao aglomerante, sendo somente possível selecionar o melhor fornecedor dentre os disponíveis.

Nesse sentido, Silva (2013) relata que a produção dos materiais de construção é realizada em diferentes lugares do mundo, e tal fato evidencia a necessidade da criação de um perfil ambiental específico para cada um desses países, já que muitos deles não têm o perfil ambiental de seus produtos e então recorrem aos dados de outros países, como ao banco de dados europeu, com o objetivo de desenvolver estudos do tipo de avaliação do ciclo de vida. Logo, levantar dados relativos à emissão de CO<sub>2</sub> e consumo de energia do concreto é avaliar a maior representatividade em massa dos insumos de materiais utilizados na construção de uma edificação. O estudo também indica que o concreto teve impacto direto no consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub>, respectivamente, de 68% e 60% do total.

Por sua vez, Evangelista *et al.* (2018), em pesquisa realizada sobre o desempenho ambiental de edifícios residenciais no Brasil com diferentes tipologias e utilizando ACV de “berço a túmulo”, apresentaram a fase operacional como a mais crítica e relevante pelo expressivo consumo de energia elétrica, contribuindo com mais de 80% em diversas categorias de impacto. Ainda de acordo com a análise, as contribuições dos materiais de construção, concreto, aço e revestimento cerâmico foram as de maior impacto ambiental, com repercussões nos subsistemas de estrutura, alvenaria e revestimento.

Além disso, Purnell (2012), em seu estudo, demonstrou que os parâmetros de projeto estrutural (dimensões, escolha de seção e capacidade de carga) para componentes estruturais fundamentais (vigas simples e colunas) são tão importantes quanto a escolha do material em relação ao seu efeito sobre o CO<sub>2</sub> incorporado.

Assim, em virtude da problemática apresentada, dando continuidade à linha de estudos do programa de pós graduação de engenharia já realizados por Santoro (2015), os levantamentos a respeito das emissões de CO<sub>2</sub> do concreto armado são revisados e aprimorados neste trabalho, buscando obter dados condizentes com a realidade da região de estudo. Também, são gerados dados de emissões de CO<sub>2</sub> a partir da utilização de um software de análise ambiental para que análises e comparações sobre como utilizá-lo de formas diferentes sejam realizadas. Na sequência, diversas situações estruturais são geradas e analisadas, possibilitando a determinação de subsídios que orientem na realização de estudos e projetos de estruturas em concreto armado, levando em consideração o enfoque ambiental. Paralelamente, questões econômicas também serão avaliadas e comparadas.

## 1.2 OBJETIVOS

Nesta etapa são descritos o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

### 1.2.1 Objetivo geral

Delimitou-se como objetivo geral: obter subsídios que possam ser levados em conta para a minimização do impacto ambiental no que diz respeito às emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), possibilitando a realização de estudos e projetos de estruturas em concreto armado que considerem o enfoque ambiental da região de estudo.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Com base no objetivo geral, foi possível determinar os seguintes objetivos específicos:

- a) obter, para cada cenário de estudo proposto, os valores de emissões de CO<sub>2</sub> das matérias-primas do concreto armado, fase do berço ao portão, comparando e avaliando os comportamentos dos resultados obtidos;
- b) realizar estudo de caso de vigas e pilares em concreto armado, dimensionando-os de maneira otimizada para diferentes cenários de estudo e resistências características do concreto;
- c) realizar estudo de caso de estrutura em concreto armado, dimensionando-a para diferentes cenários de estudo e resistências características do concreto;
- d) avaliar o comportamento dos resultados obtidos para as diferentes resistências características do concreto, considerando as contribuições dos materiais, dos elementos estruturais e da estrutura em cada cenário de estudo proposto;
- e) apresentar subsídios, diretrizes, que possam direcionar a busca da redução do impacto das estruturas de concreto no meio ambiente em relação às emissões de CO<sub>2</sub> e, paralelamente, a redução dos custos, levando em consideração diferentes cenários de estudo e resistências características do concreto.



## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 MATÉRIAS-PRIMAS COMPONENTES DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

A produção de materiais utilizados na construção de edificações resulta em diversos impactos ambientais diretos ou indiretos, como a alteração de habitat natural e extração de combustíveis fósseis e minerais (quando da obtenção de insumos para as indústrias), aumento da temperatura global (quando da emissão de gases de efeito estufa), acidificação e eutrofização, entre outros (COSTA, 2012).

As matérias-primas, na maioria das vezes, são processadas de alguma forma e transportadas antes de sua utilização. Diante disso, esses processos e transportes podem ter um impacto menor ou mais extensivo no meio ambiente, dependendo do tipo de material e do sistema de extração, produção e distribuição (CARNEIRO *et al.*, 2009).

Miller, Horvath e Monteiro (2016) relatam que dependendo da tecnologia de fabricação, da geração de energia, do uso de materiais cimentícios suplementares e da necessidade de resistência do concreto de uma região, a produção de um metro cúbico de concreto produz quantidades variáveis de emissões de gases de efeito estufa. No entanto, com base nas médias regionais de produção e demanda, as emissões médias aritméticas dessas emissões para a produção de um metro cúbico de concreto caem em uma faixa relativamente estreita: de 240 a 320 kg CO<sub>2</sub>-eq / m<sup>3</sup>, com 90% a 95% dos valores atribuídos à produção do cimento.

Na sequência, são apresentadas as principais matérias-primas que compõem as estruturas em concreto armado, bem como são tecidas algumas considerações no que diz respeito a questões ambientais inerentes a elas.

#### 2.1.1 Aglomerante

Segundo a Associação Brasileira do Cimento Portland (2018), as mudanças climáticas já são uma realidade para o planeta e suas consequências fazem parte dos acontecimentos diários, como ameaças à infraestrutura das cidades, diminuição da produtividade nas lavouras e alterações nos oceanos. Dentro desse cenário, a indústria cimenteira brasileira vem adotando voluntariamente medidas para melhorar o desempenho de seus processos produtivos quanto à emissão de gases de efeito estufa, incluindo o acompanhamento e inventário de emissões, o

desenvolvimento de programas de eficiência energética, o uso de adições ao cimento e o uso de combustíveis alternativos.

Cabe ressaltar que o setor de cimento é o terceiro maior consumidor industrial de energia do mundo, responsável por 7% do uso de energia industrial; e o segundo emissor de CO<sub>2</sub> industrial, com cerca de 7% das emissões globais. Não obstante, o cimento é o principal ingrediente do concreto que é usado para construir casas, escolas, hospitais e infraestrutura, todos importantes para a qualidade de vida e o bem-estar social e econômico. Nesse contexto, com o aumento da população e do número de pessoas que se mudam para as cidades, a produção global de cimento deverá crescer de 12% a 23% até 2050 e, apesar das eficiências, as emissões diretas de carbono da indústria de cimento deverão aumentar, globalmente, em 4% até 2050 (WBCSD, 2018).

Conforme Mikulcic *et al.* (2016), a indústria de produção de cimento em todo o mundo é um dos maiores setores industriais emissores de CO<sub>2</sub>, sendo responsável por uma quantidade considerável de emissões globais de gases de efeito estufa. Devido à crescente consciência acerca do aquecimento global, a produção de cimento com maior eficiência energética é cada vez mais enfatizada e tem como uma das prioridades reduzir a demanda por energia e inovar o processo de produção para avançar para a geração mais limpa.

Nesse contexto, a partir do estudo das emissões de CO<sub>2</sub> no setor cimenteiro e da produção de concreto no Brasil, podem ser identificados os principais fatores que interferem nessas emissões e quantificados os potenciais de mitigação e de ações específicas, comparando-os entre si. Isso pode ser importante para mostrar o potencial de ações sobre a produção do concreto, pois o foco de ações de mitigação tem sido aplicado ao setor cimenteiro, havendo número limitado de pesquisas que tratam especificamente da mitigação por ações no segmento de concreto (LIMA, 2010).

Ainda, segundo Lima (2010), a produção de concreto apresenta vários fatores de aumento do consumo de cimento, como variabilidade nas condições de produção e perdas que aumentam as emissões associadas ao concreto. Contudo, sabe-se que uma parcela considerável desse aumento das emissões é evitável e, portanto, ações específicas na produção e aplicação do concreto em obras têm potencial considerável de redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

### 2.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo (areia), utilizado na produção do concreto, resulta da degradação das rochas por agentes naturais, “areia natural”, ou pela ação do homem com a utilização de processo mecânico de britagem das rochas, “areia de britagem”.

A NBR 9935 (ABNT, 2011) define os agregados miúdos como material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa e concreto. Assim, pode-se determinar como agregado miúdo os grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de 150 µm, atendidos os requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2009). Já o agregado natural define-se como material pétreo granular que pode ser utilizado tal e qual encontrado na natureza, podendo ser submetido à lavagem, classificação ou britagem.

Quando da utilização da areia natural, os impactos ambientais provocados pela sua extração podem ser mais extensivos, visto que a maior parte da produção é proveniente de leitos de rios, o que pode causar a degradação deles.

Segundo Souza (2012), através do disposto na Tabela 1, é possível perceber que as atividades de extração e beneficiamento de areia, além de ter uma maior demanda por recursos renováveis, são também responsáveis pelas maiores quantidades de emissões atmosféricas (44% cada uma). Verificou-se que 99,8% das emissões atmosféricas são oriundas do dióxido de carbono, o CO<sub>2</sub>, que, embora não afete diretamente a saúde humana, é um dos gases causadores do aquecimento global pela acentuação do efeito estufa.

Tabela 1 – Emissões atmosféricas totais nas etapas de ciclo de vida da areia.

Emissões Atmosféricas	Extração	Beneficiamento	Armazenagem	Transporte	Total
Kg.m <sup>-3</sup> de areia					
<b>C<sub>x</sub>H<sub>y</sub></b>	0,48E-04	0,48E-04	0,72E-05	0,28E-02	<b>0,29E-02</b>
<b>CO</b>	0,12E-02	0,12E-02	0,18E-03	0,23E-02	<b>0,49E-02</b>
<b>NO<sub>x</sub></b>	0,14E-02	0,14E-02	0,21E-03	1,04E-02	<b>0,13E-01</b>
<b>MP</b>	0,24E-03	0,24E-03	0,24E-03	0,81E-02	<b>0,48E-03</b>
<b>SO<sub>x</sub></b>	0,47E-03	0,47E-03	0,36E-04	0,17E-02	<b>0,26E-02</b>
<b>CH<sub>4</sub></b>	0,60E-05	0,60E-05	0,90E-06	0	<b>0,13E-04</b>
<b>N<sub>2</sub>O</b>	0,26E-04	0,26E-04	0,40E-05	0,88E-05	<b>0,65E-04</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	0,52E+01	0,52E+01	0,08E+01	0,06E+01	<b>11,8</b>
<b>Total</b>	<b>5,20</b>	<b>5,20</b>	<b>0,80</b>	<b>0,62</b>	<b>11,82</b>

Fonte: Adaptada de Souza (2012).

### 2.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo (brita), também utilizado na produção de concreto, é o produto resultante da diminuição artificial de uma rocha, comumente com o uso de britadores. Nesse contexto, pode-se destacar que a NBR 9935 (ABNT, 2011) define agregados graúdos como material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa e concreto. Manifesta-se como o material cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, atendidos os requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2005). Ainda, define-se agregado natural como material pétreo granular que pode ser utilizado tal e qual encontrado na natureza, podendo ser submetido à lavagem, à classificação ou à britagem.

Conforme Almeida *et al.* (2012), os agregados são matérias-primas minerais da maior importância para o desenvolvimento socioeconômico de um país e igualmente importante para a qualidade de vida da sociedade. O uso do termo agregado, em referência a essas matérias-primas minerais de uso corrente na construção civil, é atribuído ao fato de que são agregadas ao cimento para a obtenção do concreto, e ao betume (piche) para a preparação do asfalto.

De acordo com Bitar (1997), a mineração provoca um conjunto de efeitos não desejados que podem ser denominados de externalidades, por exemplo: alterações ambientais, conflitos de uso do solo, depreciação de imóveis circunvizinhos, geração de áreas degradadas e transtornos ao tráfego urbano. Essas externalidades geram conflitos com a comunidade, que normalmente têm origem quando da implantação do empreendimento, pois o empreendedor não se informa sobre as expectativas, anseios e preocupações da comunidade que vive nas proximidades da empresa de mineração. Além dessas externalidades, há, ainda, as emissões atmosféricas e o consumo de energia dos processos de extração, beneficiamento, armazenagem e transporte dos agregados graúdos até sua utilização.

Em sua pesquisa, Flower e Sanjayan (2007), com o objetivo de quantificar as emissões de CO<sub>2</sub> associadas à fabricação e execução de concreto através dos dados de inventário do ciclo de vida de duas pedreiras de agregado graúdo, uma pedreira de agregado miúdo, seis centrais de produção de concreto e várias outras fontes, indicaram que a segunda grande fonte de emissões de CO<sub>2</sub>, após o cimento Portland que contribuiu com 74% a 81%, foi o agregado graúdo, responsável por 13% a 20% das emissões de CO<sub>2</sub>, tendo a eletricidade contribuído com aproximadamente 80% desses valores do agregado graúdo. Também, destacam a detonação, a escavação e os transportes como outras contribuições.

#### 2.1.4 Aço

O aço, material utilizado na composição do concreto armado, é produzido pela indústria siderúrgica no Brasil, na qual o processo produtivo permite classificá-la em dois segmentos: usinas integradas e usinas semi-integradas. As usinas integradas são aquelas que produzem aço a partir do minério de ferro, usando o carvão (mineral ou vegetal) como agente redutor, nos altos fornos, para obtenção do ferro metálico, cabendo ressaltar que o carvão vegetal somente é usado em altos fornos de menor capacidade. Já as usinas semi-integradas não têm a etapa de redução e usam sucata de aço e ferro gusa para alimentar as aciarias elétricas. A rota semi-integrada reduz o consumo de recursos naturais não renováveis. No entanto, para que ocorra aumento expressivo da produção de aço por essa rota, é necessário haver maior geração de sucata de aço que, por sua vez, está condicionada ao aumento do consumo de produtos intensivos em aço, como automóveis, geladeiras, fogões, expansão das obras de infraestrutura e de construção civil.

Segundo o Instituto Aço Brasil (2016), a implementação de medidas de mitigação de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) é, atualmente, um dos maiores desafios do setor industrial. Dessa maneira, as empresas associadas ao instituto estão trabalhando para conhecer e reduzir a pegada de carbono relacionada à produção e ao uso do aço. Entre as medidas implantadas, destacam-se a realização de inventários de emissão de GEE, o desenvolvimento de estudos para otimizar a eficiência energética dos processos de produção e a reciclagem do aço e dos coprodutos. Em consonância, existem algumas metodologias para o cálculo das emissões de GEE das empresas, entre as quais: (1) metodologia “Worldsteel CO<sub>2</sub> Data Collection” (WSA), utilizada pelas usinas siderúrgicas para mensuração e comparação intersetorial e (2) metodologia do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), mais genérica e usualmente empregada pelos governos dos países na mensuração de suas emissões.

Na compilação de dados para fins do inventário das emissões de GEE do setor, o Instituto Aço Brasil passou a utilizar essas duas metodologias, sendo que a metodologia do IPCC é utilizada para envio dos dados da indústria do aço ao Governo Federal, para compor o inventário nacional de emissões. Cabe ressaltar que cada uma dessas metodologias considera insumos, teores de carbono e fatores de emissão distintos, produzindo, conseqüentemente, diferenças nos resultados das emissões.

A Tabela 2 apresenta as emissões absolutas e específicas de GEE em 2017, de acordo com as duas metodologias.

Tabela 2 - Emissões de gases efeito estufa do aço no Brasil.

EMISSÕES	WSA (2015)	IPCC (2015)
Absoluta (10 <sup>3</sup> t CO <sub>2</sub> )	65.397	61.608
Específica (tCO <sub>2</sub> / t aço bruto)	1,9	1,8

Fonte: Adaptada do Relatório de Sustentabilidade da Indústria Brasileira do Aço (2018).

Já a Confederação Nacional da Indústria (2017) apresenta, como ações com potencial de redução das emissões de CO<sub>2</sub> no setor siderúrgico, as medidas de mitigação nos processos produtivos e de infraestrutura de baixo carbono (oportunidades externas às plantas industriais). As medidas de mitigação de GEE nos processos produtivos podem ser resultantes da melhoria na eficiência energética, no controle operacional, na substituição da matéria-prima utilizada, assim como na alteração de processos. Já a infraestrutura de baixo carbono apresenta como ações a integração modal, a instalação de clusters eco-industriais que permitem maximizar o uso de recursos naturais, e a utilização da escória de forno na substituição ao clínquer.

#### 2.1.5 Formas

De acordo com a NBR 15696 (ABNT, 2009), intitulada Formas e escoramentos para estruturas de concreto – Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos, as formas são estruturas provisórias que servem para moldar o concreto fresco, resistindo a todas as ações provenientes das cargas variáveis resultantes das pressões do lançamento do concreto fresco até que ele se torne autoportante.

Antigamente, a forma de madeira era a mais utilizada nos canteiros de obras, contudo, atualmente, existem formas metálicas, poliméricas e, ainda, de madeira. Na região de estudo, verifica-se a utilização de formas tanto de madeira de pinus e compensado como também metálicas. Já os escoramentos são normalmente em madeira de eucalipto ou metálicos.

Segundo Oliveira (2007), visto que no Brasil não é verificada a disponibilidade de madeira certificada para a construção civil, considera-se que não existem muitos dados em relação às fases de produção e extração da madeira para formas e cimbramento. O único fator disponível que pode ser levado em consideração é o transporte da madeira até o local da confecção das formas e o impacto que isso causa ao meio ambiente.

Com base no consumo médio estimado de madeira serrada para a última década, do Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa, referente a dados de 2005, a participação da atividade madeireira no Brasil pode ser estimada entre 3,5% e 13,1%, o que justifica a

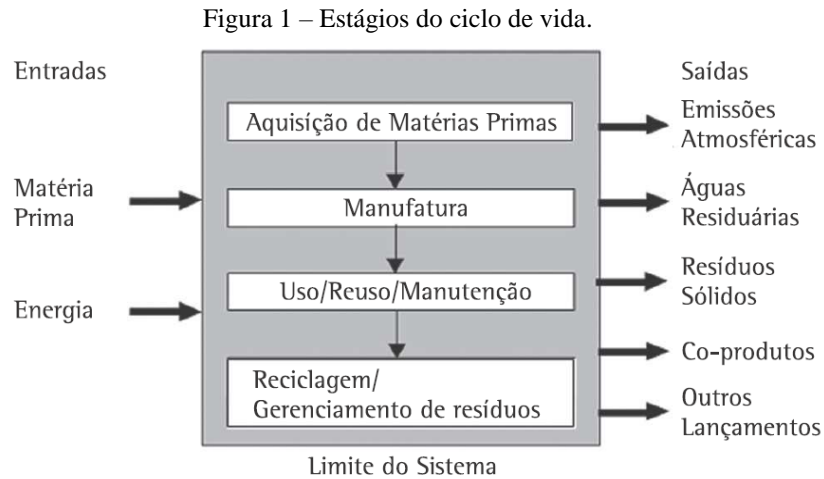
proposição de ações de mitigação. Nessa perspectiva, várias são as oportunidades de mitigação, como extração com técnicas de baixo impacto; aproveitamento dos resíduos como fonte de energia ou como matéria-prima para outros produtos de madeira; substituição de fonte energética, como uso de eletricidade; transporte da madeira em curtas distâncias; emprego de transportes com menor fator de emissão, como hidrovias; utilização de equipamentos e veículos eficientes em todas as atividades (CAMPOS, 2012).

## 2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

Visando minimizar os danos produzidos ao meio ambiente e à saúde humana, diversas metodologias vêm sendo empregadas no estudo dos impactos ambientais das edificações, dentre elas a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a qual consiste em um método que permite a realização de um estudo detalhado de todas as fases da vida da edificação, incluindo a extração das matérias-primas, a produção dos materiais, a construção, o uso e manutenção e o fim de vida (VIEIRA; CALMON; COELHO, 2016).

Para mais, é a ferramenta utilizada para analisar o impacto ambiental do produto e a tomada de decisões baseada na ecoeficiência, e integra o conjunto de normas ISO 14000 – normas entre 14040 e 14049. Também, apesar de a ACV possuir deficiências, é um instrumento adequado para a análise dos impactos ambientais associados a qualquer produto, inclusive materiais da construção civil (ISAIA, 2007).

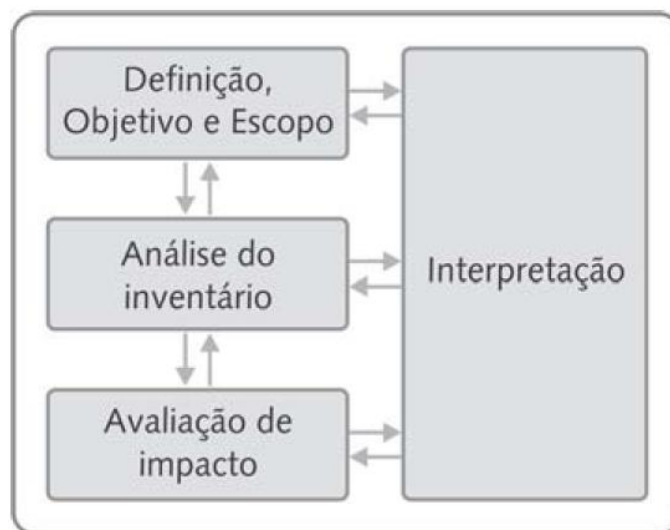
Segundo Willers, Rodrigues e Silva (2013), a ACV é padronizada pela *International Organization for Standardization* (ISO), que elaborou a ISO 14040 sobre a Avaliação do Ciclo de Vida, publicada no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Conforme a ISO 14040 (2009), a ACV é a compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (Figura 1).



Fonte: Willers *et al.* (2013 apud EPA e SETAC, 2006).

Segundo a ISO 14040, a metodologia de ACV é dividida em fases, sendo elas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação do impacto e interpretação de resultados, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).



Fonte: Adaptada da ABNT NBR ISO 14040 (2009).

A definição de objetivo e escopo deve declarar a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo, bem como dizer se existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente. Ainda, deve ser suficientemente bem definida para assegurar que a abrangência, a profundidade e o detalhamento do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender o objetivo declarado.



Por sua vez, a análise de inventário envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto. Este consiste em um balanço de energia e massa que configura o Inventário de Ciclo de Vida (ICV), cuja análise avalia os efeitos ambientais do sistema.

Já a avaliação de impactos é dirigida à avaliação da significância dos impactos ambientais potenciais, usando os resultados da análise de ICV. Em geral, esse processo envolve a associação de dados do inventário com impactos ambientais específicos e a tentativa de compreendê-los. Questões como escolha, modelagem e avaliação de categorias de impacto podem introduzir subjetividades na fase de avaliação de impacto do ciclo de vida.

E, por fim, a interpretação de resultados representa a fase em que as constatações da análise do inventário e da avaliação de impacto – ou, no caso de estudos de (ICV), somente os resultados da análise de inventário – são combinadas, de forma consistente, com o objetivo e o escopo definidos, visando alcançar conclusões e recomendações.

Salienta-se que as áreas de atuação para a ACV são inúmeras. Segundo a ISO 14040, algumas delas são: avaliação de risco, avaliação de desempenho ambiental, auditoria ambiental e avaliação de impacto ambiental, contabilidade da gestão ambiental, gestão de produtos e gestão da cadeia de fornecedores.

Já é possível perceber a estruturação e organização envolvendo o tema ACV no Brasil. O país oferece um vasto campo de oportunidades para a aplicação da metodologia, seja em setores da indústria e agroindústria, seja na área acadêmica, cujos objetivos estão voltados para o desenvolvimento de estudos e pesquisas que pretendem solucionar problemas na área ambiental, com possibilidade de aplicação dos resultados nos setores produtivos citados (WILLERS; RODRIGUES; SILVA, 2013).

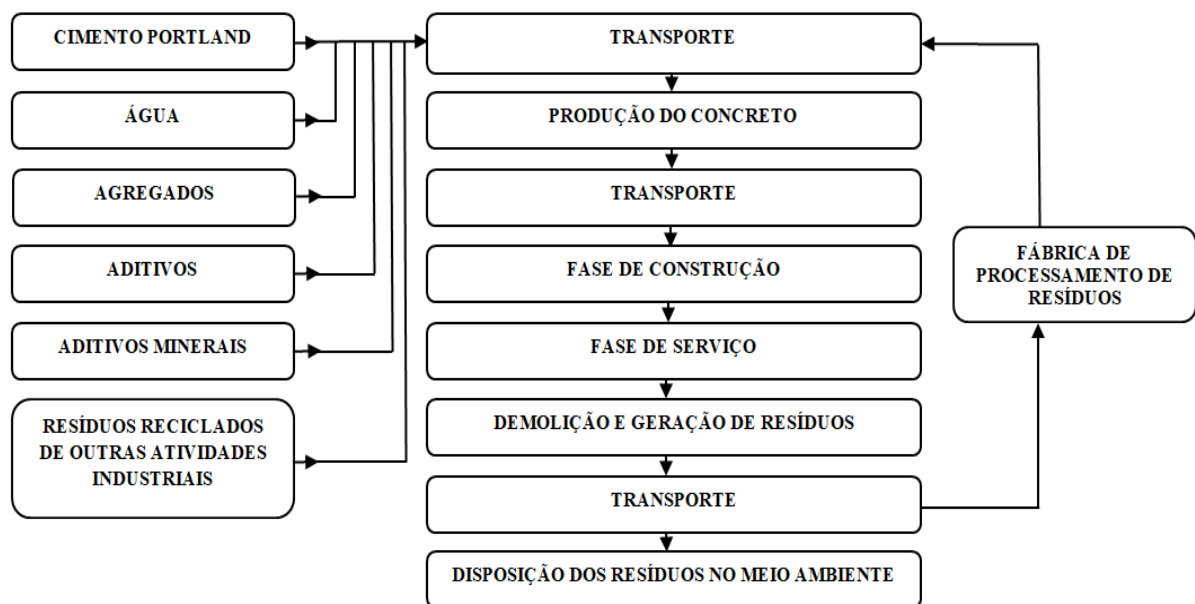
Para Silva (2013), ao realizar-se um estudo de ACV, verificam-se diversas limitações associadas à metodologia adotada. Dentre elas, o autor cita a falta de clareza em determinados estudos, tendo em vista as etapas do processo produtivo considerado, como a adoção de fatores de emissões internacionais, prática que pode prejudicar a segurança dos resultados, já que as matrizes energéticas dos países podem apresentar diferenças nas conversões de unidades de fatores de emissão para adequação à unidade funcional de trabalho, promovendo um pequeno grau de incerteza de alguns resultados.

Nessa perspectiva, Macedo (2011) questiona como utilizar a ACV em sistemas construtivos no Brasil, um país que não possui inventários de materiais de construção. Além disso, é importante dizer que a ACV tem origem na indústria de produtos de uso imediato e, por isso, é uma ferramenta adequada a eles. Contudo, os edifícios, produtos da construção civil

e da arquitetura, possuem etapas de ciclo de vida e características específicas que perpassam pelas etapas da obra e longevidade do edifício. Também podem durar décadas, o que dificulta a previsão de impactos ambientais ao longo desse processo, além da dificuldade em prever a vida útil. Para mais, a execução da obra é um segundo processo de produção, diferente do que ocorre nos produtos manufaturados de uso imediato e traz consigo a agregação de múltiplos sistemas em um produto único, o que dificulta as análises em ACV. Afinal, cada produto que compõe o edifício tem suas cargas ambientais provenientes do seu processo de fabricação e passa por uma nova transformação ao ser incorporado ao sistema construtivo.

Em síntese, a ACV é uma metodologia utilizada para avaliar o impacto ambiental e os recursos utilizados ao longo do ciclo de vida de um produto, ou seja, o gerenciamento do impacto ambiental é abordado a partir do momento em que a matéria-prima é extraída para as fases de produção, uso, demolição e reciclagem. No contexto da produção sustentável na construção civil, os produtos devem ser concebidos para que, no início do ciclo de vida, eles contenham resíduos reciclados como matéria-prima e, no final de seu ciclo de vida, possam ser novamente reciclados e reutilizados para se tornarem materiais em outros sistemas de produção. A Figura 3 resume o ciclo de vida do concreto apresentado no estudo de Vieira, Calmon e Coelho (2016), com as fases que constituem sua cadeia produtiva.

Figura 3 – Ciclo de vida do concreto.



Fonte: Adaptada de Vieira, Calmon e Coelho (2016).

### 2.3 SOFTWARES DE ANÁLISE DO CICLO DE VIDA - ACV

Existem diversos softwares que realizam a Avaliação do Ciclo de Vida, mas os bancos de dados que esses programas utilizam normalmente possuem caráter regional, podendo afetar os resultados se utilizados para regiões diferentes daquelas dos levantamentos do banco de dados. Dentre os softwares existentes, destacam-se as características de alguns na sequência.

O software BEES (*Building for Environmental and Economic Sustainability*), desenvolvido pelo Laboratório de Engenharia do NIST (*National Institute for Standards and Technology*), dos Estados Unidos, é uma ferramenta baseada em padrões de consenso e projetada para ser prática, flexível e transparente, destinada a designers, construtores e fabricantes de produtos. Ela inclui dados reais de desempenho ambiental e econômico para 230 produtos de construção americanos. E mede o desempenho ambiental dos produtos de construção usando a abordagem de Avaliação do Ciclo de Vida especificada na série de normas ISO 14040. Todas as etapas da vida de um produto são analisadas: aquisição de matéria-prima, fabricação, transporte, instalação, uso, reciclagem e gerenciamento de resíduos. Já o desempenho econômico é medido usando o método de custo de ciclo de vida padrão ASTM, que cobre os custos de investimento inicial, substituição, operação, manutenção e reparo e descarte (NIST, 2018).

Por sua vez, o *GaBi Software System and Databases*, desenvolvido pelo *PE Europe GmbH* e *IKP University of Stuttgart*, é utilizado para realizar a avaliação de aspectos ambientais, sociais, econômicos, processos e tecnologias associados ao ciclo de vida de um produto, sistema ou serviço. Possui o banco de dados GaBi, além do banco de dados do Ecoinvent e LCI. É a solução de sustentabilidade de produtos através da Avaliação do Ciclo de Vida como: desenvolvimento de produtos que atendem aos regulamentos ambientais; redução de material, energia e uso de recursos da maneira mais econômica; desenvolvimento de produtos com menores pegadas ambientais, como menos emissões de GEE, redução do consumo de água e desperdício (GaBi, 2018).

Já o Umberto LCA+ foi desenvolvido pelo *Institute for Environmental Informatics*, de Hamburgo, Alemanha. É um software de análise de ciclo de vida com a análise de custo integrada mais abrangente (incluindo o Custeio do Ciclo de Vida). Isso permite criar diferentes cenários em termos de desenvolvimento de tecnologia, jurídico, mercado, preço e demanda com relação ao custo e aos critérios ambientais. Assim, é utilizado para visualizar fluxogramas de materiais e energia de tal forma que possibilite otimizar processos produtivos, reduzindo

recursos de materiais e de energia. Para criar uma avaliação completa do ciclo de vida, o Ecoinvent e todos os bancos de dados de ACV do GaBi podem ser usados como dados de segundo plano (Umberto, 2018).

E, finalmente, o SimaPro – utilizado neste estudo – desenvolvido por *PRé Consultants*, possui vários métodos de avaliação de impacto (CML 1992, Eco-indicator 99, EPS2000, entre outros) e banco de dados (BUWAL 250, Ecoinvent, IVAM LCA Data, entre outros) que podem ser editados e ampliados sem limitação. O SimaPro é o mais utilizado para a análise ambiental dos produtos visando a tomada de decisão conforme o desenvolvimento de produtos e sua política. É uma ferramenta para coletar, analisar e monitorar os dados de desempenho de sustentabilidade dos produtos e serviços. O software pode ser usado para uma variedade de aplicações, como relatórios de sustentabilidade, carbono e pegada hídrica, design de produtos, geração de declarações ambientais de produtos e determinação de indicadores-chave de desempenho (SimaPro, 2018).

A caracterização do potencial de impacto ambiental a partir do SimaPro, no nível médio (*midpoint*), apresenta 18 indicadores, descritos na sequência:

- a) aquecimento global, fator de caracterização das mudanças climáticas, resultante do aumento da capacidade de retenção de radiação infravermelha na estratosfera, gerada pelo aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, aerossóis e outros gases provenientes de emissões atmosféricas, provocando potencial aumento da temperatura média em relação ao efeito de 1 kg de CO<sub>2</sub>;
- b) depleção de ozônio, categoria de impacto que resulta no aumento da quantidade de raios ultravioleta que atingem a superfície da terra, provocado pelo acréscimo da concentração de certos gases na camada da ozonfera advindos de emissões atmosféricas geradas por ações humanas. A redução da camada de ozônio pode resultar no crescimento de doenças, interferências com o ecossistema e danos em diversos tipos de materiais, tendo a medida em relação ao efeito de 1 kg de CFC-11;
- c) radiação ionizante, sendo o fator de caracterização da radiação ionizante a medida do nível de exposição para a população global, sendo a unidade yr / kBq Cobalto-60;
- d) formação de ozônio, saúde humana, categoria de impacto que resulta no aumento da concentração de ozônio na camada mais baixa da atmosfera, sendo o fator de caracterização determinado pela mudança na taxa de ingestão de ozônio devido a mudanças na emissão de precursores óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos

- voláteis não metânicos (NO<sub>x</sub> e NMVOC). A unidade de potencial de formação de ozônio para a saúde humana é equivalente a kg de NO<sub>x</sub>;
- e) formação de material particulado fino, sendo o fator de caracterização da formação a fração de consumo de material particulado com diâmetro menor do que 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>), tendo como unidade kg PM<sub>2,5</sub> equivalentes;
  - f) formação de ozônio, ecossistemas terrestres, determinado pela mudança da taxa de ingestão de ozônio devido a mudanças na emissão de precursores (NO<sub>x</sub> e NMVOC), tendo como unidade de potencial de formação de ozônio do ecossistema yr / kg equivalente de NO<sub>x</sub>;
  - g) acidificação terrestre, sendo o fator de caracterização o potencial de acidificação derivado do fator de destino médio ponderado mundial de enxofre (SO<sub>2</sub>), medido em relação ao efeito de 1 kg de SO<sub>2</sub>;
  - h) eutrofização de água doce, consiste no déficit de oxigênio na água e tem o fator de caracterização responsável pela persistência ambiental (destino) das emissões do fósforo (P) contendo nutrientes. A unidade é yr / kg P para equivalente de água doce;
  - i) eutrofização marinha, consiste no déficit de oxigênio na água e o fator de caracterização é responsável pela persistência ambiental (destino) das emissões de nitrogênio (N) contendo nutrientes, sendo a unidade yr / kg N para equivalentes marítimos;
  - j) ecotoxicidade terrestre, categoria de impacto ambiental relacionada ao potencial de ecotoxicidade terrestre, resultado do aumento da concentração de agentes tóxicos na terra provocado pela disposição de rejeitos, trazendo danos ao ecossistema. Apresenta como unidade 1 kg 1,4-diclorobenzeno (1,4-DCB) emitido;
  - k) ecotoxicidade de água doce, categoria de impacto ambiental relacionada ao potencial de ecotoxicidade de água doce, resultado do aumento da concentração de agentes tóxicos na água doce provocado pela disposição de rejeitos, implicando danos ao ecossistema. Apresenta como unidade 1 kg 1,4-diclorobenzeno (1,4-DCB) emitido;
  - l) ecotoxicidade marinha, categoria de impacto ambiental relacionada ao potencial de ecotoxicidade marinha, resultado do aumento da concentração de agentes tóxicos na água marinha provocado pela disposição de rejeitos, o que corrobora

danos ao ecossistema. Apresenta como unidade 1 kg 1,4-diclorobenzeno (1,4-DCB) emitido;

- m) toxicidade carcinogênica e não carcinogênica humana, é a categoria de impacto ambiental que resulta do aumento da concentração de agentes tóxicos provocados pela disposição de rejeitos, com consequência diretas a danos à saúde humana. Apresenta como unidade 1 kg 1,4-diclorobenzeno (1,4-DCB) emitido;
- n) uso da terra, categoria que relata a depreciação da qualidade do solo para a produção de alimentos, indicando a quantidade de solo transformado ou ocupado por certo tempo, tendo como unidade  $m^2/\text{ano}$ ;
- o) escassez de recursos minerais, impacto ambiental que apresenta o esgotamento de recursos naturais provocado pela utilização dos seres humanos, representado pelo aumento no custo de extração, tendo a unidade kg de cobre (Cu) equivalentes;
- p) escassez de recursos fósseis, apresenta o esgotamento de recursos naturais provocado pela utilização dos seres humanos, representado pelo aumento do custo de extração de combustível fóssil, baseado no maior valor de aquecimento, tendo como unidade kg equivalente de óleo (Oil);
- q) consumo de água, apresenta o impacto ambiental com fator para o uso de água, relatando a quantidade de consumo de água doce, com unidade de água em  $m^3$  consumida.

A seu turno, a caracterização do potencial de impacto ambiental a partir do SimaPro, para o nível final (*endpoint*), combina uma série de indicadores em uma categoria de danos, gerando três categorias com parâmetros finais, apresentadas na sequência:

- a) danos para a saúde humana, o qual expressa o número de anos de vida perdidos e o número de anos vividos com deficiência, sendo os dois combinados como anos de vida ajustado por incapacidade (*disability adjusted life years – DALYs*);
- b) danos aos ecossistemas, indicando a perda de espécies sobre uma determinada área e durante um certo tempo, sendo a unidade espécies por ano (*espécies.yr*);
- c) escassez de recursos, que é expressa em custos excedentes da futura produção de recursos ao longo de um período infinito, considerando uma taxa de desconto de 3%, sendo a unidade USD2013.

## 2.4 OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO VISANDO A MINIMIZAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL

Sabe-se que otimizar consiste em buscar racionalmente o melhor dentre os valores possíveis para dadas variáveis, em função de um determinado objetivo e das limitações existentes. De acordo com Togan (2012), a otimização pode ser definida como encontrar a solução de problemas em que é necessário maximizar ou minimizar uma função real dentro de um domínio que contém os valores aceitáveis de variáveis enquanto algumas restrições devem ser satisfeitas. Portanto, o objetivo dos métodos de projeto estrutural ótimos é minimizar o tamanho dos elementos estruturais, considerando as capacidades de carga a fim de diminuir o custo total, reduzindo o material necessário para a execução da estrutura.

Dentre as aplicações da otimização, exemplifica-se a busca de redução de peso ou custo de uma estrutura; o aumento de eficiência de elementos estruturais; a redução de perdas no processo; a determinação da melhor rota para o transporte de passageiros ou cargas; a determinação da melhor mistura de componentes, buscando melhor custo ou maior eficiência; o aumento da produtividade em processos de fabricação; o aumento da eficiência na alocação de recursos entre outros.

No caso de otimização estrutural, busca-se de forma geral, a minimização dos custos para uma estrutura que satisfaça os princípios básicos de segurança, respeitando os Estados Limites Últimos e de Serviço, bem como as demais imposições de normas técnicas.

Um problema de otimização pode, de forma geral, ser assim descrito:

Minimizar ou maximizar:

$$f(x_i), \text{ sendo } i = 1, n \quad (1)$$

Sujeito a:

$$g_j(x_i) \leq 0, \text{ sendo } j = 1, m \quad (2)$$

$$h_k(x_i) = 0, \text{ sendo } k = 1, l \quad (3)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad (4)$$

Na Equação (1) o  $f(x)$  representa a função objetivo que se deseja maximizar ou minimizar, a qual, normalmente, está relacionada a alguma quantidade numérica (medida quantitativa do desempenho do sistema analisado). É uma função de  $x$ , sendo  $x$  o vetor das variáveis do problema. São elementos ou fatores que influenciam no valor final da função a ser otimizada.

Já as relações expostas nas equações (2) e (3) são chamadas, respectivamente, de restrições de desigualdade e restrições de igualdade. E a Equação (4) representa as restrições laterais, com limites inferior e superior do espaço de busca viável.

Vale frisar que o interesse pela área de pesquisa em otimização de estruturas de concreto armado teve início na década de 1950, com destaque ao trabalho de J. Heyman, que utilizou programação linear para otimizar estruturas no regime plástico. Posteriormente, na década de 1960, pode-se ressaltar o trabalho de L. A Schimit, que utilizou técnicas de programação não linear em otimização de projetos estruturais. No entanto, foi na década de 1970 que diversos trabalhos relevantes foram desenvolvidos, tornando-se os principais responsáveis pela difusão dos processos de otimização pela comunidade mundial (BASTOS, 2004).

## 2.5 ESTUDOS ACERCA DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO

Para uma melhor compreensão do tema em estudo, algumas pesquisas que contemplam diversas comparações com vários elementos estruturais em concreto armado são apresentadas na sequência. De maneira sucinta, e cronologicamente, a metodologia utilizada, as fases estudadas e as constatações e conclusões dos estudos são verificadas.

Paya-Zaforteza *et al.* (2008) empregaram a otimização multiobjetivo para o estudo de distintos objetivos, incluindo o custo *versus* construtibilidade, custo *versus* segurança global, e custo *versus* sustentabilidade, tais como o consumo de energia ou as emissões de CO<sub>2</sub>. A metodologia foi aplicada a um pórtico simétrico, verificando a estrutura para cargas verticais e horizontais. Como os objetivos são muitos e estão em conflito, não houve uma solução única, mas sim um conjunto de soluções. Verificou-se, em uma análise do estudo, que, quando melhora-se, por exemplo, o custo ambiental e a construtibilidade por diminuir o número de barras utilizadas, aumenta-se o custo em 5,7%. Já uma segunda análise obteve um custo ambiental ainda melhor que o da anterior, mas a construtibilidade ficou prejudicada pelo



aumento do número de barras. Uma terceira análise apresentou o melhor custo ambiental e de construtibilidade, mas o custo aumentou em 10,7%. A otimização multiobjetivo utilizada provou ser uma boa ferramenta, bem como um algoritmo eficiente e robusto para fornecer um conjunto de soluções relevantes, em que, no final, o engenheiro deverá escolher uma solução que tenha bom desempenho para todos os objetivos. Das soluções apresentadas, os autores consideraram que essas análises forneceram soluções para estruturas mais sustentáveis, construtivas e mais seguras, a um custo aceitável e com tempos de computação razoáveis.

Em outra pesquisa, Paya-Zaforteza *et al.* (2009) buscaram descrever uma metodologia para projetar estruturas de concreto armado com base em emissões mínimas de CO<sub>2</sub> incorporadas, envolvendo a otimização aplicada a duas funções-objetivo: emissões de CO<sub>2</sub> incorporadas e o custo econômico das estruturas. A avaliação seguiu as normas espanholas de dimensionamento em concreto armado e a metodologia foi aplicada a seis estruturas típicas de até oito andares. Os resultados obtidos indicaram que os dois objetivos parecem estar altamente relacionados, uma vez que as melhores soluções de emissões de CO<sub>2</sub> são apenas, no máximo, 2,77% mais caras do que as melhores soluções de custo. Alternativamente, as soluções aproximadas de melhor custo pioram as emissões de CO<sub>2</sub> em 3,8%. Portanto, os autores finalizam indicando que a análise realizada forneceu soluções para a obtenção de estruturas mais sustentáveis a um custo admissível e com tempos de processamento razoáveis.

Habert e Roussel (2009), em seu estudo, consideraram e avaliaram duas opções ambientais diferentes para misturas de concreto sustentável. A primeira foi a substituição do clínquer por adições minerais no cimento, a fim de reduzir o custo ambiental do material para um determinado volume de concreto produzido. A segunda opção foi a redução do volume de concreto necessário para um determinado processo de construção, aumentando a resistência dos concretos. À vista disso, estimaram que, na França, as emissões de CO<sub>2</sub> poderiam ser reduzidas em 15%, aumentando o nível de substituição no cimento do concreto. Também, foi estimado que a segunda opção poderia levar à redução das emissões da ordem de 30%. Todavia, deve-se ter em mente que é possível combinar a substituição do cimento e aumentar a resistência mecânica. A partir dos resultados e a observação da prática francesa, isso poderia levar à redução de emissões de CO<sub>2</sub> da ordem de 40% (15% para substituição no cimento e 30% para aumento da resistência característica). É o montante que poderia ser alcançado em uma perspectiva em médio prazo com o nível real de conhecimento na indústria de concreto.

Yeo e Gabbai (2011) buscaram otimizar uma viga de concreto armado levando em conta toda a energia consumida pelo concreto e pelo aço durante seus ciclos de vida. Logo, foi feita a otimização do custo monetário e, posteriormente, a minimização do consumo de energia de

fabricação da viga. Observando os resultados obtidos, os pesquisadores verificaram que, na viga em que houve a otimização do consumo de energia, o valor de seu custo econômico final teria o aumento de cerca de 5% em relação à viga em que se otimizou o custo monetário. No entanto, em relação ao consumo de energia, descobriu-se que a redução, em relação à viga que foi otimizada pelo custo monetário, seria da ordem de 10%, demonstrando que, para reduzir em 10% o consumo de energia, haveria um acréscimo de 5% no custo da viga.

Por sua vez, Yepes *et al.* (2012) apresentaram uma abordagem para uma metodologia de projeto de muros de contenção de concreto armado para construção de estradas. Usaram um método híbrido de otimização de múltiplos estágios, aplicado a duas funções-objetivo: emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) embutidas e custo econômico dos muros de contenção de concreto armado em diferentes estágios de produção, transporte e execução. A análise revelou que as emissões de CO<sub>2</sub> e os custos estão intimamente relacionados porque as melhores soluções ambientais custam, no máximo, apenas 1,28% a mais do que as melhores soluções de custo. Alternativamente, as melhores soluções de custo aumentam as emissões de CO<sub>2</sub> em apenas 1,12%. Assim, as soluções aceitáveis em termos de emissões de CO<sub>2</sub> também são viáveis em termos de custo e vice-versa. Esses resultados apresentam concordância com os estudos do grupo de pesquisa de Paya-Zaforteza *et al.* (2009).

Medeiros (2012) efetuou a otimização dos custos monetários e ambientais de seções de pilares retangulares de concreto armado submetidos à flexocompressão reta, utilizando o método de otimização da Busca Harmônica. Nos exemplos que visaram a otimização de custos monetários das seções de concreto, de forma geral, o método da Busca Harmônica obteve soluções melhores, ou pelo menos iguais, aos resultados alcançados por dimensionamento convencional, programação matemática, Algoritmos Genéticos e Recozimento Simulado. Já para custos ambientais, concluiu-se que a otimização de custos monetários se relaciona diretamente com a redução de custos ambientais, tendo em vista que, à medida que os diferentes métodos de otimização foram propondo melhores soluções monetárias, esses resultados também se mostraram mais vantajosos em termos ambientais. Por meio de outras duas aplicações numéricas desenvolvidas envolvendo custos ambientais, também se verificou que as soluções ótimas em custos monetários apresentam desempenho ambiental muito satisfatório, pouco se distanciando, para a maioria dos custos ambientais verificados (Potencial de Aquecimento Global – GWP, emissão de CO<sub>2</sub> e consumo de energia), da melhor solução ambiental.

Já Park, Tae e Kim (2012) propõem um método para avaliar as emissões de CO<sub>2</sub> usando a resistência à compressão do concreto e a estação do ano. Especificamente, as resistências à

compressão de várias misturas de concreto que são empregadas em canteiros de obras na Coreia foram utilizadas para avaliar as emissões de CO<sub>2</sub>. Foram feitas também comparações de acordo com as características de cada mistura, e concluiu-se que a emissão de CO<sub>2</sub> do ciclo de vida do concreto aumentou linearmente à medida que a resistência à compressão do concreto aumentou, apresentando-se cerca de 48% maior a 35 MPa do que a 21 MPa. Com resistências à compressão idênticas, o concreto produzido no inverno apresentou um aumento de aproximadamente 5% nas emissões de CO<sub>2</sub> quando comparado ao concreto produzido em uma estação padrão. A quantidade de CO<sub>2</sub> emitida pelo concreto com aditivos foi inferior em 47%, o que representa uma redução significativa quando comparada com a do concreto sem adição.

Peinado *et al.* (2013) avaliaram os impactos econômico e ambiental de diferentes resistências do concreto, dimensionando pilares e calculando seus custos de execução para carregamento padrão de 1000 KN, altura de 3,2 metros e seção transversal quadrada. As resistências variaram de 20 a 50 MPa, e foram verificados os consumos de cimento e suas emissões de CO<sub>2</sub>, assim como os custos incorporados em cada pilar. A partir dos resultados, nas condições apresentadas no estudo, verificaram que o custo do concreto e das formas para os pilares em estudo decresce com o aumento da resistência do concreto, como esperado. Já o aço comportou-se diferente, tendo uma pequena diminuição do consumo do aço até a resistência de 40 MPa, e para as resistências de 45 e 50 MPa houve um acréscimo no consumo de aço pelo fato de os pilares serem medianamente esbeltos. Em relação à questão ambiental, a partir da análise do consumo de cimento e a diminuição do volume de concreto pelo aumento da resistência, os valores de emissões de CO<sub>2</sub> são menores nas resistências maiores, mas, quando acrescidas as emissões do aço, os menores valores ficam com a resistência de 40 MPa. Por fim, relataram que, além das maiores resistências apresentarem melhores resultados, geram pilares com mais durabilidade e mais esbeltos, o que culmina no aproveitamento dos espaços nos projetos.

A seu turno, Park *et al.* (2013) realizaram um estudo propondo um método de dimensionamento para pilares compostos de concreto armado e perfis metálicos em edifícios altos, no caso estudado, 35 andares, utilizando um algoritmo para reduzir o custo e as emissões de CO<sub>2</sub> dos materiais estruturais na fase de construção. Os resultados obtidos a partir da técnica proposta indicaram que o peso da seção de aço no melhor resultado foi reduzido em 39,14%, enquanto o peso do concreto foi aumentado em 7,23%. Os pesquisadores concluíram, assim, que reduzir a quantidade de aço e aumentar a quantidade de concreto pode ser uma maneira eficaz de reduzir os custos estruturais e as emissões de CO<sub>2</sub> dos pilares estudados. Na obtenção da estrutura ideal, foi considerado o uso de materiais de alta resistência (concreto e aço) em

relação ao projeto inicial, demonstrando que o uso desse tipo de material para pilares compostos também reduz as emissões de CO<sub>2</sub>. Então, mesmo que os custos iniciais e as emissões sejam maiores que as dos materiais convencionais, os resultados de análises são melhores, porque os materiais de alta resistência demandam volumes menores para a confecção dos pilares se comparados com os materiais convencionais.

O foco do estudo de Collins (2013) foi a infraestrutura de concreto, particularmente a capacidade de o concreto reciclado reagir quimicamente com o CO<sub>2</sub> no ar, influenciando significativamente as estimativas de emissões. A definição de vida útil da estrutura em relação às emissões de CO<sub>2</sub> foi revista, apresentando, além da estrutura de primeira geração, que abrange o tempo desde o abastecimento das matérias-primas até a demolição, uma segunda construção que incorpora concreto reciclado da estrutura original. O autor relatou que, se a carbonatação for ignorada, as estimativas de emissões podem ser superestimadas em até 45%, dependendo da resistência do concreto que foi utilizado, bem como do tipo de aplicação de construção que incorpora o concreto reciclado durante a segunda geração. Considerando que a reciclagem de concreto é uma prática comum (por exemplo, na Austrália, ela representa 74% do concreto demolido), a aplicação de construção de segunda geração que segue a demolição do concreto original deve ser incluída nas estimativas de ciclo de vida das emissões de CO<sub>2</sub>.

Outro estudo de Park *et al.* (2014) apresentou diretrizes de projeto para redução de emissões de CO<sub>2</sub> ou custos associados a materiais estruturais na fase de projeto estrutural de pilares de concreto armado. As influências dos fatores de projeto sobre as emissões de CO<sub>2</sub> ou custos foram investigadas com base nos resultados de um estudo paramétrico. Se as resistências dos materiais estruturais forem fixas e as dimensões da seção de concreto e a área de aço forem variadas, as áreas de aço das seções com as emissões de CO<sub>2</sub> mais baixas estão próximas das áreas de aço máximas, exceto nos casos em que a área do concreto aumenta para satisfazer a restrição na relação de taxa de armadura máxima. Isso significa que o aumento da relação do aço dentro do intervalo permitido é uma abordagem eficiente para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>. As áreas de aço das seções transversais com os custos mais baixos estão próximas das áreas mínimas de aço, isso significa que a redução da relação de aço dentro do intervalo de permissão é uma abordagem eficiente para reduzir custos. Além disso, verificou-se que o aumento das resistências dos materiais estruturais utilizados é mais eficiente na redução tanto das emissões de CO<sub>2</sub> como dos custos do que o aumento das quantidades de materiais estruturais utilizados.

O estudo dos brasileiros Oliveira *et al.* (2014) relata que a maior parte das emissões do concreto origina-se na produção do cimento, assim, uma estratégia tradicional de minimização da pegada de CO<sub>2</sub> tem privilegiado o grau de substituição do clínquer. Os autores observaram

que, em relação ao controle de qualidade do processo produtivo do concreto, sendo desconhecido o desvio padrão específico de determinada obra ou dosadora de concreto, haverá aumento máximo de 13% no consumo total de cimento. Verificaram, também, que a variação do consumo de cimento relacionada ao processo de dosagem do concreto, nos números levantados, ainda que sobre dados de apenas uma central de concreto, demonstram potencial grandioso para melhoria da eficiência do uso dos ligantes. E, por fim, concluíram que, em termos gerais, não é apropriado fundamentar decisões acerca das emissões do concreto baseando-se apenas na resistência do concreto e no tipo de cimento utilizado, pois as variações são significativas.

Por sua vez, García-Segura, Yepes e Alcalá (2014) determinaram que a redução nas emissões de produção de cimentos misturados com cinzas volantes e escória de alto forno compensa a redução de sua durabilidade e de sua captura de CO<sub>2</sub> pela carbonatação. Para tanto, avaliaram um pilar de concreto armado durante a sua vida útil e após sua demolição e reutilização, tendo como material de enchimento o cascalho. Como resultados, os pesquisadores constataram que o concreto feito com cimento Portland, com mistura de 35% de cinzas volantes e 80% de escória de alto forno, capta 47%, 41% e 20% das emissões de CO<sub>2</sub>, respectivamente. Já a vida útil dos cimentos misturados, com 50% ou 80% de escória de alto forno e 35% de cinzas volantes, foi cerca de 10% menor. Em comparação ao cimento Portland, e apesar da redução da captura de CO<sub>2</sub> e da vida útil, o cimento com mistura de 80% de escória de alto forno emitiu 20% menos CO<sub>2</sub> por ano.

Em consonância, Yang *et al.* (2015) examinaram a eficácia dos materiais cimentícios complementares, como escória de alto forno, cinzas volantes e sílica ativa, na redução das emissões de CO<sub>2</sub> do cimento Portland utilizado na produção do concreto, através da montagem e análise de um abrangente banco de dados, incluindo 5.294 misturas de concreto de laboratório e 3.915 misturas de concreto em obras. Foram considerados intervalos de resistência à compressão de 8 a 170 MPa e níveis de substituições de 3% a 80% de escória de alto forno, 3% a 70% de cinzas volantes e 3% a 40% de sílica ativa. O estudo considerou o ciclo de vida coreano de berço ao portão do concreto, incluindo as matérias-primas, transportes e fases de produção do concreto. À vista disso, concluíram que a intensidade das emissões de CO<sub>2</sub> diminui gradualmente à medida que se aumenta (até 15% a 20%) a substituição do cimento Portland por materiais cimentícios complementares. Além desse valor, a taxa decrescente de emissões diminui.

Berndt (2015) utilizou os valores de emissões relativos à Austrália para comparar a influência do traço do concreto na execução de fundações das instalações de turbinas eólicas.

O estudo demonstrou que, quando estruturalmente viável, a utilização de resistências menores é vantajosa em relação a emissões de CO<sub>2</sub>, desde que outras propriedades, por exemplo, durabilidade, sejam adequadas às condições do local e à vida útil de projeto. Também dentro de uma mesma resistência, a utilização de 65% de escória em vez de 100% de cimento Portland dá uma maior redução nas emissões de CO<sub>2</sub>, sendo de 42,7% para 32 MPa e 44,8% para 40 MPa. O autor concluiu que a escolha do traço do concreto influencia a magnitude das emissões de CO<sub>2</sub>, podendo ser otimizado para manter a adequação estrutural e minimizar as emissões.

Bento (2016) avaliou a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no auxílio de tomada de decisões em projetos estruturais de concreto armado, visando a melhoria do desempenho ambiental a partir da análise durante a fase de projeto, da utilização de diferentes classes de resistências de concreto, por meio de alterações nas dimensões dos elementos estruturais, bem como do consumo dos materiais componentes da estrutura. A partir de um projeto estrutural de edifício com seis classes de resistência característica à compressão, de C25 a C50, verificou-se a impossibilidade de redução nas peças estruturais após a avaliação com a classe de resistência C45 em decorrência de limitações normativas e físicas. Os resultados demonstraram que as classes de resistência C40, C45 e C50 apresentaram os melhores resultados na grande maioria dos quesitos avaliados (acidificação, ecotoxicidade, aquecimento global, toxicidade humana, eutrofização, destruição do ozônio estratosférico, formação do ozônio fotoquímico, consumo de recursos energéticos não renováveis e renováveis, consumo de recursos materiais não renováveis e renováveis, e geração de resíduos) e, especificamente, a C40 se apresentou como a melhor opção para a unidade funcional avaliada. Também questões de custos locais foram analisadas, e a classe C40 apresentou o segundo melhor resultado entre as seis analisadas. A utilização da ACV se mostrou eficiente para a obtenção dos resultados, mas, por outro lado, a sua execução é complexa, pois demanda tempo e requer profissionais especializados nesse tipo de estudo para a utilização do software e demais conhecimentos específicos, além da falta de dados ou dados incompletos de inventários ainda disponíveis no Brasil. O estudo indicou, ainda, que uma variação dos resultados numéricos é logicamente possível por diferenças regionais, principalmente quanto às distâncias consideradas e diferenças nos materiais de formas de madeira e suas taxas de aproveitamento e tipos de cimentos analisados.

Indo mais além, Possan, Félix e Thomaz (2016) relatam que, durante o seu ciclo de vida, as estruturas de concreto são submetidas à carbonatação e podem absorver parte do CO<sub>2</sub> emitido durante a sua construção. Para analisar esse potencial, o estudo aplicou modelagem matemática para avaliar o desempenho da resistência à compressão de um concreto de 20, 30 e 40 Mpa,

produzido com diferentes tipos de cimentos, para períodos de 0 a 100 anos de idade. Os estudiosos observaram que o concreto, durante sua vida útil, pode absorver de 40 a 90% de CO<sub>2</sub> emitido no processo de fabricação. Em alguns casos, considerando a demolição da estrutura, sua absorção é de quase 100%. A porcentagem de absorção de carbono é realizada pelo concreto ao longo de sua vida útil (70 anos) e durante o período pós-demolição (até 30 anos). Com base nesses estudos, observou-se que a absorção de CO<sub>2</sub> é diretamente proporcional à área superficial de concreto exposta ao CO<sub>2</sub>, influenciada pelo tipo de cimento e resistência ao concreto. O balanço de emissões de CO<sub>2</sub> pode se tornar um indicador de sustentabilidade e, no futuro, pode ser considerado uma medida compensatória no projeto de estruturas de concreto.

Choi *et al.* (2016), por sua vez, verificaram a variabilidade das emissões de CO<sub>2</sub> na construção de edifícios com elementos estruturais compostos, concreto armado reforçado com perfil de aço, buscando mitigar os impactos ambientais da construção de edifícios. Para tanto, foi desenvolvido um modelo de minimização para pilares avaliando a eficácia dos projetos ótimos encontrados em vários casos de cargas à compressão e flexão e as influências das variações nas resistências dos materiais envolvidos, definindo as relações com as emissões de CO<sub>2</sub>. O melhor resultado obtido foi aplicado no projeto de um prédio alto, assim, concluiu-se que, para cargas menores, o aumento da área transversal de concreto é mais vantajoso para a redução de emissões de CO<sub>2</sub> e, para cargas maiores, o aumento da forma do perfil de aço produz uma solução mais sustentável na redução do impacto final. Em relação à resistência dos materiais envolvidos sob o efeito de altas cargas, verificou-se que o aumento nas resistências dos vergalhões e perfis de aço diminuem significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> e, também, são mais vantajosos em relação ao indicador proposto que representa a capacidade de utilização do espaço da coluna projetada.

Kim *et al.* (2016) relatam que a indústria da construção coreana é responsável por 40% do total das emissões de CO<sub>2</sub> no país e que é essencial reduzir essas quantidades. Em seu estudo, desenvolveram um sistema de otimização para minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> e maximizar a eficiência econômica do concreto na fase de berço ao portão, ou seja, da produção da matéria-prima até o ponto em que deixa as instalações de produção do fabricante. A fase das matérias-primas incluiu as emissões de CO<sub>2</sub> durante a produção dos componentes do concreto, cimento, agregados e água; a fase de transporte englobou as emissões de CO<sub>2</sub> decorrente do transporte das matérias-primas para a fábrica de concreto; e a fase de produção considerou as emissões de CO<sub>2</sub> causadas pela geração de eletricidade e uso de combustíveis fósseis na planta da fábrica. Realizando uma análise de caso em um projeto específico de estrutura de concreto na Coreia, utilizando o sistema de otimização, os resultados obtidos indicaram que, se selecionado o traço

do concreto e os fornecedores de matérias-primas com o objetivo de minimizar a emissão de CO<sub>2</sub> e o custo do concreto, obtém-se valores com uma redução de 34% na emissão de CO<sub>2</sub> e 1% nos custos em comparação aos obtidos pelos métodos convencionais.

Já Cabello *et al.* (2016) avaliaram os custos e as emissões de gases de efeito estufa (kg de CO<sub>2</sub>) gerados durante o processo de construção de uma estrutura de concreto armado designada para uso residencial. O tipo de estrutura de piso selecionada foi laje plana, que incorpora permanentemente dois materiais na estrutura: aço e concreto. Três estudos de caso foram utilizados para comparar diferentes espaçamentos entre as colunas, e, tendo o edifício sete andares e uma altura de 21 metros, estudou-se o quarto andar. A modelagem do impacto foi realizada pelo software SimaPro e pelo banco de dados Ecoinvent 2.0, incorporando as características comuns para o setor de construção na Espanha. Quanto aos impactos gerados em relação ao aço, indicam que lajes com 5 m de vão representam 45,52% das emissões, já lajes com 7 m de vão representam 53,49%. O concreto, por outro lado, sofre o processo inverso, pois representa 52,71% de impacto para 5 m de vão e 45,26% para 7 m de vão. Ao se avaliarem as dimensões de cada estrutura estudada e considerando a laje com vão de 5 m x 5 m um valor ótimo, observou-se que, para as emissões de CO<sub>2</sub>, há um aumento de 3,78% para o vão de 6 m e de 12,72% para o vão de 7m. E concluem que, a fim de reduzir o impacto ambiental criado por uma estrutura, o foco deve ser na primeira fase do estudo, ou seja, produção das matérias-primas, transporte e produção do concreto.

D'Alessandro *et al.* (2017) analisaram as contribuições atuais da pesquisa e perspectivas futuras, classificando as tendências recentes para reduzir a pegada de carbono de construções de concreto, identificando três linhas principais de pesquisa. A primeira consiste na melhoria das propriedades físicas e mecânicas do concreto, reduzindo volumes estruturais ou melhorando a durabilidade e aumentando a vida útil das estruturas. A segunda refere-se a reduções ou substituições de materiais de impacto ambiental dos aglomerantes e reutilização de materiais residuais dentro das misturas de concreto, acarretando diminuição no consumo de recursos naturais. A terceira compreende a utilização de concretos especiais que são especificamente projetados e adaptados para as metas de eficiência energética. Por fim, concluem que o concreto pode ser considerado um material bastante promissor para aplicações de baixo carbono em edifícios, graças aos recentes desenvolvimentos de pesquisa, mesmo sendo considerado, historicamente, um material ambientalmente impactante.

As emissões de CO<sub>2</sub> no processo de construção de 13 edifícios de apartamentos foram analisadas por Lee, Tae e Kim (2018), que consideraram as fases de transporte, execução e descarte. Os autores levaram em conta a execução de formas, concreto armado, aço, alvenaria,



impermeabilização, gesso, azulejo, marcenaria, vidraçaria, carpintaria, acabamento interior e pintura. As emissões de CO<sub>2</sub> de todo o processo foram avaliadas por metro quadrado de construção, chegando-se ao valor de 8,838 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, dos quais o concreto armado contribui com 6,294 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, representando cerca de 73%. Ao avaliar os valores do concreto armado, verificou-se que a fase de transporte contribui com aproximadamente 89% do valor total. E, finalmente, indicaram que, para reduzir a quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> no estágio de construção, deve-se priorizar a redução da distância de transporte do concreto armado e o uso de equipamentos de transportes com maior eficiência.

Souto-Martinez, Arehart e Srubar III (2018), através da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), de berço ao portão, e um modelo de sequestro de CO<sub>2</sub> previamente desenvolvido e validado para concreto, avaliaram vários pilares em concreto. Concluíram que concretos com maior resistência à compressão apresentaram menores emissões de CO<sub>2</sub> totais quando o sequestro de CO<sub>2</sub> foi incluído na ACV. Já quando os cimentícios complementares foram utilizados como substitutos do cimento, o carbono total incorporado foi menor em todos os casos estudados, apesar de apresentarem estimativas mais baixas de potencial de sequestro de CO<sub>2</sub>. Enquanto os concretos contendo cinzas volantes exibiram o carbono inicial mais baixo (berço e portão), observou-se que os concretos contendo escória exibem as menores emissões totais de CO<sub>2</sub> quando se inclui o sequestro de CO<sub>2</sub> no ACV. Por fim, indicaram que os estudos de ACV que negam o sequestro de CO<sub>2</sub> podem estar superestimando as emissões do concreto em até aproximadamente 19%.

Eleftheriadis *et al.* (2018) realizaram uma abordagem de projeto integrada à otimização de custo e à emissão de CO<sub>2</sub> para estruturas de concreto armado em decisões iniciais de projetos. A otimização foi baseada na Modelagem da Informação da Construção (BIM) que utilizou modelagem de elementos finitos e um algoritmo genético multiobjetivo com restrições de construtibilidade. O modelo desenvolvido otimizou o layout da estrutura e o dimensionamento das lajes e pilares, validando em edifícios reais. A partir disso, concluíram que podem ser obtidas soluções eficientes em relação a custos e emissões de CO<sub>2</sub> sem comprometer a viabilidade dos projetos. Contudo, indicaram que a topologia da estrutura parece ter o maior impacto sobre as avaliações e os estudos dos layouts arquitetônicos do prédio, que precisam ser mais bem estudados.

Favier *et al.* (2018) apresentam estratégias que podem reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> na indústria de concreto, especificamente na produção de clínquer, melhorando a eficiência energética das fábricas de cimento através do aperfeiçoamento da capacidade térmica dos fornos e aumento do uso de combustíveis alternativos; no teor de clínquer, substituindo uma

parte por materiais cimentícios complementares tanto em nível da produção de cimento como do concreto; na redução da quantidade de cimento, considera-se o traço a ser utilizado e a quantidade e qualidade dos agregados; e por fim nas estruturas, reduzindo a quantidade de concreto com a otimização dos elementos estruturais atendendo os mesmos requisitos de carga estrutural.

Yoon *et al.* (2018) apresentam um método de projeto sustentável para o dimensionamento de pilares em concreto armado, com funções-objetivo desenvolvidas em termos de custo, energia incorporada e emissões de CO<sub>2</sub>, utilizando a norma de projeto estrutural específica como restrição na análise de otimização. Nesse estudo, foi concluído que a otimização do custo converge com a redução do uso de aço; e a otimização de emissões de CO<sub>2</sub> e energia incorporada converge com a diminuição do uso do concreto.

Fraila-Gracia *et al.* (2019), em seu estudo, quando trataram sobre a modificação da resistência de projeto do concreto, verificaram variações significativas nos custos e emissões de CO<sub>2</sub>. O concreto de 40 MPa foi considerado a melhor escolha para as cargas modeladas na pesquisa. Os custos econômicos diminuiram até 17,83% e as emissões de CO<sub>2</sub> diminuiram até 13,59% se comparados com o concreto de menor resistência do estudo, 25 MPa. Para mais, a porcentagem do quociente entre a área de aço e de concreto é um parâmetro de projeto relevante, apresentando o valor ótimo para esta relação entre 1,47 e 1,73, independente da resistência de cálculo do concreto utilizado.

Por último, Walach *et al.* (2019) avaliaram o desempenho ambiental de estruturas de concreto armado comum e de nova geração, comparando-os. Assim, apresentaram, em sua conclusão geral de estudo, que o nível de redução do material de um determinado elemento estrutural é um parâmetro importante no que diz respeito ao impacto da estrutura no meio ambiente, e que a topologia estrutural utilizada e o comportamento de cada elemento estrutural (pilar, viga, laje) irá influenciar no resultado ambiental final.

## 2.6 ANÁLISE DAS CONCENTRAÇÕES DOS ESTUDOS DE ACV DAS ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO EM RELAÇÃO ÀS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

Os estudos revisados que apresentaram como objetivo principal definir e buscar estratégias de mitigação dos valores de emissões de CO<sub>2</sub> do concreto armado indicaram existir concentrações de estudos em fases específicas da Avaliação do Ciclo de Vida das estruturas de concreto armado (SANTORO; KRIPKA, 2017).

As linhas de estudo revisadas se distribuíram, em maior parte, na fase de produção do concreto e, mais especificamente, na produção do aglomerante e suas adições, bem como nas fases de dimensionamento da estrutura (elementos estruturais, como vigas, pilares, lajes e estruturas completas) com a definição das resistências características do concreto mais viáveis. Também foram verificados, mas em menor quantidade, estudos que realizaram a análise do ciclo de vida de modo mais completo, ou seja, considerando as fases de uso, de manutenção e de carbonatação do concreto durante a sua vida útil, assim como as fases de demolição e de possível reciclagem.

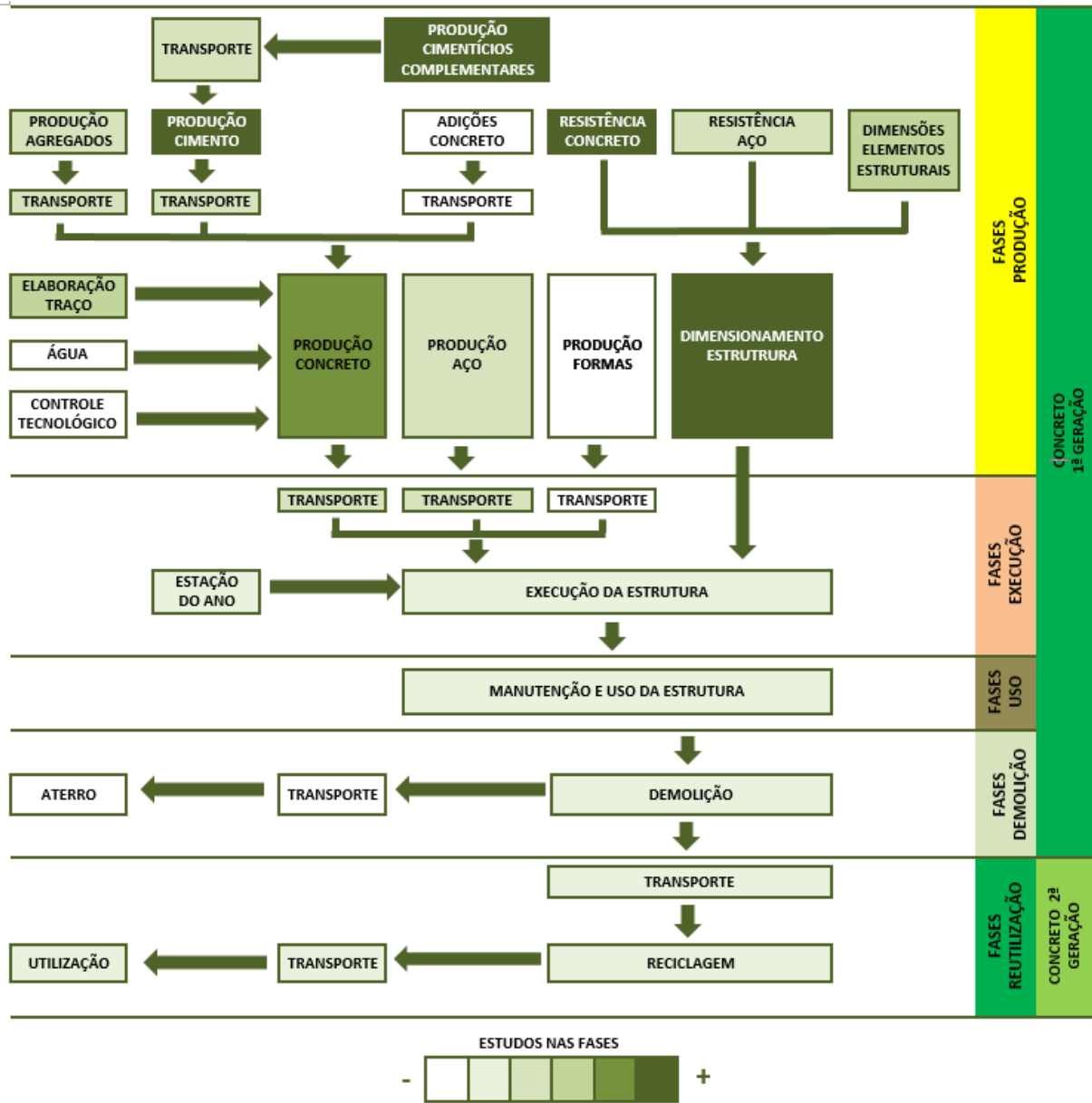
A Figura 4, na sequência, apresenta o fluxograma gerado a partir dos dados encontrados na revisão bibliográfica realizada sobre as fases que fazem parte dos processos geradores das emissões de CO<sub>2</sub> do concreto armado, indicando o comportamento das concentrações de pesquisas em cada uma delas. Os tons mais escuros indicam mais estudos na fase ou processo correspondente.

Consonantemente, ao analisar os motivos das escolhas das fases mais estudadas, conclui-se que um dos fatores principais se deve ao fato de que a etapa da produção do cimento e suas porcentagens de adições têm grande contribuição nos valores finais obtidos para as emissões de CO<sub>2</sub>, e que o dimensionamento da estrutura e escolha da resistência do concreto apresenta maior facilidade de otimização e controle por parte dos pesquisadores. Por outro lado, as fases de produção e de transporte das formas não têm merecido maior atenção, provavelmente pela pouca possibilidade de interferência no processo de sua produção e pelo fato de elas não integrarem a estrutura durante sua vida útil, ao contrário do concreto e do aço.

Já quando observadas as conclusões dos estudos para cada fase considerada em termos de redução de emissões de CO<sub>2</sub> do concreto armado, as porcentagens de reduções de emissões de CO<sub>2</sub> apresentam variações significativas devido às especificidades de cada estudo, por exemplo, a região do estudo, os indicadores das matérias-primas utilizadas, a metodologia de análise utilizada, o tipo de elemento estrutural trabalhado e as distâncias percorridas no processo, entre outros fatores.

Por fim, constata-se que um longo caminho ainda deve ser percorrido para que os impactos possam ser plena e adequadamente avaliados e reduzidos, levando em consideração as características e condições existentes em cada região de estudo.

Figura 4 – Fluxograma das fases de emissões de CO<sub>2</sub> do concreto armado.



Fonte: Santoro e Kripka (2017).

### 3 METODOLOGIA

Visando obter subsídios que possam ser considerados para a minimização do impacto ambiental no que diz respeito às emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em estudos e projetos de estruturas de concreto armado, três cenários de estudo foram propostos e gerados, de três maneiras distintas, por meio da quantificação dos valores de emissões de CO<sub>2</sub>. Após obtidas e analisadas as emissões de CO<sub>2</sub>, elas foram utilizadas nos dimensionamentos de elementos e estruturas em concreto armado. Paralelamente, em um quarto cenário de estudo, foram tratadas as questões econômicas.

As fases desenvolvidas no estudo e descritas na sequência são também apresentadas em síntese na Figura 5:

#### FASE 1 – Referencial teórico:

a) Revisão bibliográfica de estudos já realizados em relação à minimização de emissões de CO<sub>2</sub> de estruturas em concreto armado com o intuito de obter entendimento e subsídios para o desenvolvimento do trabalho.

#### FASE 2 – Definição dos cenários de estudo:

a) A partir de Santoro (2015), o primeiro cenário de estudo foi gerado com o aprimoramento dos valores de emissões de CO<sub>2</sub> das matérias-primas constituintes das estruturas de concreto armado. As contribuições da combustão dos combustíveis (diesel e gasolina) e do consumo de energia elétrica nos processos de extração, produção e transportes das matérias-primas, bem como as emissões do processo de produção na central dosadora e seu transporte até a obra foram quantificadas. Os valores de emissões de CO<sub>2</sub> de cada metro cúbico de concreto nas resistências características de 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50 MPa, de cada quilograma de aço e de cada metro quadrado de forma em madeira foram gerados.

b) No segundo cenário os valores das emissões de CO<sub>2</sub> foram obtidos a partir da utilização do software SimaPro e a base de dados Ecoinvent para cada metro cúbico de concreto nas resistências características disponibilizadas de 20, 25, 30, 35 e 50 MPa, para cada quilograma de aço e metro quadrado de madeira para as formas.

c) A quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> do terceiro cenário também foi obtida por meio do software SimaPro e da base de dados Ecoinvent, mas com os quantitativos dos traços de concreto, as distâncias de transportes e consumos de energia ajustados para a realidade da região de estudo para a produção de um metro cúbico de concreto nas resistências características

disponibilizadas de 20, 25, 30, 35 e 50 MPa, para cada quilograma de aço e metro quadrado de madeira para as formas.

d) E, por fim, o quarto cenário foi gerado a partir da quantificação das médias de custos em reais dos materiais utilizados, concreto nas resistências característica de 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50 MPa, aço e madeira para as formas.

FASE 3 – Análises e comparações dos cenários de estudo propostos:

a) Foram realizadas comparações e avaliações de cada cenário de estudo acerca das contribuições das matérias-primas, bem como das variações dos resultados devido ao acréscimo da resistência característica do concreto.

FASE 4 – Dimensionamentos de elementos e estrutura em concreto armado:

a) Vigas com diversos vãos e diferentes resistências características do concreto foram dimensionadas de maneira otimizada, a fim de verificar, a partir dos valores de emissões de CO<sub>2</sub> e dos custos, qual resistência de concreto se apresenta mais viável em relação à questão ambiental e econômica para cada cenário de estudo.

b) Da mesma forma, pilares foram dimensionados de forma otimizada com diferentes esforços atuantes e resistências características do concreto. Assim, a partir dos valores de emissões de CO<sub>2</sub> e dos custos obtidos, constatou-se qual resistência é mais viável em relação à questão ambiental e econômica para cada cenário de estudo.

c) E, por fim, uma estrutura de concreto armado foi dimensionada para as diferentes resistências características do concreto, avaliando-se o comportamento dos elementos da estrutura (vigas, pilares, lajes, escadas e fundações) tanto separadamente quanto em conjunto, bem como a contribuição de cada material nos resultados. Após, a partir dos valores de emissões de CO<sub>2</sub> e dos custos obtidos para a estrutura analisada, verificou-se, para cada cenário de estudo, qual resistência característica do concreto é mais viável em relação à questão ambiental e econômica.

FASE 5 – Avaliações e comparações dos resultados:

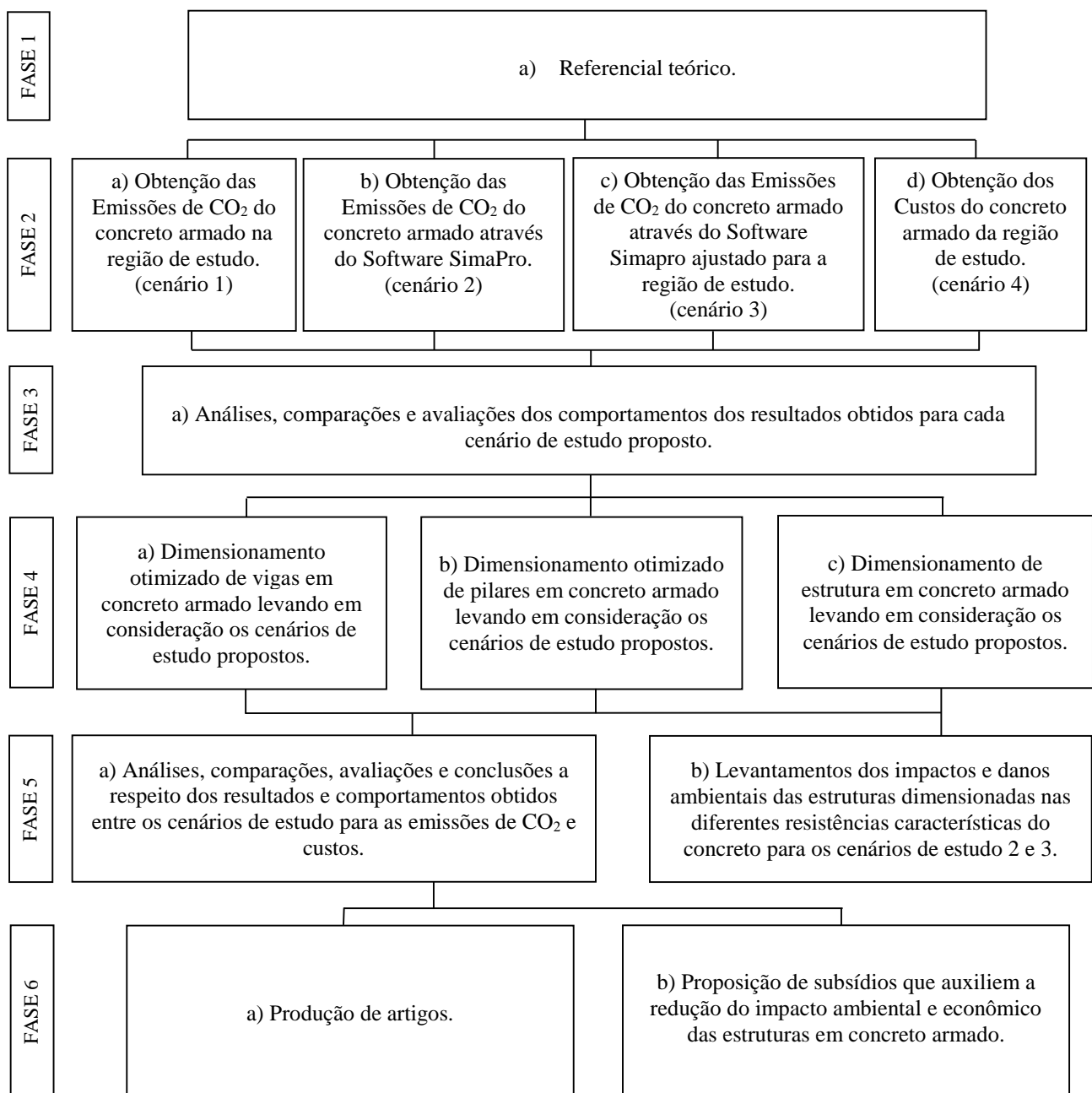
a) Foram realizadas e apresentadas avaliações e comparações entre os cenários de estudo no que diz respeito aos resultados obtidos para as emissões de CO<sub>2</sub> e custos dos comportamentos e contribuições dos materiais, dos elementos estruturais e das estruturas nas diferentes resistências características do concreto.

b) Os impactos e os danos ambientais gerados pelas estruturas dimensionadas, levando em consideração os cenários dois e três de estudo e as diferentes resistências características do concreto, foram levantados e comparados.

FASE 6 – Produção científica e proposição dos subsídios:

- a) Produções de artigos científicos a partir dos resultados e conclusões obtidas no estudo foram realizadas.
- b) Proposição de subsídios que possam orientar e auxiliar na redução do impacto ambiental das estruturas de concreto armado no que diz respeito a emissões de CO<sub>2</sub>, e, paralelamente, aos custos envolvidos, considerando as contribuições das matérias-primas, dos elementos estruturais e das resistências características do concreto de cada cenário de estudo.

Figura 5 – Síntese das fases desenvolvidas no estudo.



Fonte: O autor.

## **4 QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> E DOS CUSTOS DAS MATÉRIAS-PRIMAS DO CONCRETO ARMADO PARA CADA CENÁRIO DE ESTUDO**

### **4.1 EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> DAS MATÉRIAS-PRIMAS DO CONCRETO ARMADO A PARTIR DA REGIÃO DE ESTUDO – CENÁRIO 1**

Na sequência, de maneira sucinta, é descrita a metodologia empregada para a obtenção dos impactos em termos de emissões de CO<sub>2</sub> para as diferentes matérias-primas, bem como os valores correspondentes a partir do consumo de diesel, gasolina e energia elétrica dos processos.

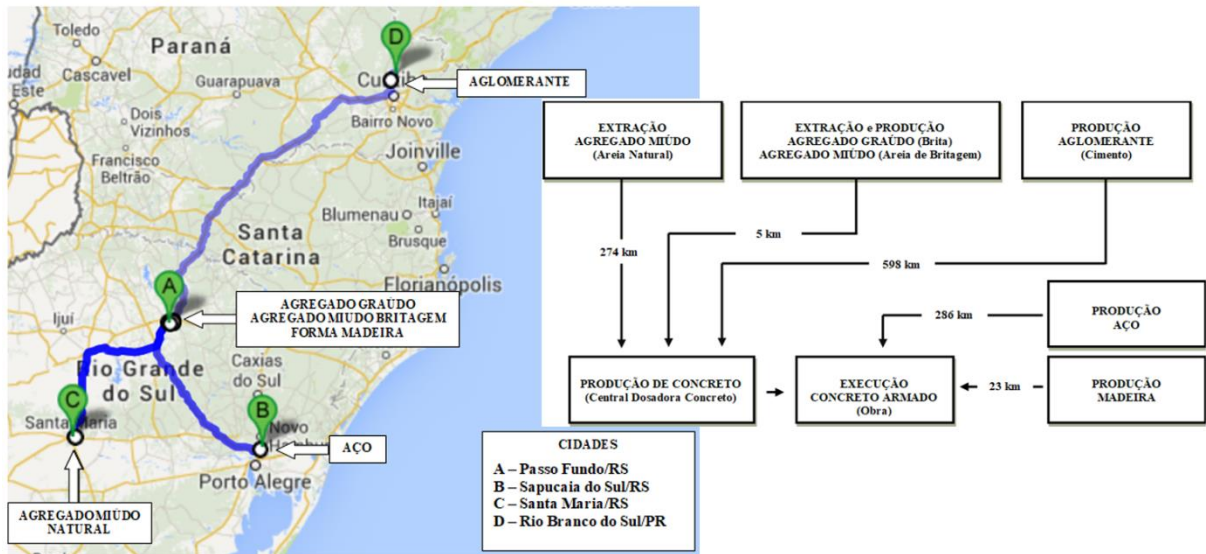
Em Santoro (2015) poderão ser obtidas informações mais detalhadas sobre os levantamentos apresentados e verificar que, com base no estudo, foram realizados, neste momento, aprimoramentos e acréscimos, como a incorporação dos valores das emissões de CO<sub>2</sub> da energia elétrica utilizada nos processos de extração, produção dos insumos do concreto armado e produção do concreto.

Também, foram considerados os levantamentos dos processos de extração, produção e transporte da madeira utilizada para a produção das formas da estrutura de concreto armado, obtendo os valores das emissões de CO<sub>2</sub> segundo o consumo de diesel, gasolina e energia elétrica. Portanto, foram definidos para cada metro cúbico de concreto os valores de emissão de CO<sub>2</sub>, atendendo diferentes resistências características, desde 20 MPa até 50 MPa, com incremento de 5 MPa. Ainda, realizou-se a atualização de valores de emissões de CO<sub>2</sub> baseada em inventários e balanços energéticos mais recentes.

O estudo dos impactos produzidos pelos insumos empregados nas estruturas de concreto armado adotou como referência a cidade de Passo Fundo, situada na região Norte do Rio Grande do Sul. A determinação das distâncias percorridas foi definida a partir de informações de empresa dosadora de concreto da região, que forneceu a localização das matérias-primas. Na Figura 6, são apresentados os locais de origem de cada matéria-prima e as distâncias correspondentes de deslocamentos até o local de utilização.



Figura 6 – Localização geográfica e distâncias dos deslocamentos das matérias-primas.



Fonte: Adaptada de Santoro (2015).

A emissão de CO<sub>2</sub> do processo de combustão do diesel e da gasolina utilizado neste estudo é proveniente do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (2014), que apresenta como fator de emissão o valor de 2,603 kg de CO<sub>2</sub> para cada litro de diesel consumido, e 2,212 kg de CO<sub>2</sub> para cada litro de gasolina consumida.

Já a emissão de CO<sub>2</sub> relacionada à produção da energia elétrica utilizada nos processos é proveniente do Balanço Energético Nacional (2018). Conforme essa fonte, a média de emissão é de 104,4 kg de CO<sub>2</sub> para produzir 1 MWh de energia elétrica ou 0,1044 kg de CO<sub>2</sub> para produzir 1 KWh.

O levantamento considerou as atividades na mineradora, Figura 7, no processo de extração, produção e armazenamento, bem como o transporte até a central dosadora de concreto, do agregado graúdo (brita) e miúdo (areia de britagem).

Figura 7 – Processo de extração, produção e transporte do agregado graúdo e miúdo (areia de britagem).



Fonte: O autor.

Após as visitas para conhecimento do processo produtivo e os questionamentos feitos aos responsáveis pela mineradora, foram obtidas as informações necessárias para a definição da emissão de CO<sub>2</sub>. Na Tabela 3, são apresentados de maneira sintetizada os valores de emissão na extração e produção e, na Tabela 4, os valores de emissão do transporte.

Tabela 3 – Emissões de CO<sub>2</sub> da extração e produção do agregado graúdo e miúdo (areia de britagem).

Matéria-prima	Produção	Consumo Energia	Consumo Diesel	Consumo Gasolina	Emissão CO <sub>2</sub> Energia Elétrica	Emissão CO <sub>2</sub> Diesel	Emissão CO <sub>2</sub> Gasolina	Emissão CO <sub>2</sub> TOTAL
Agregados Graúdo (brita) Miúdo (areia britagem)	10.000.000 Kg/mês	30.000 Kwh/mês	15.000 L/mês	--	0,000313 KgCO <sub>2</sub> /kg	0,003905 KgCO <sub>2</sub> /kg	--	0,004218 KgCO <sub>2</sub> /kg

Fonte: O autor.

Tabela 4 – Emissões CO<sub>2</sub> do transporte do agregado graúdo e miúdo (areia britagem) até a dosadora de concreto.

Matéria-prima	Carga Transportada	Consumo Diesel	Consumo Diesel	Emissão CO <sub>2</sub> Diesel	Emissão CO <sub>2</sub>
Agregado Graúdo (brita)	23.000 Kg/viagem	5 L/viagem	0,000217 L/Kg	2,603 KgCO <sub>2</sub> /L	0,000565 KgCO <sub>2</sub> /kg
Agregado Miúdo (areia britagem)	21.000 Kg/viagem	5 L/viagem	0,000238 L/Kg	2,603 KgCO <sub>2</sub> /L	0,000620 KgCO <sub>2</sub> /kg

Fonte: O autor.

De forma análoga, foi efetuado o levantamento das atividades relativas à extração, à produção, ao armazenamento e ao transporte do agregado miúdo (areia natural) da mineradora até a central dosadora de concreto, de acordo com a Figura 8.

Figura 8 – Processo de extração, produção e transporte do agregado miúdo (areia natural).



Fonte: O autor.

Os resultados obtidos para a areia natural são apresentados nas Tabelas 5 e 6. Observou-se que os valores de emissão de dióxido de carbono relativos à areia natural são significativamente maiores (cerca de 82%) que os da areia de britagem, devido, principalmente,

à grande distância a ser percorrida pela areia natural, isto é, desde seu local de extração até o de utilização na central dosadora de concreto.

Tabela 5 – Emissões de CO<sub>2</sub> na extração e na produção do agregado miúdo natural.

Matéria-prima	Produção	Consumo Energia	Consumo Diesel	Consumo Gasolina	Emissão CO <sub>2</sub> Energia Elétrica	Emissão CO <sub>2</sub> Diesel	Emissão CO <sub>2</sub> Gasolina	Emissão CO <sub>2</sub> TOTAL
<b>Agregado Miúdo (areia natural)</b>	16.549.000 Kg/mês	454 Kwh/mês	22.000 L/mês	--	0,000003 KgCO <sub>2</sub> /kg	0,003459 KgCO <sub>2</sub> /kg	--	0,003462 KgCO <sub>2</sub> /kg

Fonte: O autor.

Tabela 6 – Emissões de CO<sub>2</sub> do transporte do agregado miúdo natural até a dosadora de concreto.

Matéria-prima	Carga Transportada	Consumo Diesel	Consumo Gasolina	Emissão CO <sub>2</sub> Diesel	Emissão CO <sub>2</sub> Gasolina
<b>Agregado Miúdo (areia natural)</b>	28.000 Kg/viagem	250 L/viagem	0,008929 L/kg	2,603 KgCO <sub>2</sub> /L	0,023242 KgCO <sub>2</sub> /kg

Fonte: O autor.

Em relação às emissões da madeira utilizada para a execução das formas, foram realizados levantamentos das fases de produção, beneficiamento e transporte até a utilização na obra, conforme Figura 9.

Figura 9 – Processo de extração, produção e transporte da madeira.



Fonte: O autor.

Os resultados obtidos para madeira são apresentados nas Tabelas 7 e 8. Verificou-se que a etapa de transporte representa aproximadamente 15% do valor total de emissão de CO<sub>2</sub>.

Tabela 7 – Emissões de CO<sub>2</sub> da produção e beneficiamento da madeira.

Matéria-prima	Produção	Consumo Energia	Consumo Diesel	Consumo Gasolina	Emissão CO <sub>2</sub> Energia Elétrica	Emissão CO <sub>2</sub> Diesel	Emissão CO <sub>2</sub> Gasolina	Emissão CO <sub>2</sub> TOTAL
Madeira	119 m <sup>3</sup> /mês	7604 Kwh/mês	1268 L/mês	200 L/mês	6,671072 KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	27,736168 KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	3,717646 KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	38,124886 KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>

Fonte: O autor.

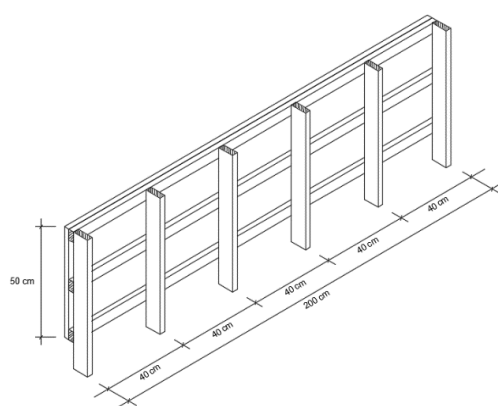
Tabela 8 – Emissões de CO<sub>2</sub> do transporte da madeira até a obra.

Matéria-prima	Carga Transportada	Consumo Diesel	Consumo Diesel	Emissão CO <sub>2</sub> Diesel	Emissão CO <sub>2</sub>
Madeira	6 m <sup>3</sup> /viagem	15,333333 L/viagem	2,555555 L/m <sup>3</sup>	2,603 KgCO <sub>2</sub> /L	6,652110 KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>

Fonte: O autor.

Já para cotejar a emissão de CO<sub>2</sub> por metro quadrado de forma, considerou-se, para o estudo, o consumo de 0,0398 m<sup>3</sup> de madeira para obtenção de um metro quadrado de forma, Figura 10.

Figura 10 - Madeiras utilizadas para a forma.



Fonte: O autor.

Com relação às emissões correspondentes às etapas de produção do aglomerante (cimento), utilizaram-se dados retirados da literatura. O Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Produção de Cimento (2010) diz que, no ano de 2005, para uma produção de 38.706.000 toneladas de cimento, gerou-se a emissão de 14.349.000 toneladas de CO<sub>2</sub>, obtendo-se um fator de emissão de 0,371 toneladas de CO<sub>2</sub> / tonelada de cimento produzido ou 0,371 kg CO<sub>2</sub> / kg de cimento produzido.

Além da produção, também o transporte do cimento da fábrica até o local de utilização (no caso, a central dosadora de concreto) foi considerado. Os resultados de emissões de CO<sub>2</sub> do transporte do aglomerante (cimento) estão sintetizados na Tabela 9.

Tabela 9 – Emissões de CO<sub>2</sub> do transporte do cimento até a dosadora de concreto.

Matéria-prima	Carga Transportada	Consumo Diesel	Consumo Diesel	Emissão CO <sub>2</sub> Diesel	Emissão CO <sub>2</sub>
Aglomerante (cimento)	32.000 Kg/viagem	580 L/viagem	0,018125 L/Kg	2,603 KgCO <sub>2</sub> /L	0,047179 KgCO <sub>2</sub> /Kg

Fonte: O autor.

A seu turno, o valor de emissão de CO<sub>2</sub> no processo siderúrgico de produção do aço considerado neste trabalho foi de 1,014 kgCO<sub>2</sub>/kg de aço, sendo oriundo do Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Emissões de Gases de Efeito Estufa nos Processos Industriais – Produção de Metais, Ferro e Aço (2010), publicado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia e elaborado pelo Instituto Aço Brasil e suas associadas no ano de 2010.

Além da produção, o transporte do aço da siderúrgica até a região de estudo, cidade de Passo Fundo, foi considerado, conforme Tabela 10.

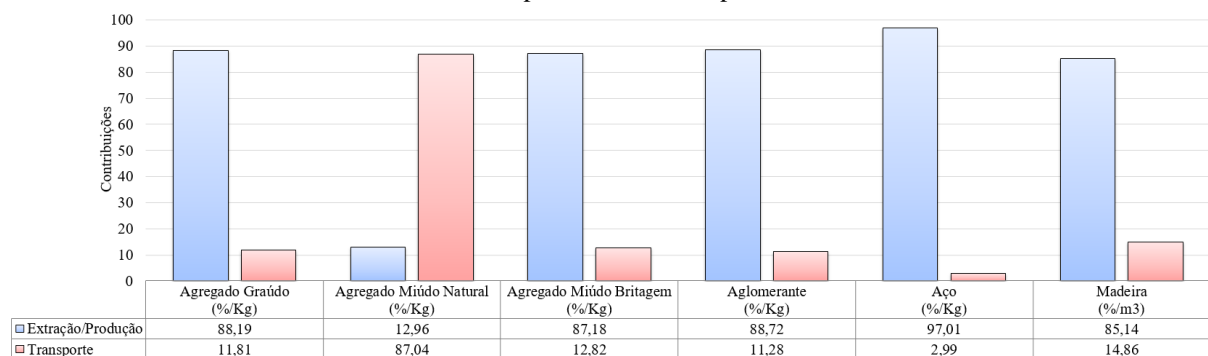
Tabela 10 - Emissões de CO<sub>2</sub> do transporte do aço até a obra.

Matéria-prima	Carga Transportada	Consumo Diesel	Consumo Diesel	Emissão CO <sub>2</sub> Diesel	Emissão CO <sub>2</sub> KgCO <sub>2</sub> /kg
Aço	25.000 Kg/viagem	300 L/viagem	0,012000 L/Kg	2,603 KgCO <sub>2</sub> /L	0,031236 KgCO <sub>2</sub> /Kg

Fonte: O autor.

Concluídos os levantamentos, é possível verificar, a partir do Gráfico 1, as parcelas de contribuição das etapas de extração/produção e do transporte das matérias-primas envolvidas na produção do concreto armado na região de estudo. Destaca-se, neste gráfico, a grande contribuição do transporte nas emissões de CO<sub>2</sub> do agregado miúdo natural, equivalente a mais de 87% do valor total.

Gráfico 1 – Contribuições percentuais nas emissões de CO<sub>2</sub> da extração/produção e do transporte nos valores obtidos para cada matéria-prima.



Fonte: O autor.

Por fim, foram calculadas as emissões de CO<sub>2</sub> para a produção de um metro cúbico de concreto, considerando as dosagens dos traços utilizados pela dosadora para a produção de concretos com resistências de 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50 MPa, apresentadas nas Tabelas 11 a 17, respectivamente.

Tabela 11 – Emissões de CO<sub>2</sub> do concreto a partir do traço de 20 MPa.

Matéria-prima	Concreto F <sub>ck</sub> 20 MPa						
	Quantidade Kg/m <sup>3</sup>	Emissões Extração/Produção KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Transporte KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Totais KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Extração/Produção KgCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>	Emissões Transporte KgCO <sub>2</sub> m <sup>3</sup>	Emissões Totais KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Agregado Graúdo	1043	0,004218	0,000565	0,004783	4,399374	0,589295	4,988669
Agregado Miúdo Natural	379	0,003462	0,023242	0,026704	1,312098	8,808718	10,120816
Agregado Miúdo Britagem	463	0,004218	0,000620	0,004838	1,952934	0,287060	2,239994
Agglomerante	271	0,371000	0,047179	0,418179	100,541000	12,785509	113,326509
<b>Emissão Total = 130,675988 KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup></b>							

Fonte: O autor.

Tabela 12 – Emissões de CO<sub>2</sub> do concreto a partir do traço de 25 MPa.

Matéria-prima	Concreto F <sub>ck</sub> 25 MPa						
	Quantidade Kg/m <sup>3</sup>	Emissões Extração/Produção KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Transporte KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Totais KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Extração/Produção KgCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>	Emissões Transporte KgCO <sub>2</sub> m <sup>3</sup>	Emissões Totais KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Agregado Graúdo	1052	0,004218	0,000565	0,004783	4,437336	0,594380	5,031716
Agregado Miúdo Natural	365	0,003462	0,023242	0,026704	1,263630	8,483330	9,746960
Agregado Miúdo Britagem	446	0,004218	0,000620	0,004838	1,881228	0,276520	2,157748
Agglomerante	294	0,371000	0,047179	0,418179	109,074000	13,870626	122,944626
<b>Emissão Total = 139,881050 KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup></b>							

Fonte: O autor.

Tabela 13 – Emissões de CO<sub>2</sub> do concreto a partir do traço de 30 MPa.

Matéria-prima	Concreto F <sub>ck</sub> 30 MPa						
	Quantidade Kg/m <sup>3</sup>	Emissões Extração/Produção KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Transporte KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Totais KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Extração/Produção KgCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>	Emissões Transporte KgCO <sub>2</sub> m <sup>3</sup>	Emissões Totais KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Agregado Graúdo	1059	0,004218	0,000565	0,004783	4,466862	0,598335	5,065197
Agregado Miúdo Natural	352	0,003462	0,023242	0,026704	1,218624	8,181184	9,399808
Agregado Miúdo Britagem	430	0,004218	0,000620	0,004838	1,813740	0,266600	2,080340
Agglomerante	315	0,371000	0,047179	0,418179	116,865000	14,861385	131,726385
<b>Emissão Total = 148,271730 KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup></b>							

Fonte: O autor.

Tabela 14 – Emissões de CO<sub>2</sub> do concreto a partir do traço de 35 MPa.

Matéria-prima	Concreto F <sub>ck</sub> 35 MPa						
	Quantidade Kg/m <sup>3</sup>	Emissões Extração/Produção KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Transporte KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Totais KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Extração/Produção KgCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>	Emissões Transporte KgCO <sub>2</sub> m <sup>3</sup>	Emissões Totais KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Agregado Graúdo	1076	0,004218	0,000565	0,004783	4,538568	0,607940	5,146508
Agregado Miúdo Natural	333	0,003462	0,023242	0,026704	1,152846	7,739586	8,892432
Agregado Miúdo Britagem	406	0,004218	0,000620	0,004838	1,712508	0,251720	1,964228
Agglomerante	350	0,371000	0,047179	0,418179	129,850000	16,512650	146,362650
<b>Emissão Total = 162,365818 KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup></b>							

Fonte: O autor.

Tabela 15 – Emissões de CO<sub>2</sub> do concreto a partir do traço de 40 MPa.

Matéria-prima	Concreto F <sub>ck</sub> 40 MPa						
	Quantidade Kg/m <sup>3</sup>	Emissões Extração/Produção KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Transporte KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Totais KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Extração/Produção KgCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>	Emissões Transporte KgCO <sub>2</sub> m <sup>3</sup>	Emissões Totais KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Agregado Graúdo	1084	0,004218	0,000565	0,004783	4,572312	0,612460	5,184772
Agregado Miúdo Natural	317	0,003462	0,023242	0,026704	1,097454	7,367714	8,465168
Agregado Miúdo Britagem	388	0,004218	0,000620	0,004838	1,636584	0,240560	1,877144
Aglomerante	376	0,371000	0,047179	0,418179	139,496000	17,739304	157,235304
<b>Emissão Total = 172,762388 KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup></b>							

Fonte: O autor.

Tabela 16 – Emissões de CO<sub>2</sub> do concreto a partir do traço de 45 MPa

Matéria-prima	Concreto F <sub>ck</sub> 45 MPa						
	Quantidade Kg/m <sup>3</sup>	Emissões Extração/Produção KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Transporte KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Totais KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Extração/Produção KgCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>	Emissões Transporte KgCO <sub>2</sub> m <sup>3</sup>	Emissões Totais KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Agregado Graúdo	1075	0,004218	0,000565	0,004783	4,534350	0,607375	5,141725
Agregado Miúdo Natural	306	0,003462	0,023242	0,026704	1,059372	7,112052	8,171424
Agregado Miúdo Britagem	374	0,004218	0,000620	0,004838	1,577532	0,231880	1,809412
Aglomerante	407	0,371000	0,047179	0,418179	150,997000	19,201853	170,198853
<b>Emissão Total = 185,321414 KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup></b>							

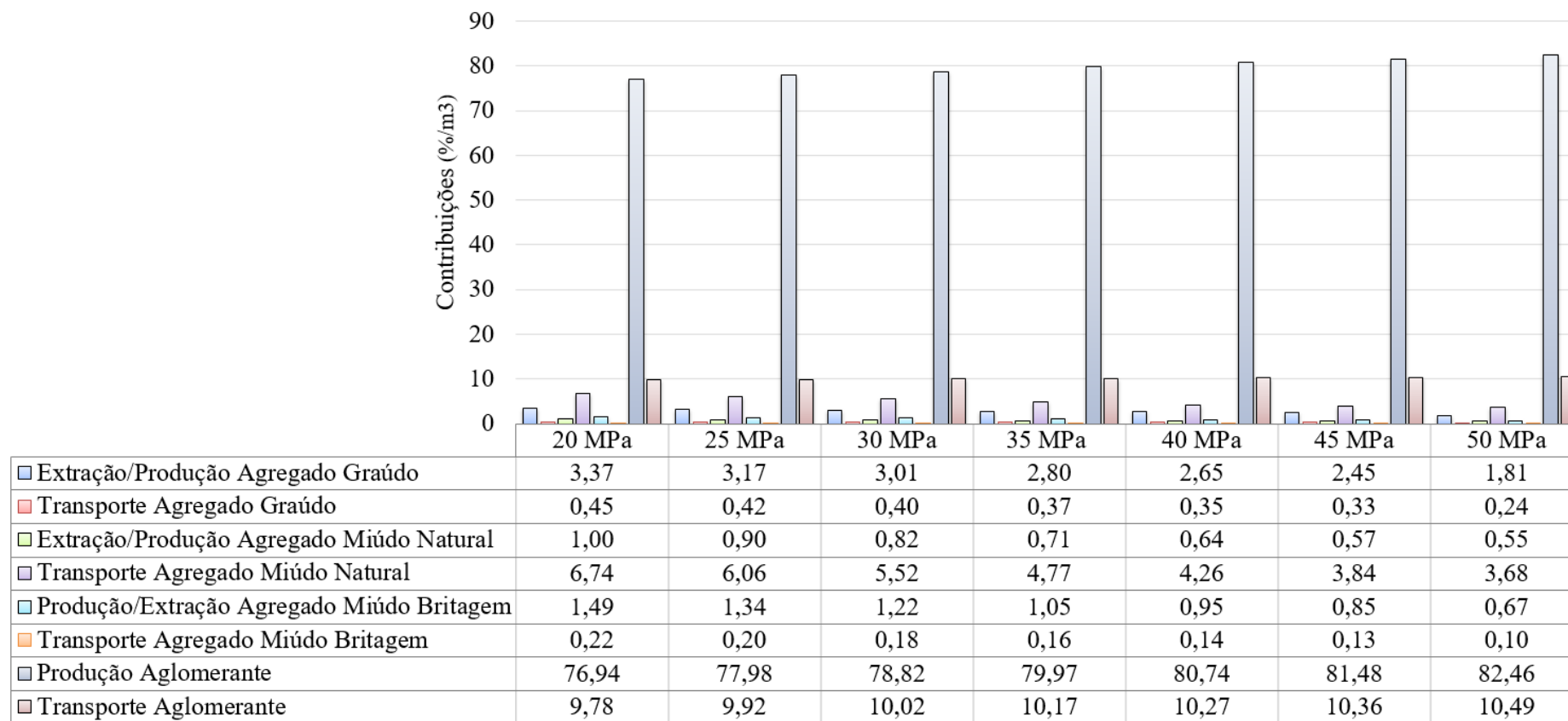
Fonte: O autor.

Tabela 17 – Emissões de CO<sub>2</sub> do concreto a partir do traço de 50 MPa

Matéria-prima	Concreto F <sub>ck</sub> 40 MPa						
	Quantidade Kg/m <sup>3</sup>	Emissões Extração/Produção KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Transporte KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Totais KgCO <sub>2</sub> /Kg	Emissões Extração/Produção KgCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>	Emissões Transporte KgCO <sub>2</sub> m <sup>3</sup>	Emissões Totais KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Agregado Graúdo	928	0,004218	0,000565	0,004783	3,914304	0,524320	4,438624
Agregado Miúdo Natural	343	0,003462	0,023242	0,026704	1,187466	7,972006	9,159472
Agregado Miúdo Britagem	343	0,004218	0,000620	0,004838	1,446774	0,212660	1,659434
Aglomerante	481	0,371000	0,047179	0,418179	178,451000	22,693099	201,144099
<b>Emissão Total = 216,401629 KgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup></b>							

Fonte: O autor.

A partir dos resultados obtidos para cada traço de concreto, nas dosagens apresentadas, foram calculadas as parcelas percentuais de contribuição nas emissões de CO<sub>2</sub> da produção/extração e dos transportes de cada matéria-prima envolvida nas diferentes resistências características do concreto, conforme o Gráfico 2. Constata-se que a contribuição majoritária nas emissões de CO<sub>2</sub> na fase de produção/extração é do aglomerante, já no transporte das matérias-primas tem-se o aglomerante e o agregado miúdo natural com as contribuições percentuais mais significativas.

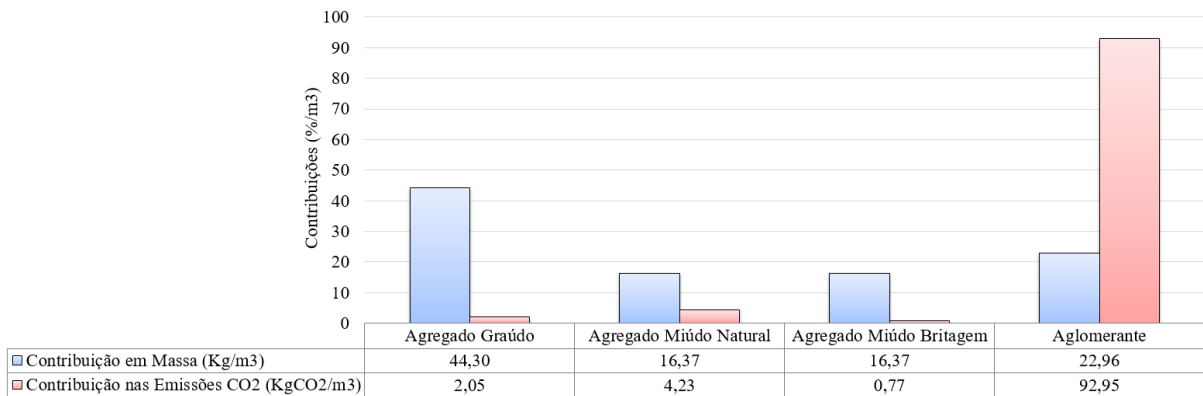
Gráfico 2 – Contribuições percentuais das matérias-primas nas emissões CO<sub>2</sub> de cada metro cúbico de concreto (cenário 1).

Fonte: O autor.



Apesar da pouca representação em massa (kg) por unidade de volume (m<sup>3</sup>) de concreto, o responsável por grande parcela dos impactos para todas as resistências características é o aglomerante, presente em maior quantidade em concretos de maiores resistências. No Gráfico 3 pode-se verificar e comparar a contribuição percentual em massa e em emissões de CO<sub>2</sub> de cada matéria-prima para a produção de um metro cúbico de concreto com resistência característica de 50 MPa.

Gráfico 3 – Contribuições percentuais das matérias-primas em um metro cúbico de concreto de 50 MPa.



Fonte: O autor.

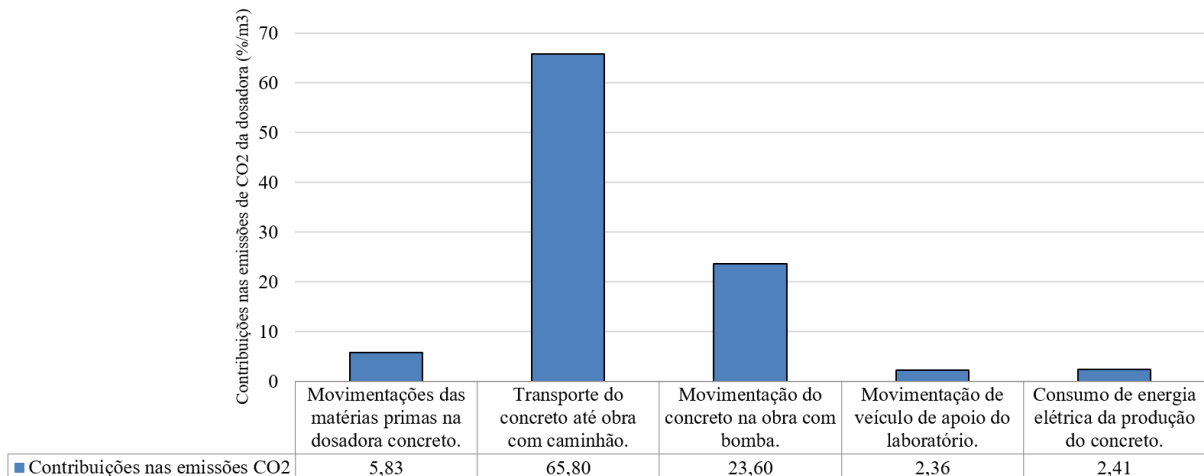
Ainda, as emissões de CO<sub>2</sub> geradas pela central dosadora de concreto foram levantadas para a produção e o transporte do concreto até a forma da obra, sendo seus valores apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Emissões de CO<sub>2</sub> geradas nos processos de produção e transporte da central dosadora de concreto.

Emissão CO <sub>2</sub> Pá Carregadeira KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissão CO <sub>2</sub> Caminhão Betoneira KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissão CO <sub>2</sub> Bomba KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissão CO <sub>2</sub> Carro Apoio KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissão CO <sub>2</sub> Energia Elétrica KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Emissão CO <sub>2</sub> TOTAL KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
0,546630	6,169110	2,212550	0,221200	0,226200	9,375690

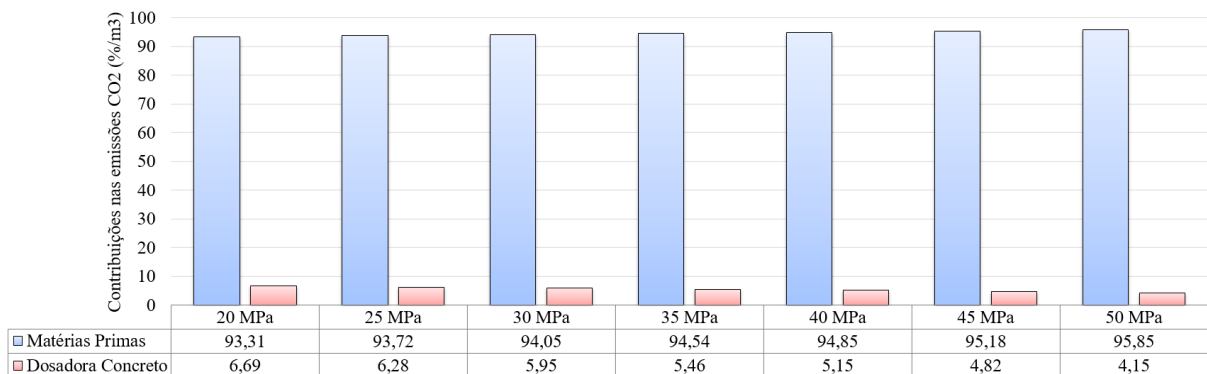
Fonte: O autor.

Destaca-se, nessa etapa, entre todos os processos da dosadora, o transporte por caminhões do concreto até a obra, o que contribui com 65,80% das emissões de CO<sub>2</sub> geradas, segundo os dados dispostos no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Contribuições percentuais dos processos da dosadora de concreto nas emissões de CO<sub>2</sub>.

Fonte: O autor.

E quando calculadas as contribuições percentuais das matérias-primas e da dosadora de concreto nas emissões totais de CO<sub>2</sub> para a produção de um metro cúbico de concreto nas diferentes resistências características, verifica-se, no Gráfico 5, que a dosadora contribui com valores que variam entre 4% e 7% do total.

Gráfico 5 – Contribuições percentuais das matérias-primas e da dosadora de concreto nas emissões de CO<sub>2</sub> de um metro cúbico de concreto (cenário 1).

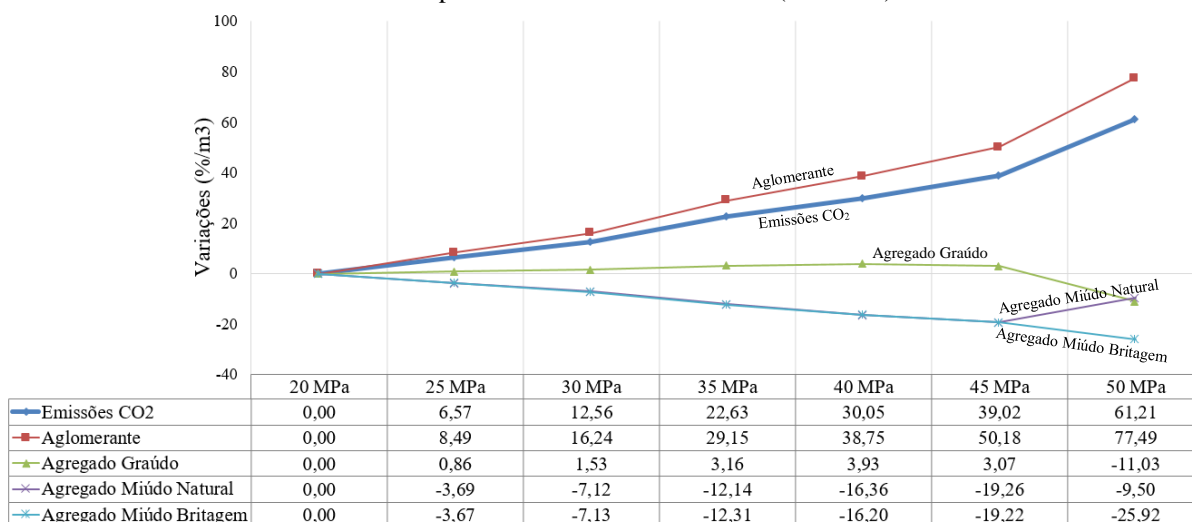
Fonte: O autor.

Isso posto, e a partir do levantamento de todas as etapas, foram gerados os valores finais de emissões de CO<sub>2</sub>, segundo a Tabela 19. Já conforme o Gráfico 6, os valores obtidos para o concreto, a partir do acréscimo da resistência característica de 20 Mpa, apresentaram variações percentuais que podem chegar até 61,21%. Além disso, observa-se as variações percentuais nos quantitativos de cada matéria-prima utilizada no concreto, segundo a dosagem do traço, demonstrando a grande influência da variação do uso de aglomerante na alternância dos valores de emissões de CO<sub>2</sub>.

Tabela 19 – Emissões finais de CO<sub>2</sub> para a produção do concreto armado (cenário 1).

Material	Emissão de CO <sub>2</sub>
Concreto – 20 MPa	140,05 KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Concreto – 25 MPa	149,26 KgCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>
Concreto – 30 MPa	157,65 KgCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>
Concreto – 35 MPa	171,74 KgCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>
Concreto – 40 MPa	182,14 KgCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>
Concreto – 45 MPa	194,70 KgCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>
Concreto – 50 MPa	225,78 KgCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>
Aço – CA 50 / CA 60	1,05 KgCO <sub>2</sub> /Kg
Forma Madeira	1,78 KgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>

Fonte: O autor.

Gráfico 6 – Variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> e dos quantitativos das matérias-primas utilizadas no concreto a partir da resistência de 20 MPa (cenário 1).

Fonte: O autor.

#### 4.2 EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> DAS MATÉRIAS-PRIMAS DO CONCRETO ARMADO A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE SIMAPRO – CENÁRIO 2

Para a obtenção das emissões de CO<sub>2</sub>, fase do berço ao portão, das matérias-primas do concreto armado utilizou-se o software SimaPro, versão 9.0.0.48 Faculty UPF 002, bem como a base de dados Econinvent 3.5, de 2018. Em relação às categorias de impactos, entre os diversos métodos existentes para a avaliação no SimaPro, selecionou-se o método ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H), versão hierarquistada método padrão do ponto médio do ReCiPe com os fatores de caracterização para a escala global. A Tabela 20 apresenta os materiais elencados no inventário e seu respectivos processos no software Simapro.

As dosagens dos traços de concreto utilizados pelo software estão apresentadas na Tabela 21, onde é possível verificar e comparar os quantitativos de consumo de cada matéria-

prima para a produção de um metro cúbico de concreto nas diferentes resistências características disponibilizadas.

Tabela 20 – Materiais e processos no SimaPro (cenário 2).

Material	Processo no SimaPro
Concretos (m <sup>3</sup> )	“Concrete, 20 25 30 35 50 MPa {GLO} Market for   Cut-off, U”
Aço (kg)	“Reinforcing steel{GLO} Market for   Cut-off, U”
Madeira (m <sup>3</sup> )	“Sawnwood, parana pine from sustainable forest management, kiln dried {GLO} Market for   Cut-off,U”

Fonte: O autor.

Tabela 21 – Dosagem dos traços do concreto do software SimaPro (cenário 2).

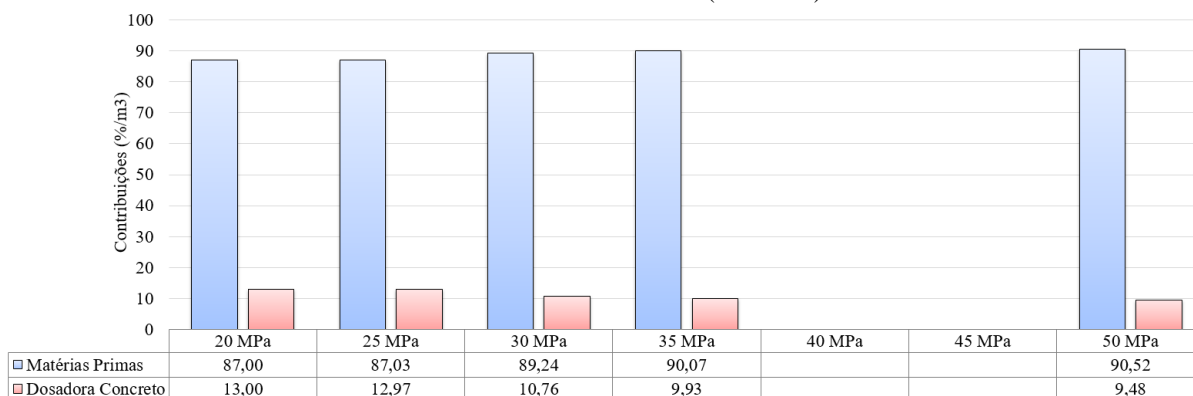
Resistência Característica	Aglomerante (kg)	Agregado Graúdo (kg)	Agregado Miúdo (kg)	Cinza Volante / Sílica Ativa / Escória Alto Forno (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)
20 MPa	206	1019	935	36	160	1,20
25 MPa	208	1111	919	69	123	1,20
30 MPa	300	1103	729	53	160	3,00
35 MPa	315	960	824	73	162	3,00
50 MPa	348	960	806	83	155	3,75

Fonte: O autor.

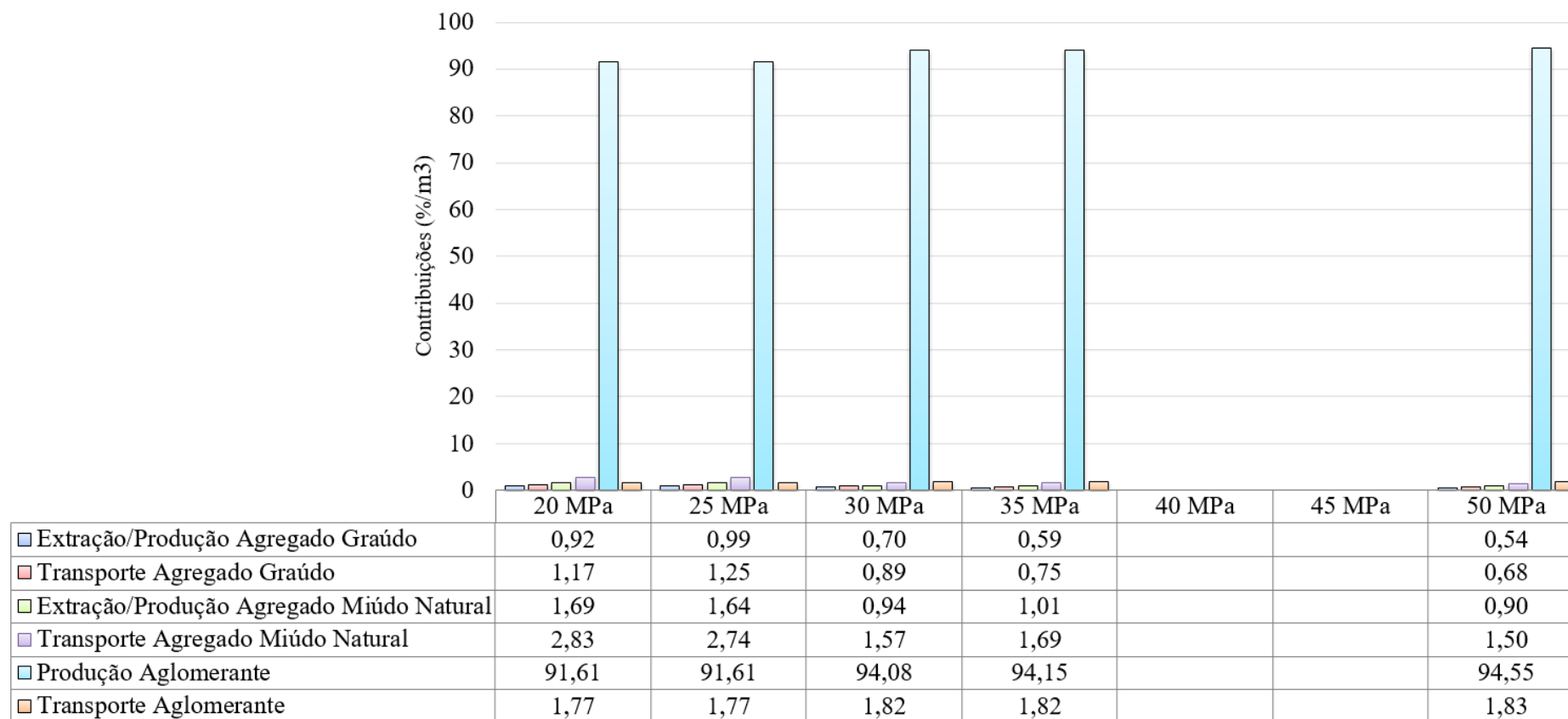
Estes consumos geraram para a produção de um metro cúbico de concreto parcelas percentuais de contribuição de cada matéria-prima, apresentadas no Gráfico 8, que, igualmente ao cenário de estudo anterior, tem como contribuinte majoritário na fase de produção/extração o aglomerante; já no transporte não ocorrem diferenças significativas a destacar.

Já quando gerada a parcela de contribuição da dosadora de concreto nas emissões de CO<sub>2</sub> para a produção de um metro cúbico de concreto, os valores percentuais obtidos ficaram entre 9% e 13%, um pouco maiores do que no cenário anteriormente avaliado, ver Gráfico 7.

Gráfico 7 – Contribuições percentuais das matérias-primas e da dosadora de concreto nas emissões de CO<sub>2</sub> de um metro cúbico de concreto (cenário 2).



Fonte: O autor.

Gráfico 8 – Contribuições percentuais das matérias-primas nas emissões de CO<sub>2</sub> de cada metro cúbico de concreto (cenário 2).

Fonte: O autor.

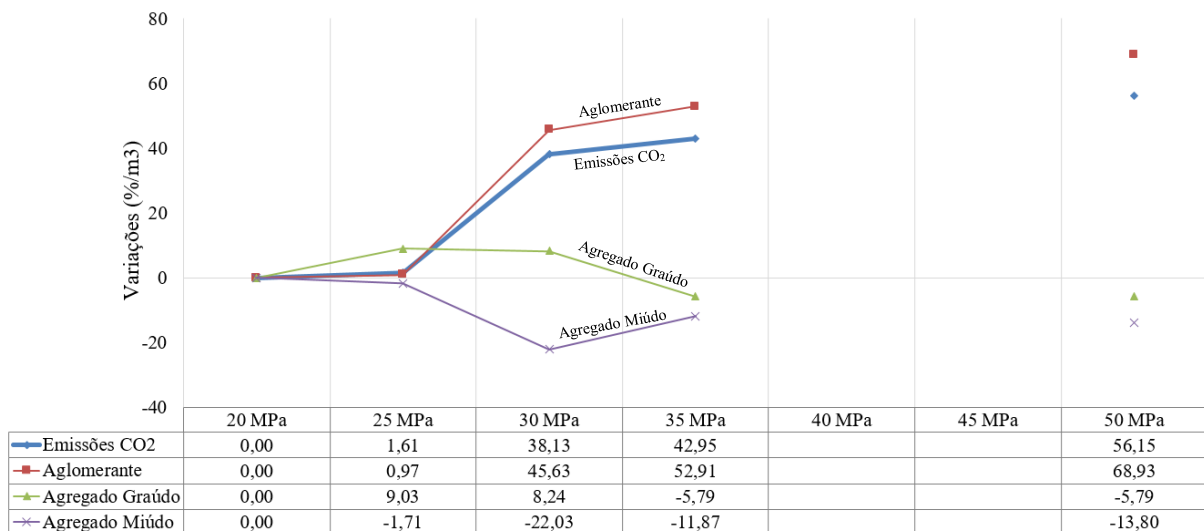
Os valores finais obtidos para as emissões de CO<sub>2</sub> a partir do software SimaPro, neste estudo denominado de cenário 2, podem ser verificados na Tabela 22, na qual se observa uma variação percentual significativa nos valores de emissões de CO<sub>2</sub> do concreto quando a resistência acresce de 25 MPa para 30 MPa, de acordo com o Gráfico 9. Esse acréscimo de 36,52% se deve ao aumento significativo do uso do aglomerante na dosagem do traço de concreto com resistência de 30 MPa. Além disso, verifica-se as variações percentuais nos quantitativos utilizados de cada matéria-prima do concreto, segundo a dosagem do traço.

Tabela 22 – Emissões de CO<sub>2</sub> geradas a partir do software SimaPro (cenário 2).

Material	Emissão de CO <sub>2</sub>
Concreto – 20 MPa	226,52 KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Concreto – 25 MPa	230,18 KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Concreto – 30 MPa	312,90 KgCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>
Concreto – 35 MPa	323,81 KgCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>
Concreto – 50 MPa	353,72 KgCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>
Aço – CA 50 / CA 60	2,05 KgCO <sub>2</sub> /Kg
Forma Madeira	24,03 KgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>

Fonte: O autor.

Gráfico 9 – Variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> e dos quantitativos das matérias-primas utilizadas no concreto a partir da resistência de 20 MPa (cenário 2).

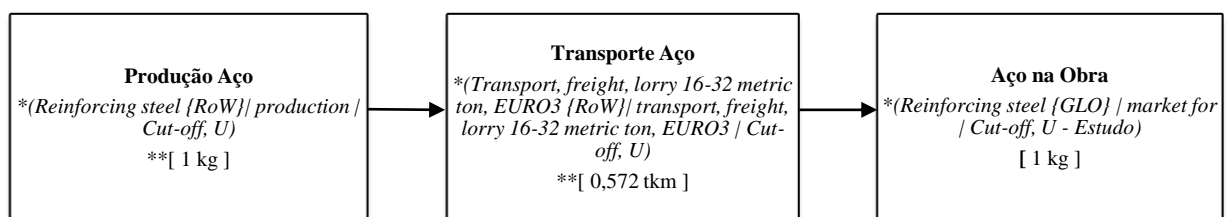


Fonte: O autor.

### 4.3 EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> DAS MATÉRIAS-PRIMAS DO CONCRETO A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE SIMAPRO COM OS VALORES AJUSTADOS PARA A REGIÃO DE ESTUDO – CENÁRIO 3

As emissões de CO<sub>2</sub> deste cenário também foram geradas a partir do software SimaPro, mas com os valores da base de dados (dosagens dos traços, distâncias de transporte e consumos de energia elétrica) ajustados à realidade da região de estudo, conforme Figuras 11, 12 e 13.

Figura 11 – Fluxograma com os quantitativos ajustados para o aço.

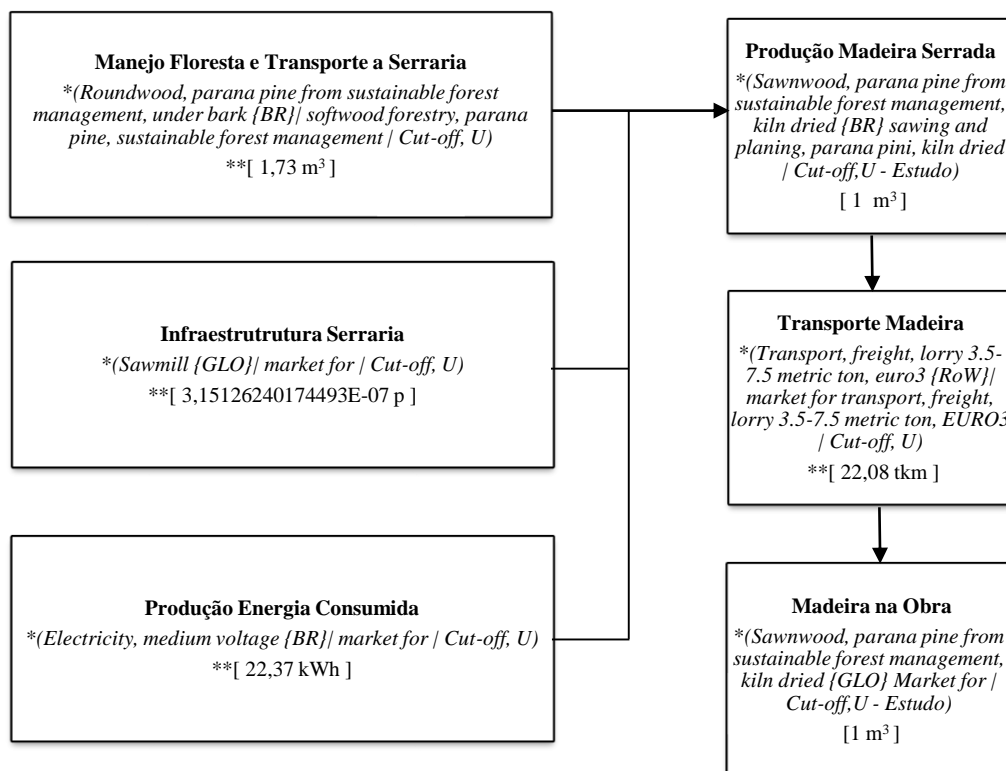


\* Processos selecionados no software SimaPro para ajuste.

\*\* Quantitativos ajustados.

Fonte: O autor.

Figura 12 – Fluxograma com os quantitativos ajustados para a forma de madeira.

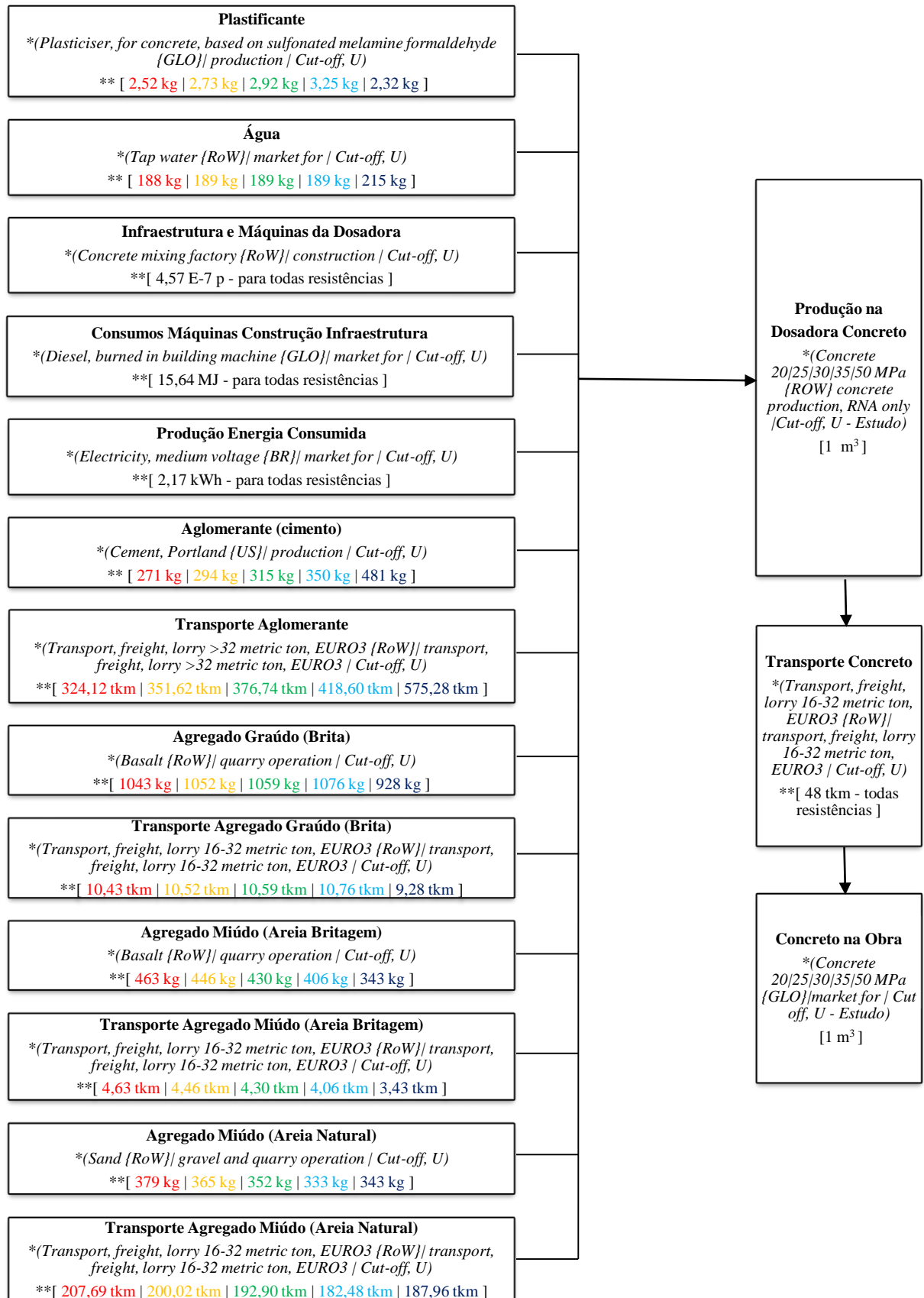


\* Processos selecionados no software SimaPro para ajuste.

\*\* Quantitativos ajustados.

Fonte: O autor.

Figura 13 – Fluxograma com os quantitativos ajustados para os diferentes concretos.



\* Processo selecionado no software SimaPro para ajuste.

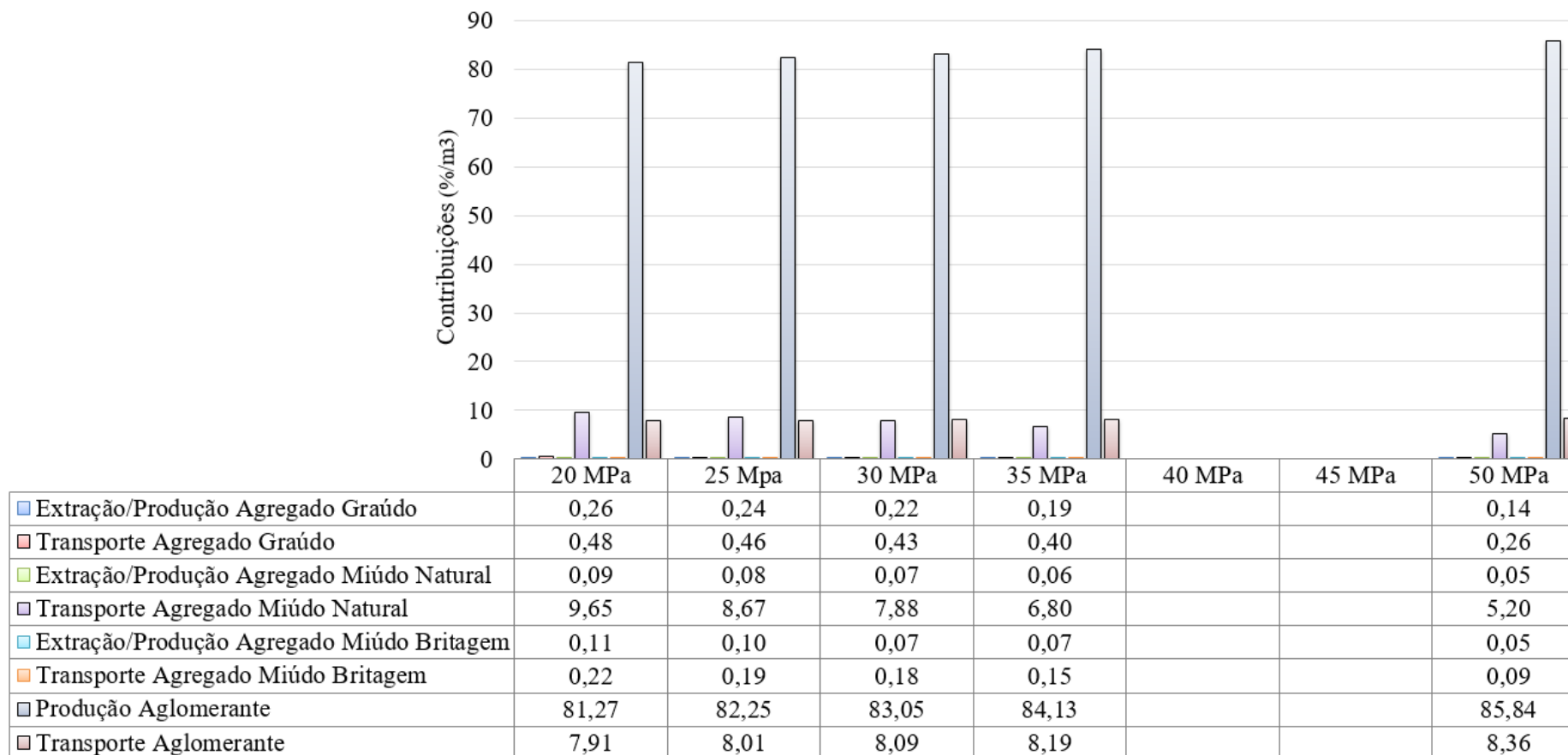
\*\* Quantitativos ajustados [20 MPa | 25 MPa | 30 MPa | 35 MPa | 50 MPa].

Fonte: O autor.



Uma nova base de dados de emissões de CO<sub>2</sub> denominada cenário 3 foi gerada, apresentando as contribuições percentuais indicadas no Gráfico 10. Igualmente aos cenários anteriores, constata-se a contribuição majoritária do aglomerante na fase de produção/extração, tendo também o transporte do aglomerante e do agregado miúdo natural, da mesma maneira que no cenário 1, contribuições mais significativas.

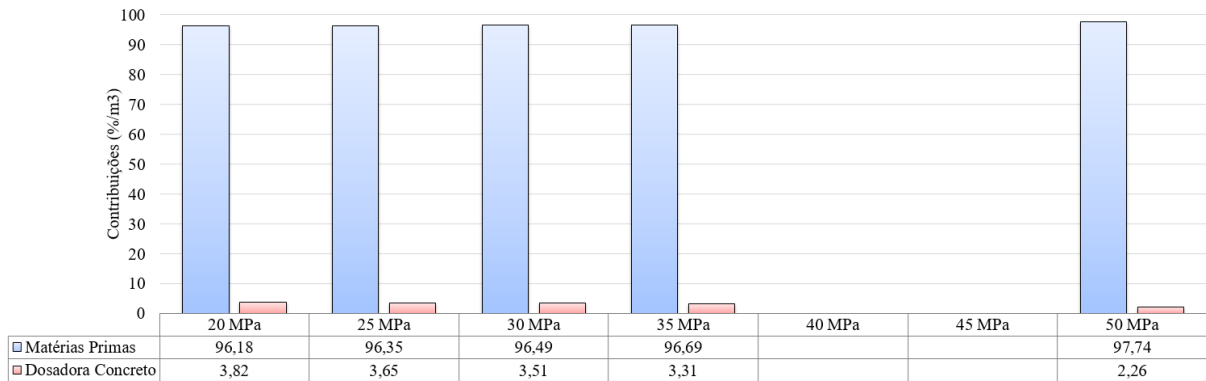
Gráfico 10 – Contribuições percentuais das matérias-primas nas emissões de CO<sub>2</sub> para cada metro cúbico de concreto (cenário 3).



Fonte: O autor.

Já as parcelas percentuais de contribuição da dosadora de concreto nas emissões de CO<sub>2</sub> para a produção de um metro cúbico de concreto ficaram entre 2% e 4%, Gráfico 11, ou seja, as menores entre os três cenários avaliados.

Gráfico 11 – Contribuições percentuais das matérias-primas e da dosadora de concreto nas emissões de CO<sub>2</sub> de um metro cúbico de concreto (cenário 3).



Fonte: O autor.

Nessa perspectiva, os valores das emissões totais de CO<sub>2</sub> gerados para este cenário, desde a produção ao transporte de um metro cúbico de concreto armado, estão apresentados na Tabela 23.

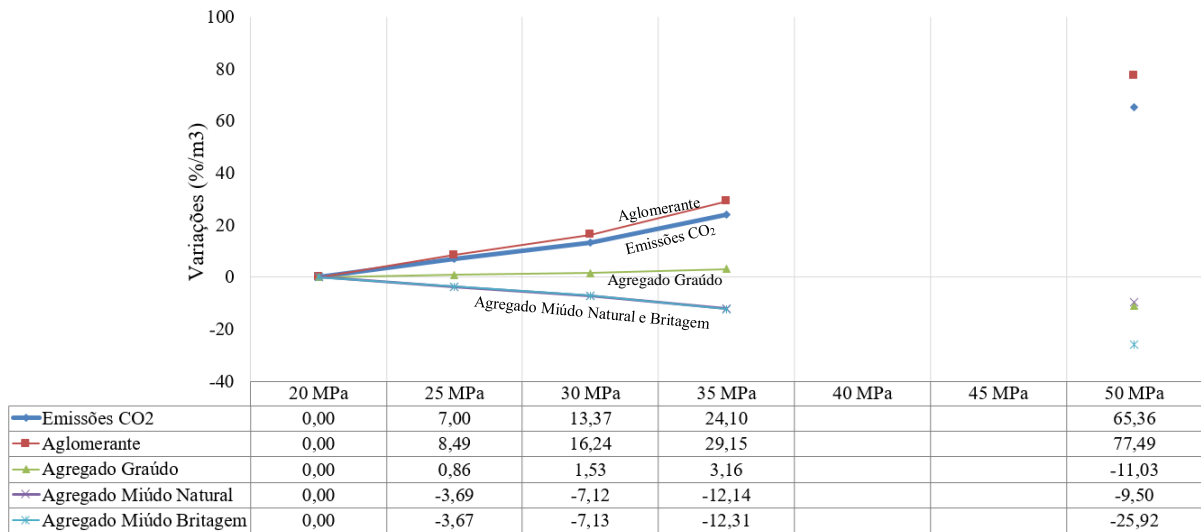
Tabela 23 – Emissões de CO<sub>2</sub> geradas a partir do software SimaPro ajustado (cenário 3).

Material	Emissão de CO <sub>2</sub>
Concreto – 20 MPa	307,59 KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Concreto – 25 MPa	329,12 KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Concreto – 30 MPa	348,76 KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Concreto – 35 MPa	381,72 KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Concreto – 50 MPa	508,63 KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Aço – CA 50 / CA 60	2,10 KgCO <sub>2</sub> /Kg
Forma Madeira	13,30 KgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>

Fonte: O autor.

Por sua vez, os valores obtidos para o concreto a partir do acréscimo da resistência característica de 20 MPa apresentaram variações percentuais que podem chegar até 65,36%, como observa-se através do Gráfico 12. E, ainda, verifica-se as variações percentuais nos quantitativos utilizados de cada matéria-prima do concreto, segundo a dosagem do traço.

Gráfico 12 – Variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> e dos quantitativos das matérias-primas utilizadas no concreto a partir da resistência de 20 MPa (cenário 3).



Fonte: O autor.

#### 4.4 CUSTOS DAS MATÉRIAS-PRIMAS DO CONCRETO ARMADO A PARTIR DO CUSTO MÉDIO DO MERCADO NA REGIÃO DE ESTUDO – CENÁRIO 4

A avaliação econômica do concreto armado para as diferentes resistências características do concreto foi realizada a partir dos valores de custos médios em moeda brasileira (real), com base no mês de maio de 2019, e levando em conta o mercado na região de estudo.

Os valores médios dos custos levantados apresentavam como condições de aquisição: concreto entregue na obra com utilização de bomba de recalque até a forma da estrutura; aço em carga fechada direto da siderúrgica entregue na obra; e madeira em guias de 15 cm em carga completa entregue na obra.

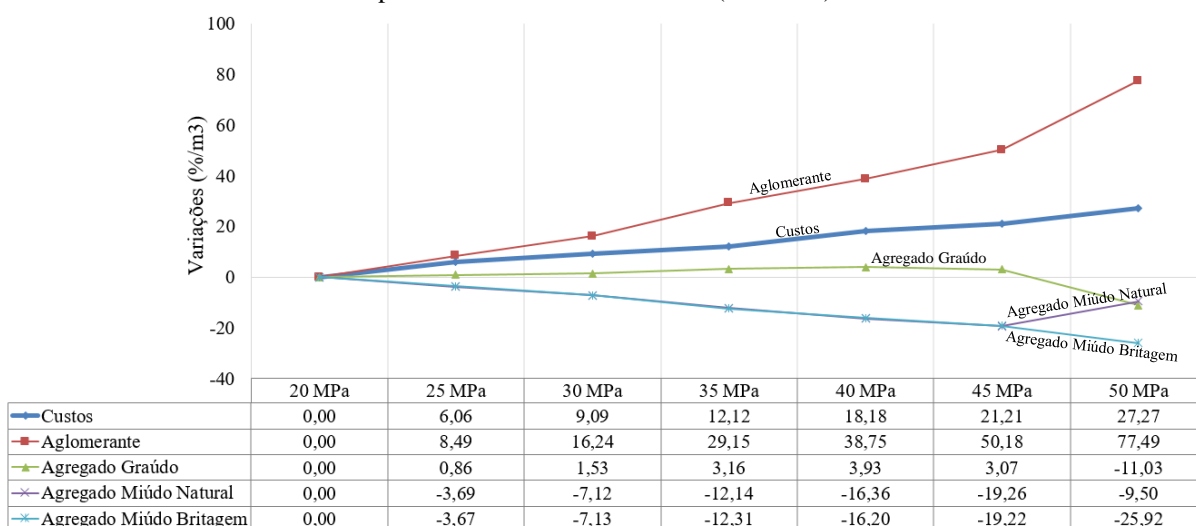
Assim sendo, os custos médios obtidos para todos os materiais envolvidos estão dispostos na Tabela 24 e são denominados de cenário 4. Observa-se que os valores dos custos alcançados para o concreto a partir do acréscimo da resistência característica de 20 MPa apresentaram variações percentuais consideravelmente menores do que as apresentadas nos cenários de emissões de CO<sub>2</sub>, chegando no máximo a 27,27% ao metro cúbico, conforme o Gráfico 13.

Tabela 24 – Custos médios dos materiais na região de estudo (cenário 4).

Material	Custos
Concreto – 20 MPa	330,00 R\$/m <sup>3</sup>
Concreto – 25 MPa	350,00 R\$/m <sup>3</sup>
Concreto – 30 MPa	360,00 R\$/m <sup>3</sup>
Concreto – 35 MPa	370,00 R\$/m <sup>3</sup>
Concreto – 40 MPa	390,00 R\$/m <sup>3</sup>
Concreto – 45 MPa	400,00 R\$/m <sup>3</sup>
Concreto – 50 MPa	420,00 R\$/m <sup>3</sup>
Aço – CA 50 / CA 60	3,82 / 4,15 R\$/Kg
Forma Madeira	28,05 R\$/m <sup>2</sup>

Fonte: O autor.

Gráfico 13 – Variações percentuais dos custos e dos quantitativos das matérias-primas utilizadas no concreto a partir da resistência de 20 MPa (cenário 4).



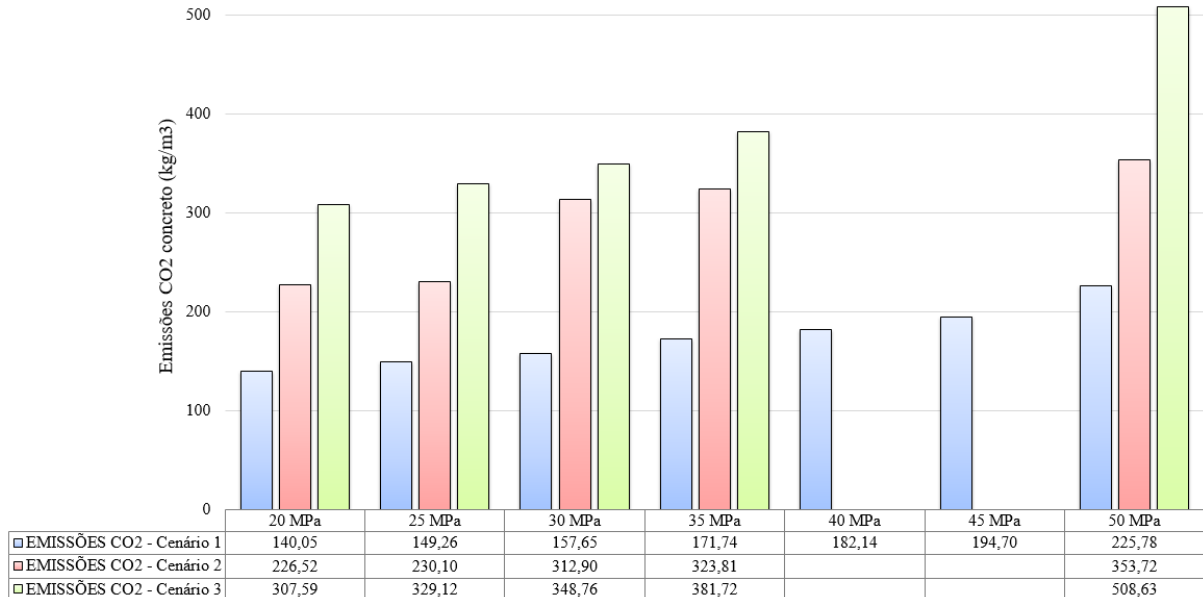
Fonte: O autor.

#### 4.5 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS VALORES QUANTIFICADOS PARA CADA UM DOS CENÁRIOS DE ESTUDO

Os valores de emissões de CO<sub>2</sub> quantificados para o concreto nos três cenários de estudo podem ser verificados no Gráfico 14, os quais apresentaram variações consideráveis a partir do acréscimo da resistência característica de 20 MPa, dispostas no Gráfico 15. Quando comparados os cenários de estudo 1 e 3, observa-se um comportamento semelhante nas variações percentuais em todas as resistências características do concreto, mesmo que os valores de cada cenário tenham apresentado diferenças de aproximadamente 120%. Pode-se concluir que a semelhança nas variações percentuais advém da utilização de dados da região de estudo do cenário 1 no ajuste da base de dados utilizados no software que gerou o cenário 3.

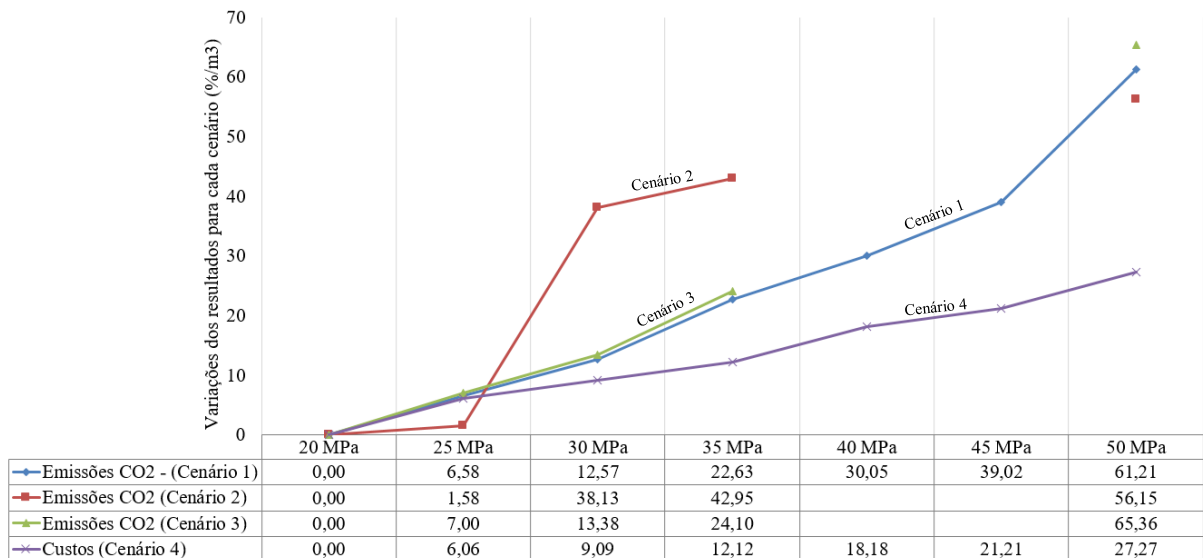
No mesmo Gráfico 15 pode-se observar as variações percentuais dos custos do concreto a partir do acréscimo da resistência característica de 20 MPa, onde verifica-se que as variações são aproximadamente 50% menores do que as das emissões de CO<sub>2</sub>.

Gráfico 14 – Valores das emissões de CO<sub>2</sub> do concreto para as diferentes resistências e cenários de estudo.



Fonte: O autor.

Gráfico 15 – Variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> e custos do concreto a partir da resistência de 20 MPa.



Fonte: O autor.

Quando comparados os valores obtidos para os aços, variações percentuais de até 100% entre os cenários de emissões de CO<sub>2</sub> são observadas; e quando comparadas as formas de madeira, os valores de variações apresentam percentuais muito maiores, chegando até a 1.250%.

## 5 DIMENSIONAMENTOS E AVALIAÇÕES DE ELEMENTOS E ESTRUTURA EM CONCRETO ARMADO A PARTIR DE CADA CENÁRIO DE ESTUDO

Considerando que concretos de maior resistência serão empregados em volumes menores, conclusões acerca de uma eventual vantagem de se utilizar uma ou outra resistência devem ser pautadas pelo adequado dimensionamento dos elementos estruturais. Nesse sentido, foram realizadas otimizações de seções transversais de vigas biapoiadas com diversos vãos livres e pilares isolados com diferentes esforços atuantes, bem como o dimensionamento de estrutura em concreto armado, segundo os critérios de impactos ambientais e custos, baseados nos valores obtidos para cada cenário de estudo.

Para efeitos de comparação e análise a partir dos dados obtidos e objetivando a minimização das emissões de CO<sub>2</sub> e dos custos do concreto armado, os materiais estruturais foram trabalhados com unidades em volume para o concreto, em peso para o aço e em metro quadrado para as formas.

### 5.1 DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO VISANDO A MINIMIZAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS E DOS CUSTOS.

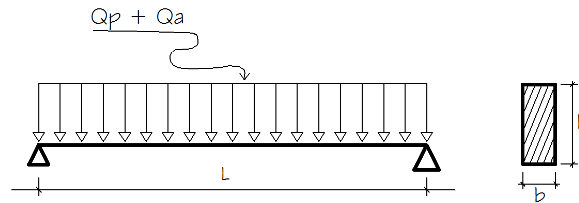
No decurso do dimensionamento otimizado das vigas utilizou-se o software desenvolvido por Kripka (2003) e posteriormente empregado por Medeiros e Kripka (2014) no estudo de vigas em concreto armado. O software efetua a associação da análise matricial de estruturas pelo Método dos Deslocamentos com o método de otimização *Simulated Annealing*, uma heurística desenvolvida por Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi (1983) em analogia ao processo de recozimento de metais. Na análise, as vigas podem ser consideradas de forma isolada ou compondo uma grelha.

Logo, o custo mínimo é obtido a partir da determinação da altura ótima de cada elemento ou grupo de elementos, atendidas as restrições relativas aos estados limites últimos e de utilização, segundo o preconizado na NBR 6118 (ABNT, 2014).

Isso posto, foram estudadas vigas biapoiadas com vãos livres ( $L$ ) variando de 3 a 12 m com incrementos de 0,5 m. A altura inicial ( $h$ ) de dimensionamento para todas as vigas foi arbitrada como sendo um décimo de seu vão livre. A largura ( $b$ ) adotada para as vigas foi fixada em 0,2 m. Já as cargas permanentes utilizadas foram de 9,5 kN/m ( $Qp$ ) e as cargas acidentais,

de 2,0 kN/m ( $Q_a$ ), conforme Figura 14. No caso, o problema ficou restrito a uma única variável de projeto, altura da viga ( $h$ ).

Figura 14 – Viga biapoiada otimizada

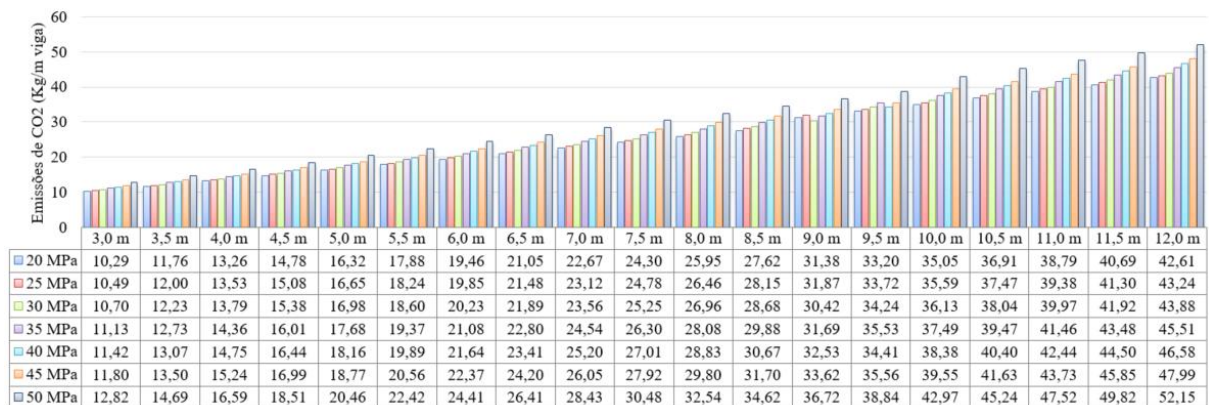


Fonte: O autor.

### 5.1.1 Avaliação das emissões de CO<sub>2</sub> do dimensionamento otimizado de vigas com a utilização de dados gerados para o cenário 1

Os resultados dos dimensionamentos otimizados das vigas, levando-se em conta os valores das emissões de CO<sub>2</sub> do cenário 1 para cada resistência característica do concreto, assim como os diferentes vãos livres, podem ser verificados no Gráfico 16 (maiores detalhes no apêndice B). Nota-se que o acréscimo da resistência característica tende a acrescer os valores finais das emissões de CO<sub>2</sub>, indicando a resistência característica menor do concreto como a mais viável ambientalmente nos diferentes vãos.

Gráfico 16 – Emissões de CO<sub>2</sub> das vigas otimizadas nos diferentes vãos e resistências de concreto (cenário 1).



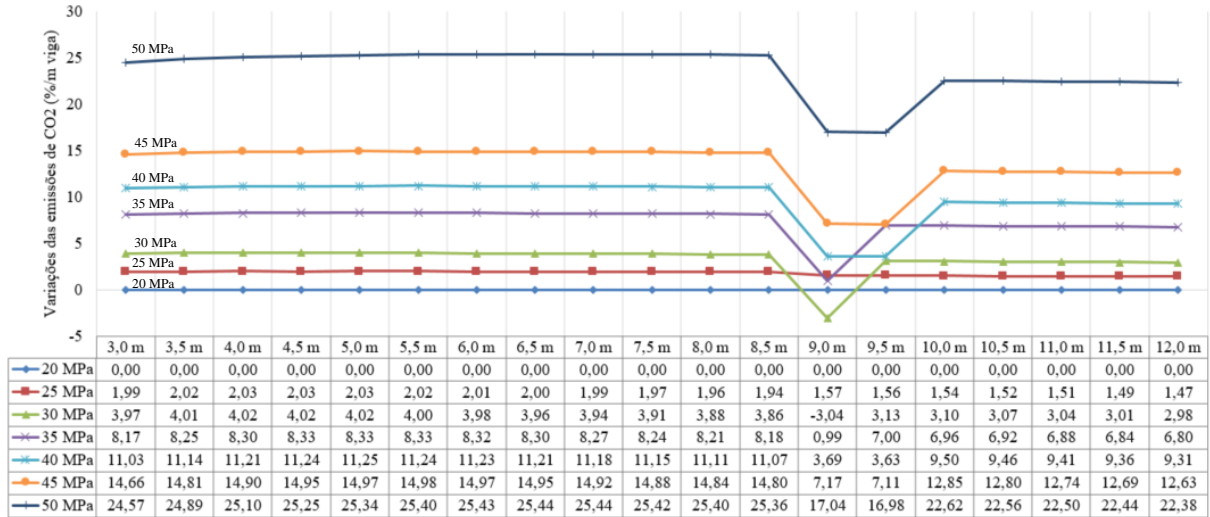
Fonte: O autor.

As variações percentuais dos valores das emissões de CO<sub>2</sub>, Gráfico 17, a partir do acréscimo da resistência característica de 20 Mpa, em sua maioria, são positivas para todos os vãos de viga dimensionados e tendem a aumentar com o acréscimo da resistência característica.



Assinala-se que uma mudança de comportamento localizada nos vãos de 9 e 9,5 metros é verificada devido ao início da exigência de norma da armadura de pele nas vigas.

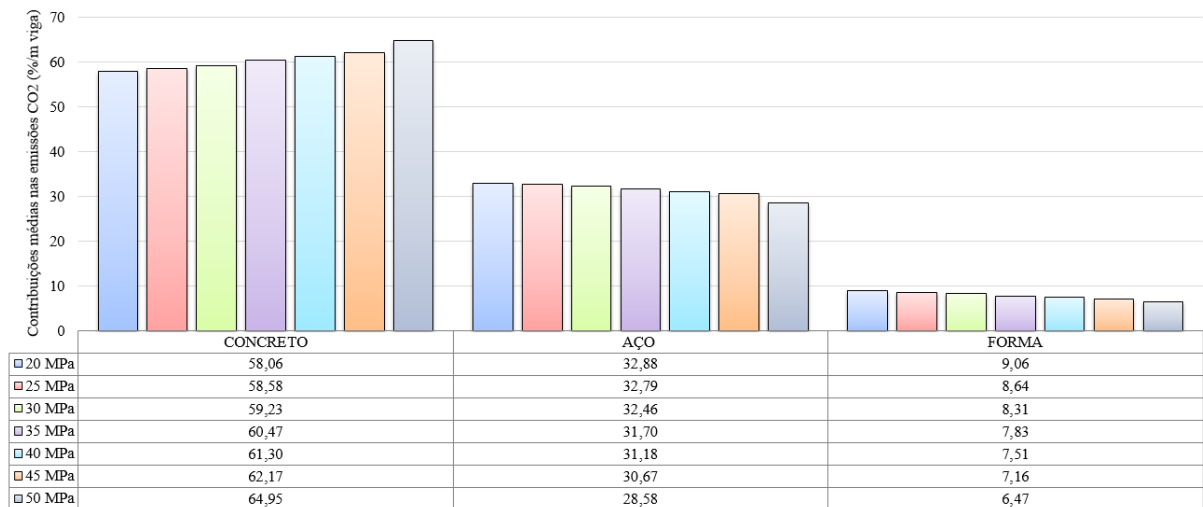
Gráfico 17 – Variações das emissões de CO<sub>2</sub> das vigas otimizadas a partir da resistência de 20 MPa (cenário 1).



Fonte: O autor.

As contribuições percentuais médias dos materiais constituintes do concreto armado nas emissões de CO<sub>2</sub> das vigas otimizadas deste cenário de estudo podem ser verificadas no Gráfico 18, tendo o concreto com a maior contribuição e crescendo com o aumento da resistência característica. Já o aço e a forma possuem contribuições menores e que decrescem com o aumento da resistência característica do concreto.

Gráfico 18 – Contribuições médias dos materiais nas emissões de CO<sub>2</sub> das vigas otimizadas (cenário 1).

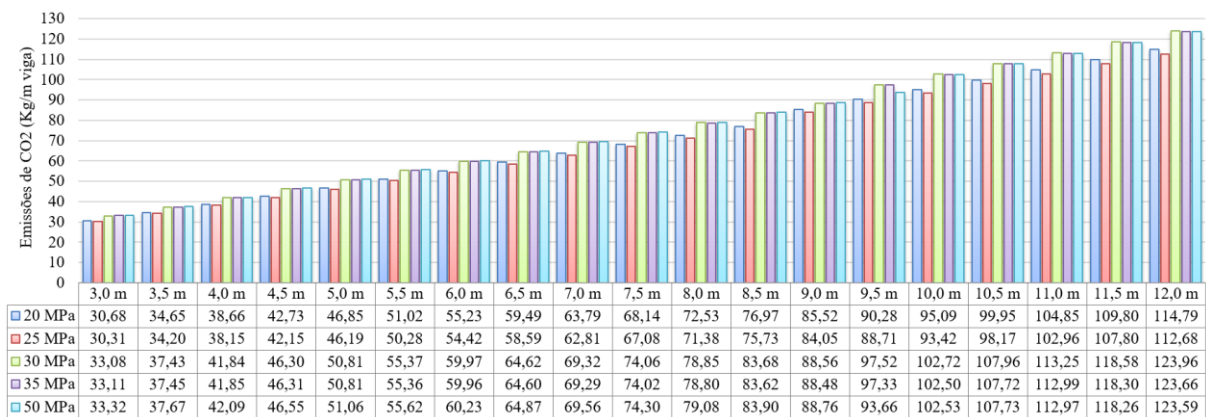


Fonte: O autor.

### 5.1.2 Avaliação das emissões de CO<sub>2</sub> do dimensionamento otimizado de vigas com a utilização de dados gerados para o cenário 2

Os resultados obtidos nos dimensionamentos otimizados para o cenário 2 são apresentados no Gráfico 19 (maiores detalhes no apêndice C), com as emissões de CO<sub>2</sub> totais das vigas para cada resistência característica e segundo os diferentes vãos estudados. Constatase que o acréscimo da resistência característica tende, na maioria dos casos, a crescer os valores finais das emissões de CO<sub>2</sub>, com exceção para a resistência de 25 MPa, a qual ocorre o inverso, o que aponta essa resistência característica como a mais viável ambientalmente.

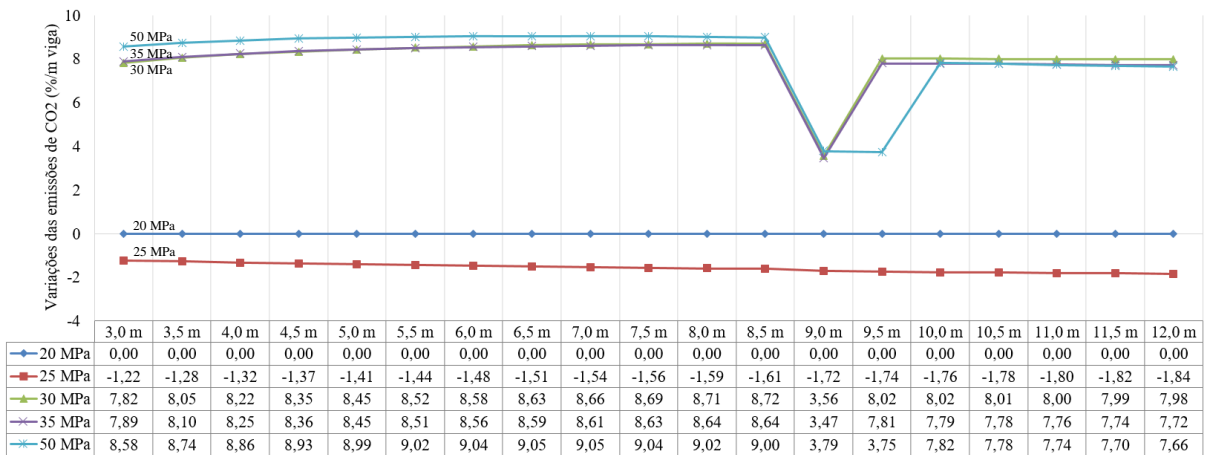
Gráfico 19 – Emissões de CO<sub>2</sub> das vigas otimizadas com diferentes vãos e resistências de concreto (cenário 2).



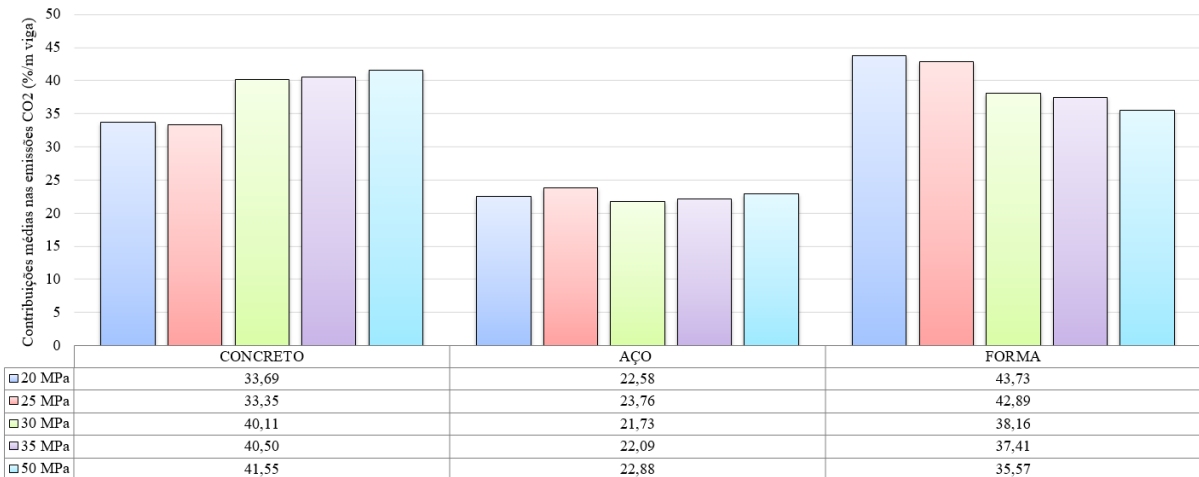
Fonte: O autor.

Igualmente, no Gráfico 20, verifica-se que as variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> em relação à resistência característica menor são, majoritariamente, positivas, tendo somente a resistência de 25 MPa negativa, confirmando a mesma conclusão apresentada no parágrafo anterior. A mudança de comportamento dos valores de emissões de CO<sub>2</sub>, quando dimensionados os vão de 9 e 9,5 metros, ocorre devido ao início da exigência de norma da armadura de pele nas vigas.

Em relação à contribuição média de cada material constituinte do concreto armado nos valores finais de emissões de CO<sub>2</sub>, Gráfico 21, o concreto e a forma se apresentam com contribuições maiores e mais semelhantes, já o aço se manifesta com parcelas menores.

Gráfico 20 – Variações das emissões de CO<sub>2</sub> das vigas otimizadas a partir da resistência de 20 MPa (cenário 2).

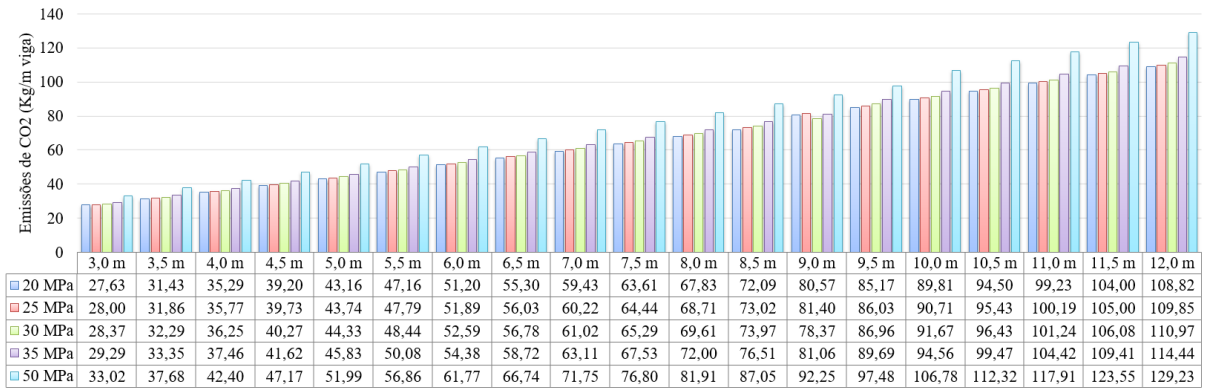
Fonte: O autor.

Gráfico 21 – Contribuições médias dos materiais nas emissões de CO<sub>2</sub> das vigas otimizadas (cenário 2).

Fonte: O autor.

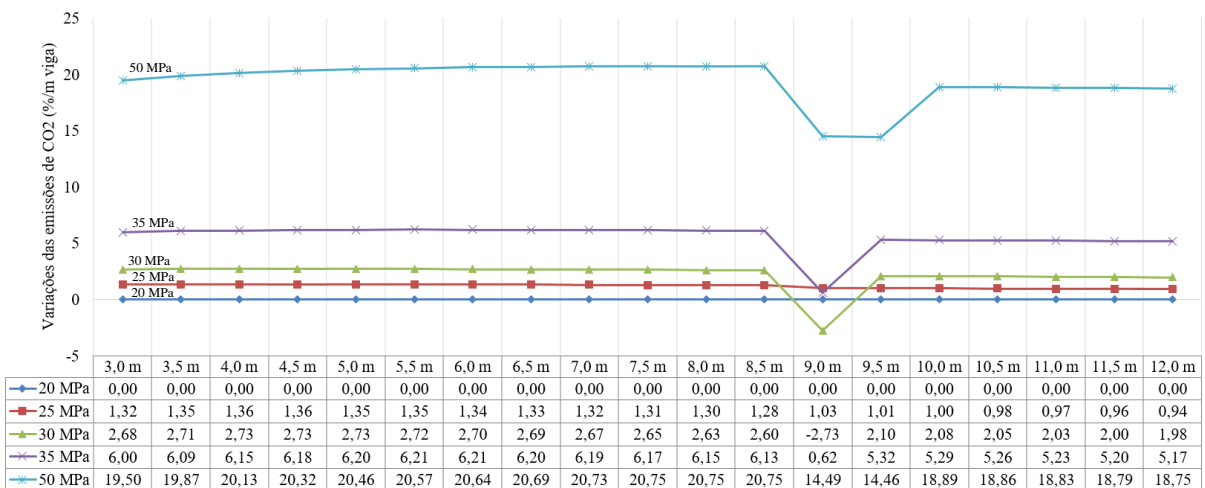
### 5.1.3 Avaliação das emissões de CO<sub>2</sub> do dimensionamento otimizado de vigas com a utilização de dados gerados para o cenário 3

O dimensionamento otimizado levando em conta as emissões de CO<sub>2</sub> do cenário 3 nas diferentes resistências características do concreto resultou nos dados dispostos no Gráfico 22 (maiores detalhes no apêndice D), no qual são observadas as variações nos valores da função para os diferentes vãos de vigas considerados. Os resultados obtidos para cada resistência característica do concreto, independente do vão dimensionado, apresentaram valores menores nas resistências menores, identificando a resistência de 20 MPa como a mais viável ambientalmente.

Gráfico 22 – Emissões de CO<sub>2</sub> das vigas otimizadas com diferentes vãos e resistências de concreto (cenário 3).

Fonte: O autor.

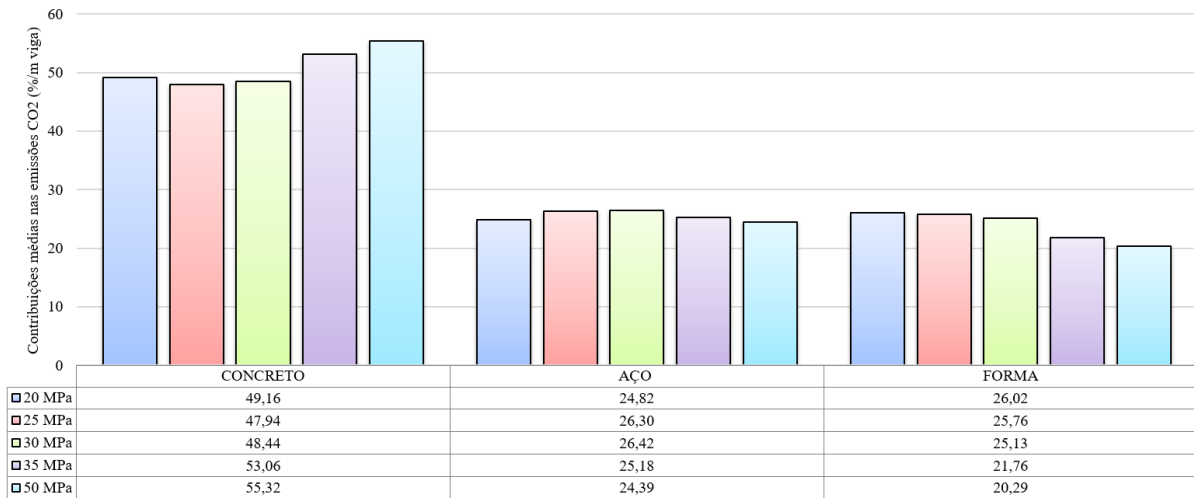
No Gráfico 23 verifica-se que as variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> em relação à resistência característica menor, de 20 MPa, são positivas em quase todos os vãos de viga dimensionados, confirmando a conclusão do parágrafo anterior. Contudo, uma mudança de comportamento localizada nos vãos de 9 e 9,5 m é indicada, devido ao início da exigência de norma da armadura de pele nas vigas, da mesma maneira que ocorreu nos cenários de estudo anteriores.

Gráfico 23 – Variações das emissões de CO<sub>2</sub> das vigas otimizadas a partir da resistência de 20 MPa (cenário 3).

Fonte: O autor.

Já no Gráfico 24 pode-se observar as contribuições percentuais médias nas emissões de CO<sub>2</sub> dos materiais constituintes do concreto armado, em que o concreto apresenta as maiores contribuições, e o aço e forma exprimem contribuições semelhantes e menores.

Gráfico 24 – Contribuições médias dos materiais nas emissões de CO<sub>2</sub> das vigas otimizadas (cenário 3).

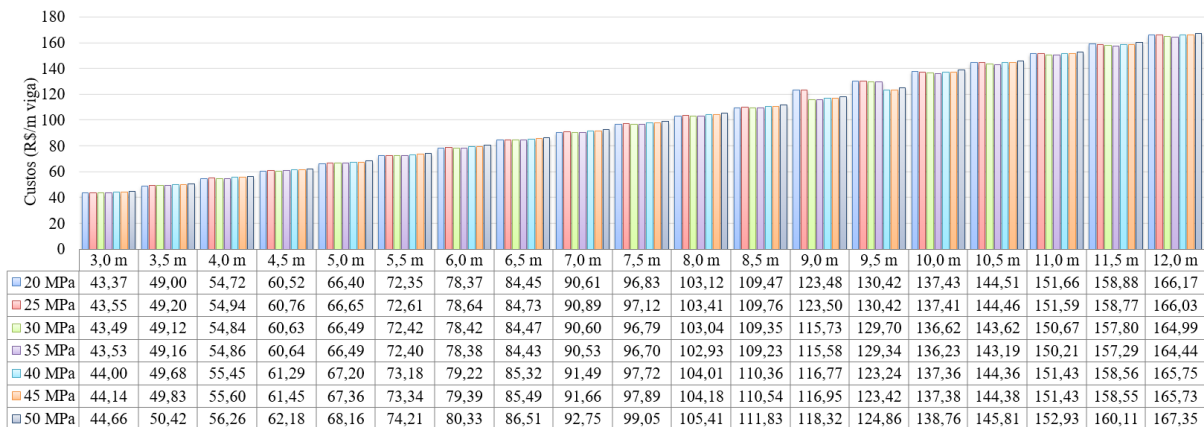


Fonte: O autor.

#### 5.1.4 Avaliação financeira do dimensionamento otimizado de vigas com a utilização dos dados gerados para o cenário 4

O dimensionamento otimizado das vigas levando em conta os custos do cenário 4 nas diferentes resistências do concreto gerou os resultados apresentados no Gráfico 25 (maiores detalhes no apêndice E), no qual são observadas as variações nos valores da função para os diferentes vãos de vigas considerados. Pode-se concluir que os resultados mais viáveis variam com as mudanças das dimensões dos vãos das vigas.

Gráfico 25 – Custos das vigas otimizadas com diferentes vãos e resistências de concreto (cenário 4)



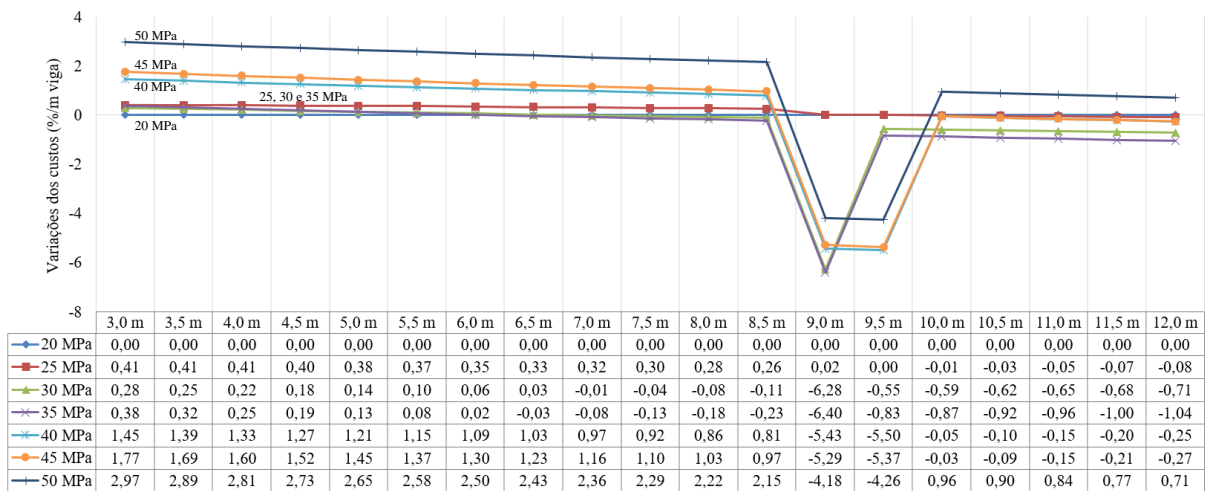
Fonte: O autor.

No Gráfico 26 as variações percentuais dos custos em relação ao acréscimo da resistência característica de 20 MPa são apresentadas e indicam serem positivas a partir dos

vãos menores e negativas para os vãos maiores, condicionando a escolha da resistência característica do concreto mais viável economicamente ao vão da viga a ser dimensionada.

Essas variações se apresentam pequenas quando observadas pela mudança da resistência, em até aproximadamente 4%, se comparadas com as variações das emissões de CO<sub>2</sub>, que chegaram até 25,44%. Da mesma forma, existe a mudança de comportamento nos vãos de 9 e 9,5 metros, devido ao início da exigência de norma da armadura de pele nas vigas.

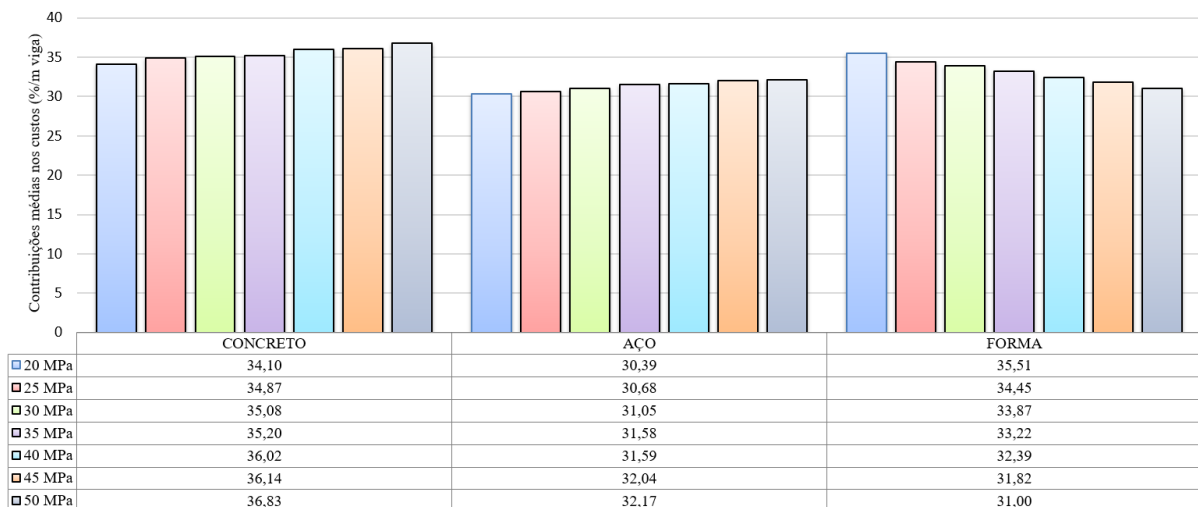
Gráfico 26 – Variações dos custos das vigas otimizadas a partir da resistência de 20 MPa (cenário 4).



Fonte: O autor.

Já no Gráfico 27 verifica-se que a contribuição média dos materiais constituintes do concreto armado nos custos é semelhante para os três materiais.

Gráfico 27 – Contribuições médias dos materiais nos custos das vigas otimizadas (cenário 4).



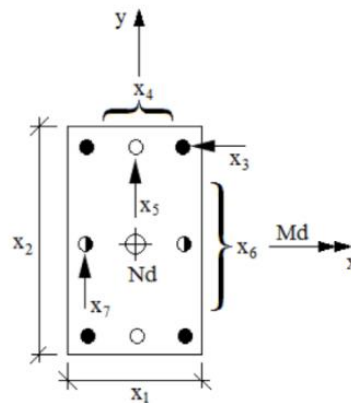
Fonte: O autor.

## 5.2 DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE PILARES DE CONCRETO ARMADO VISANDO A MINIMIZAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS E DOS CUSTOS

A minimização do custo e dos impactos também foi avaliada para seções de pilares de concreto armado submetidos à flexo-compressão reta. Para o presente estudo foi utilizado um programa base desenvolvido por Bordignon e Kripka (2013) atualizado para a NBR 6118 (ABNT, 2014), associando a otimização com o emprego do algoritmo *Simulated Annealing* a uma rotina para verificação da capacidade resistente de pilares.

A formulação do problema de otimização partiu da consideração de alguns parâmetros de entrada, basicamente esforços atuantes na seção ( $N_d$  e  $M_d$ ), as características dos materiais envolvidos e as emissões de  $CO_2$  ou custos. As variáveis de projeto foram consideradas como discretas: os valores relacionados ao dimensionamento da seção transversal de concreto ( $x_1$  e  $x_2$ ) variando a cada centímetro; já as áreas, quantidades e disposição das armaduras ( $x_3$ ,  $x_4$ ,  $x_5$ ,  $x_6$  e  $x_7$ ) limitadas a valores comerciais, conforme Figura 15.

Figura 15 – Variáveis de projeto da otimização do pilar



Fonte: O autor.

Em consonância, a função objetivo busca encontrar uma configuração para a seção do pilar que corresponda ao mínimo custo ou impacto e, ao mesmo tempo, permita que a seção gerada resista aos esforços atuantes e atenda aos limites especificados pela NBR 6118 (ABNT, 2014), isto é, relativos aos critérios de resistência e disposições construtivas.

Dessa forma, a função emissão ou custo a ser minimizada no processo de otimização considera a emissão ou custo total dos materiais concreto, aço e forma, podendo ser expressa pela Equação (5).

$$F = (A_{\text{con}}).C_c + (A_{\text{s Total}}). C_s + 2. (b+h). C_f \quad (5)$$

A primeira parcela da função representa a emissão ou custo do concreto, em que  $C_c$  é dado por unidade de volume; a segunda exprime a emissão ou custo da armadura longitudinal, sendo  $C_s$  dado por unidade de massa e  $g_s$  o peso específico do aço; e a última parcela configura a emissão ou custo relativo a forma, onde  $C_f$  é dado por unidade de área. Todos fornecem um valor relativo para cada unidade de comprimento do elemento otimizado.

À vista disso, a formulação final a ser empregada no processo pode ser reescrita em função das variáveis, conforme Equação (6).

$$\text{Minimizar } F(x) = (x_1.x_2). C_c + (4.x_3 + 2.x_4.x_5 + 2.x_6.x_7).(p/4). g_s.C_s + 2.(x_1+x_2).C_f \quad (6)$$

A partir dessa formulação foram otimizadas as emissões de  $\text{CO}_2$  e custos de quatro seções de pilares com esforços atuantes e crescentes, conforme indicado na Tabela 25.

Tabela 25 – Valores dos esforços atuantes nas seções dos pilares.

Pilar	N (kN)	M (kN.cm)
P1	500	6250
P2	2250	28125
P3	5000	62500
P4	7250	90625

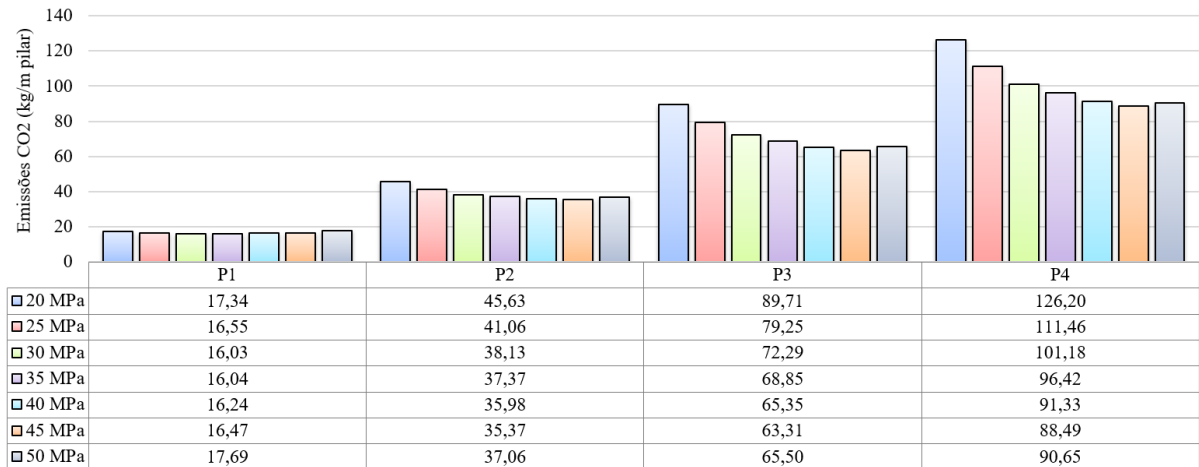
Fonte: O autor.

### 5.2.1 Avaliação das emissões de $\text{CO}_2$ do dimensionamento otimizado de pilares com a utilização de dados gerados para o cenário 1

O Gráfico 28, com o comportamento dos valores de emissões por metro linear de pilar, foi gerado após a otimização dos pilares utilizando os valores de emissões de  $\text{CO}_2$  obtidos para os materiais no cenário 1 e a variação da resistência característica do concreto e dos esforços atuantes (maiores detalhes no apêndice F).

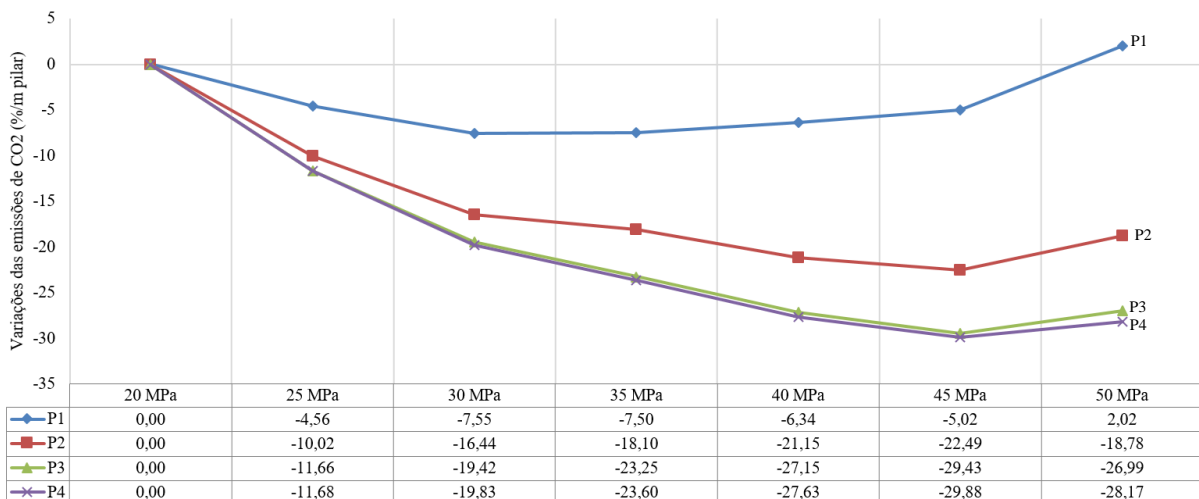
Logo, as emissões de  $\text{CO}_2$ , em sua maioria, diminuem progressivamente com o acréscimo da resistência característica para todos os valores de esforços atuantes. A exceção apresenta-se para os resultados da resistência característica de 50 MPa dos pilares, na qual ocorre um acréscimo dos valores de emissões de  $\text{CO}_2$  se comparado com os resultados da resistência característica anterior, a de 45 MPa. Assim sendo, a resistência característica mais viável ambientalmente para este cenário de estudo, em geral, foi a de 45 MPa.



Gráfico 28 – Emissões CO<sub>2</sub> dos pilares otimizados com diferentes esforços e resistências de concreto (cenário 1).

Fonte: O autor.

Para mais, segundo o Gráfico 29, as variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> a partir do acréscimo da resistência característica do concreto de 20 MPa nos pilares são, preponderantemente, negativas. Essas variações confirmam que o melhor resultado obtido para a maioria dos pilares foi a resistência característica de 45 MPa. Ainda, observa-se que o acréscimo do valor dos esforços atuantes no pilar e o acréscimo da resistência característica do concreto geram maiores variações das emissões de CO<sub>2</sub>.

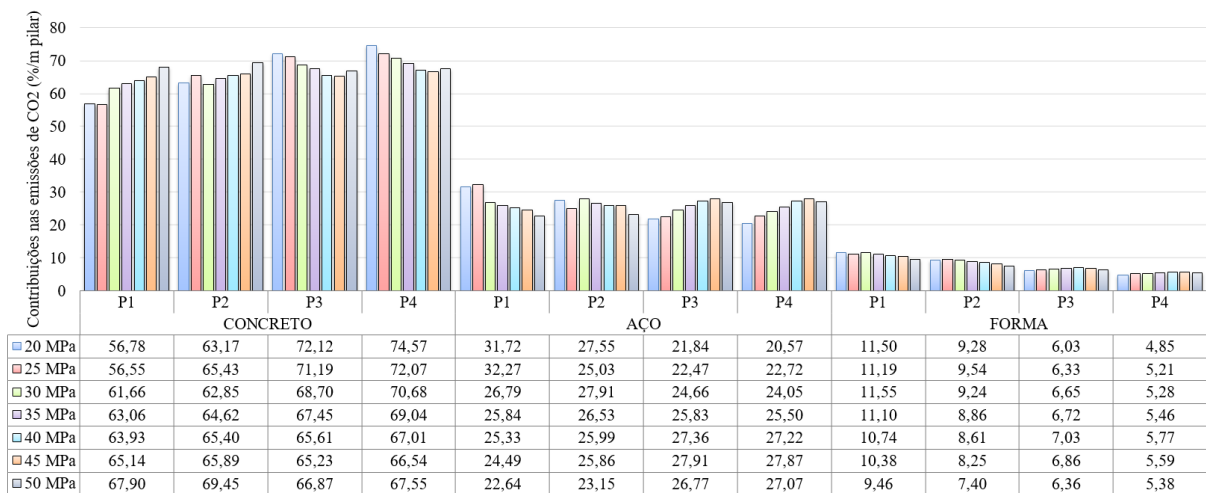
Gráfico 29 – Variações das emissões de CO<sub>2</sub> dos pilares otimizados a partir da resistência de 20 MPa (cenário 1).

Fonte: O autor.

Em relação ao comportamento da taxa de armadura longitudinal dos pilares, constata-se que a maioria se mantém bem próxima à mínima exigida por norma.

As contribuições médias nas emissões de CO<sub>2</sub> de cada material que constitui o concreto armado dos pilares otimizados, Gráfico 30, indicam o concreto como o maior contribuinte. Verifica-se, também, que o P1 e o P2 com os esforços atuantes menores possuem um acréscimo da contribuição do concreto e um decréscimo da contribuição do aço com o aumento da resistência do concreto. Já para os P3 e P4, que possuem os esforços atuantes maiores, as contribuições do concreto e aço se invertem com o acréscimo da resistência do concreto. E, para as formas, as variações são pequenas nas contribuições, ficando entre 1% e 2%.

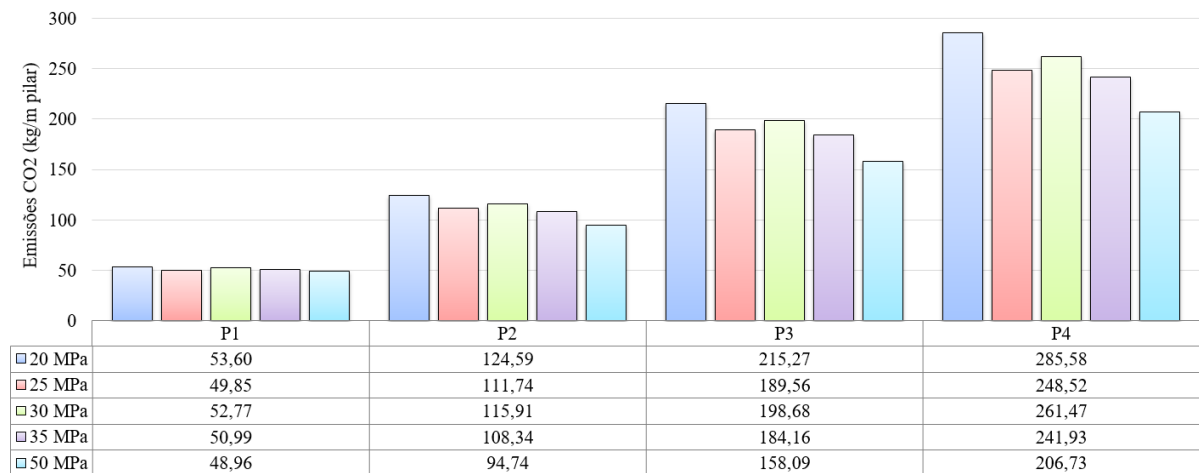
Gráfico 30 – Contribuições dos materiais nas emissões de CO<sub>2</sub> dos pilares otimizados (cenário 1).



Fonte: O autor.

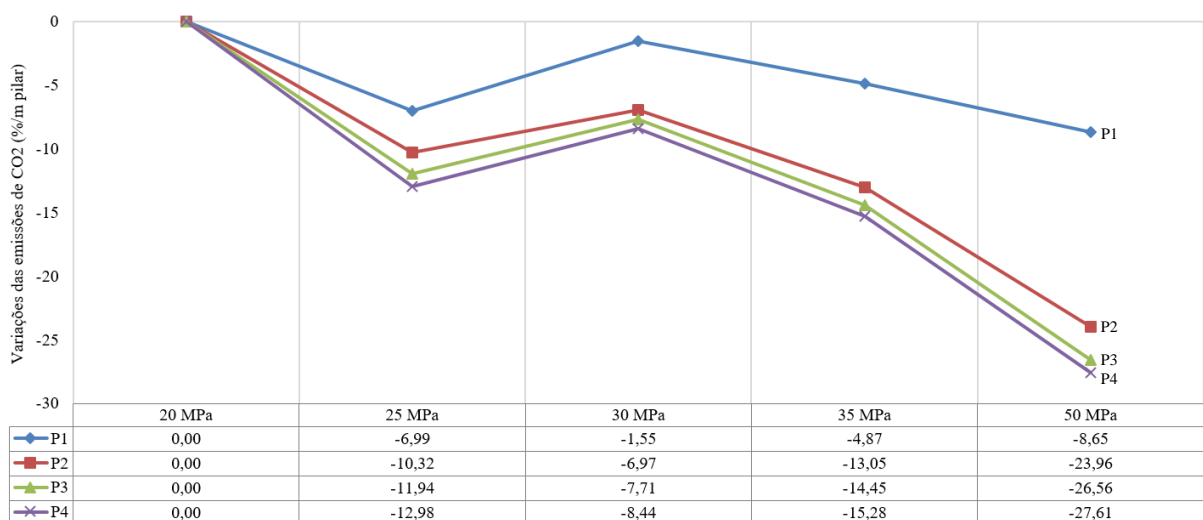
## 5.2.2 Avaliação das emissões de CO<sub>2</sub> do dimensionamento otimizado de pilares com a utilização de dados gerados para o cenário 2

O comportamento dos valores finais das emissões de CO<sub>2</sub> do dimensionamento otimizado para o cenário de estudo 2, variando-se a resistência característica do concreto e os esforços atuantes, podem ser observados no Gráfico 31 (maiores detalhes no apêndice G). As emissões de CO<sub>2</sub>, em sua maioria, diminuem progressivamente com o acréscimo da resistência característica do concreto para todos os esforços atuantes, com a exceção da resistência característica de 30 Mpa, onde ocorre um acréscimo de emissões de CO<sub>2</sub> – se comparado com os resultados da resistência característica de 25 Mpa – devido ao significativo acréscimo da utilização de aglomerante no traço de 30 MPa. Desse modo, o valor mais viável ambientalmente neste cenário de estudo para todos os pilares é o concreto com resistência característica maior, ou seja, de 50 MPa.

Gráfico 31 – Emissões CO<sub>2</sub> dos pilares otimizados com diferentes esforços e resistências de concreto (cenário 2).

Fonte: O autor.

Já quando analisadas as variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> a partir do acréscimo da resistência característica de 20 Mpa, verifica-se, conforme disposto no Gráfico 32, que a maioria dos pilares executados com concreto de maior resistência gera menores emissões de CO<sub>2</sub>. Para além, existe uma mudança de comportamento na resistência de 30 MPa se comparado a de 25 Mpa, mas confirma-se que o melhor resultado obtido advém da resistência característica de 50 MPa. Também, observa-se que o acréscimo do valor dos esforços atuantes no pilar e o acréscimo da resistência característica do concreto ocasionam um aumento na variação das emissões de CO<sub>2</sub>.

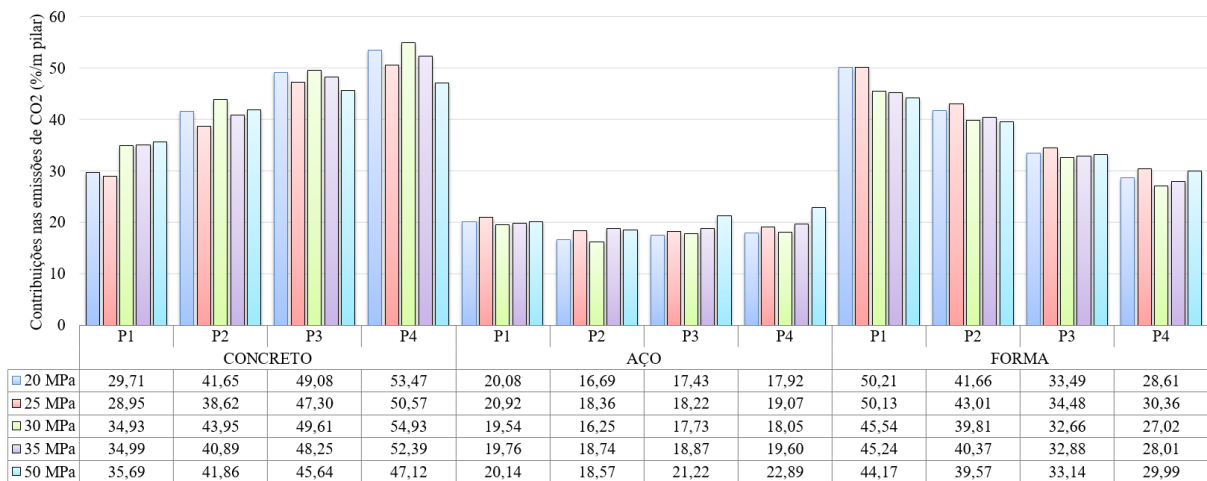
Gráfico 32 – Variações das emissões de CO<sub>2</sub> dos pilares otimizados a partir da resistência de 20 MPa (cenário 2).

Fonte: O autor.

Em relação ao comportamento da taxa de armadura longitudinal dos pilares, constata-se que a maioria se mantém próxima à mínima exigida por norma.

Quanto às contribuições percentuais nas emissões de CO<sub>2</sub> de cada material constituinte do concreto armado, representadas através do Gráfico 33, o concreto, na maioria dos casos, amplia sua contribuição com o acréscimo de sua resistência característica e esforço atuante, em compensação a forma possui o comportamento inverso. Já para os aços as contribuições se mantêm bem próximas e sem muitas variações quando se acresce a resistência característica e os esforços.

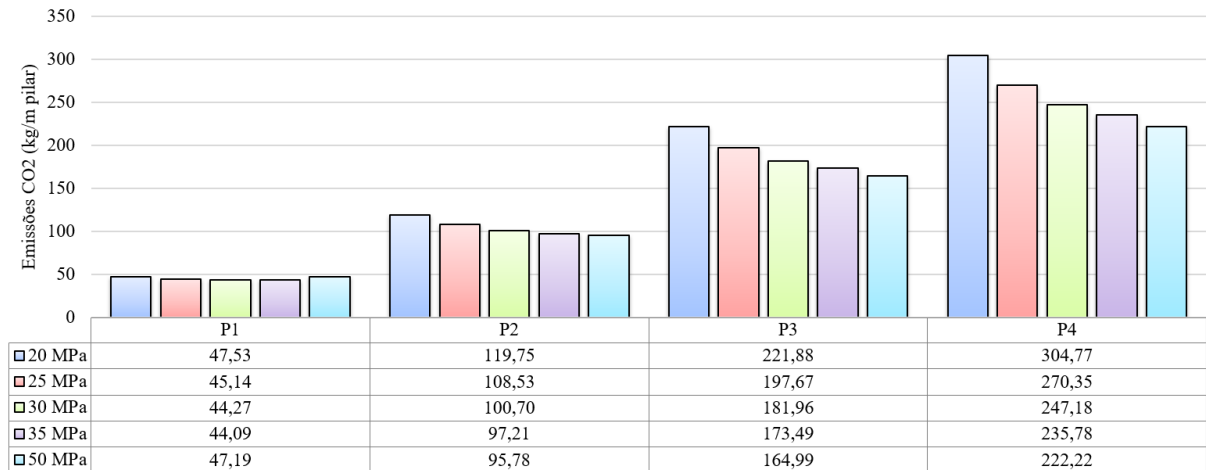
Gráfico 33 – Contribuições dos materiais nas emissões de CO<sub>2</sub> dos pilares otimizados (cenário 2).



Fonte: O autor.

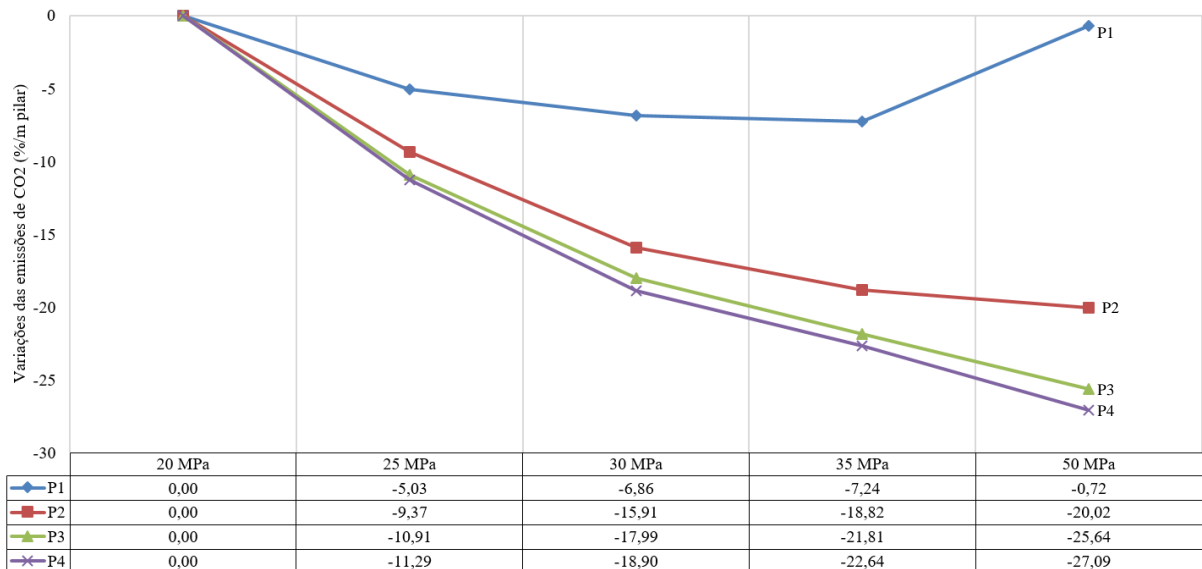
### 5.2.3 Avaliação das emissões de CO<sub>2</sub> do dimensionamento otimizado de pilares utilizando dados gerados para o cenário 3

O dimensionamento otimizado dos pilares considerando os valores de emissões de CO<sub>2</sub> dos materiais do cenário de estudo 3 gerou os resultados do Gráfico 34 (maiores detalhes no apêndice H), no qual se verifica o comportamento dos valores em que a resistência característica do concreto e os esforços atuantes variam. Os valores de emissões de CO<sub>2</sub>, em sua maioria, diminuem progressivamente com o acréscimo da resistência característica para todos os valores de esforços atuantes, indicando a maior resistência característica do concreto como a mais viável ambientalmente.

Gráfico 34 – Emissões CO<sub>2</sub> dos pilares otimizados com diferentes esforços e resistências de concreto (cenário 3).

Fonte: O autor.

As variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> a partir do acréscimo da resistência podem ser verificadas no Gráfico 35, confirmando que a maioria dos pilares executados com concreto de maior resistência característica geram menores emissões de CO<sub>2</sub>. Além disso, observa-se que o acréscimo no valor dos esforços atuantes no pilar e o acréscimo da resistência característica do concreto geram variações maiores nos valores das emissões de CO<sub>2</sub> finais.

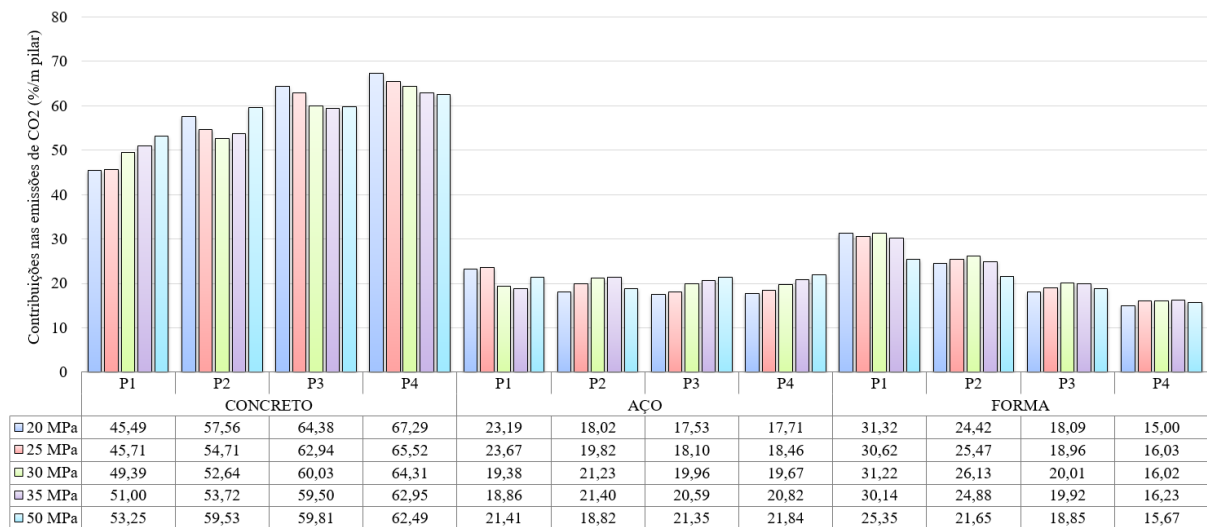
Gráfico 35 – Variações das emissões de CO<sub>2</sub> dos pilares otimizados a partir da resistência de 20 MPa (cenário 3).

Fonte: O autor.

Em relação ao comportamento da taxa de armadura longitudinal dos pilares, a maioria se mantém próxima à mínima exigida por norma.

Sendo assim, as contribuições médias de cada material constituinte do concreto armado nas emissões de CO<sub>2</sub> indicam que esforços atuantes menores tendem a ter acréscimo na contribuição do concreto e decréscimo da contribuição do aço quando se aumenta a resistência do concreto. Já para os esforços atuantes maiores ocorre uma inversão de comportamento. Para as formas, as contribuições se apresentam decrescentes com o acréscimo dos esforços atuantes nos pilares, de acordo com o Gráfico 36.

Gráfico 36 – Contribuições dos materiais nas emissões de CO<sub>2</sub> dos pilares otimizados (cenário 3).



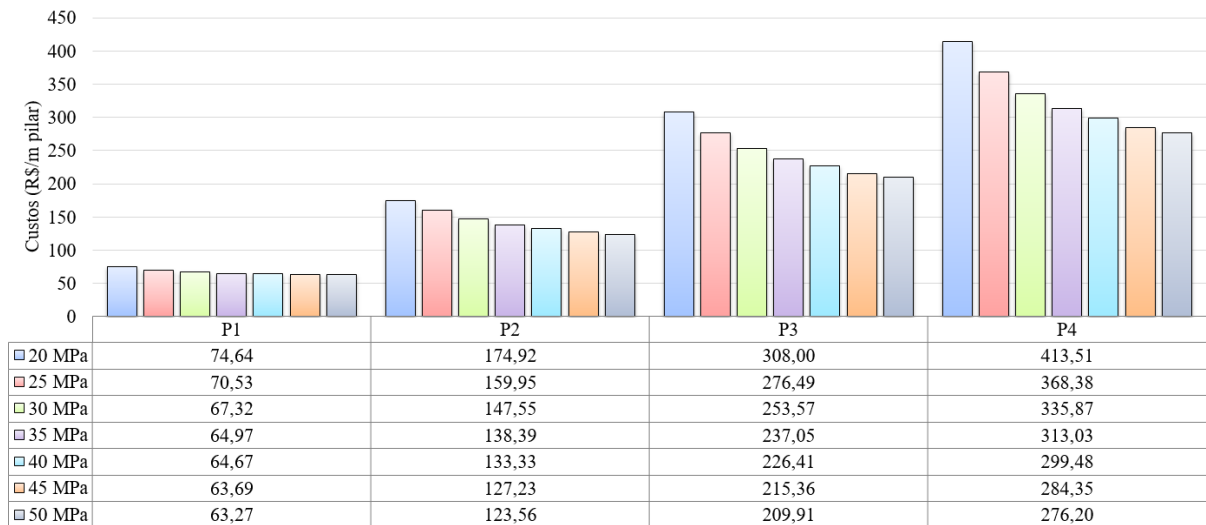
Fonte: O autor.

#### 5.2.4 Avaliação financeira do dimensionamento otimizado de pilares com a utilização dos dados gerados para o cenário 4

O comportamento dos custos no dimensionamento otimizado dos pilares, cenário 4 de estudo, variando-se a resistência característica do concreto e os esforços atuantes, pode ser verificado no Gráfico 37 (maiores detalhes no apêndice I), no qual se constata que os custos diminuem progressivamente com o acréscimo da resistência característica do concreto em todos os valores de esforços atuantes avaliados.

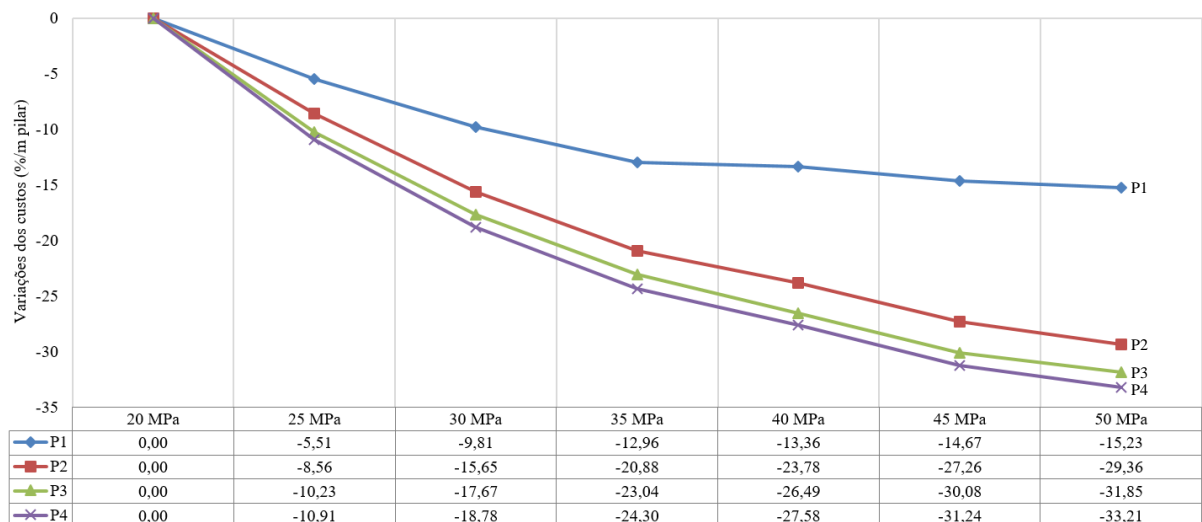
Quando analisadas as variações percentuais dos custos a partir do acréscimo da resistência característica, nota-se, conforme o Gráfico 38, que os pilares executados com concreto de maior resistência geram menores custos, sendo o melhor resultado obtido para a resistência característica de 50 MPa. Também, observa-se que o acréscimo do valor dos esforços atuantes no pilar e o acréscimo da resistência característica do concreto ocasionam um acréscimo nas variações percentuais dos custos.

Gráfico 37 – Custos dos pilares otimizados com diferentes esforços e resistências de concreto (cenário 4).



Fonte: O autor.

Gráfico 38 – Variações dos custos dos pilares otimizados a partir da resistência de 20 MPa (cenário 4).

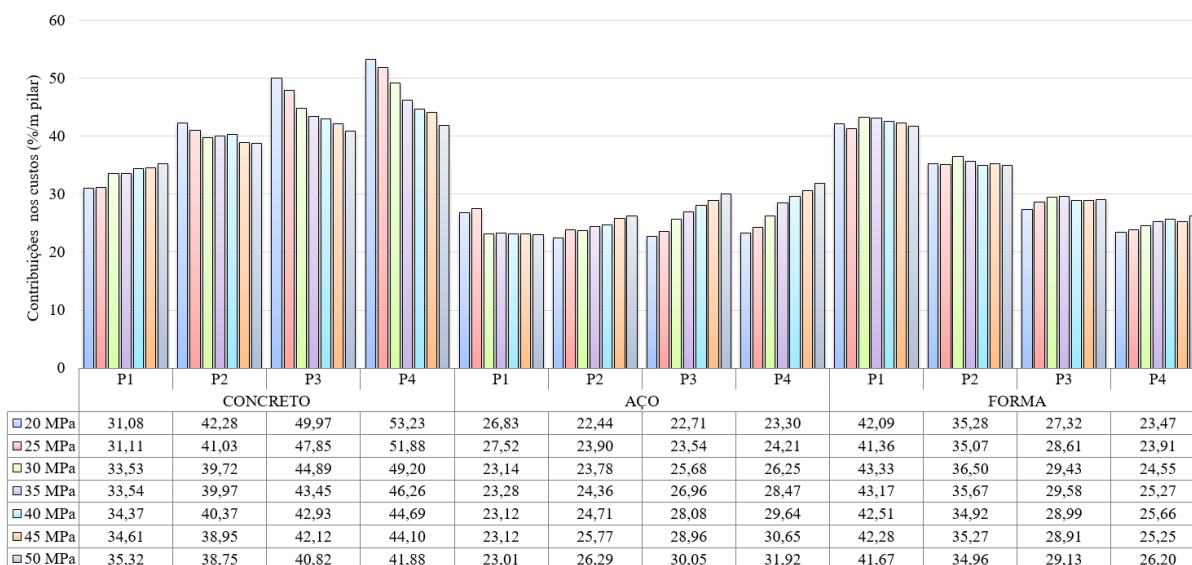


Fonte: O autor.

Em relação ao comportamento da taxa de armadura longitudinal dos pilares, em sua maioria, mantém-se próxima à mínima exigida por norma.

No tocante às contribuições de cada material nos custos dos pilares otimizados, Gráfico 39, o concreto se apresenta com maiores contribuições para os esforços atuantes maiores, e as formas demonstram o comportamento inverso. Já os aços mantêm-se com contribuições semelhantes para todos os valores de esforços atuantes.

Gráfico 39 – Contribuições dos materiais nos custos dos pilares otimizados (cenário 4).



Fonte: O autor.

### 5.3 DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURA EM CONCRETO ARMADO COM AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> E DOS CUSTOS

Este estudo engloba avaliações e comparações do comportamento das emissões de CO<sub>2</sub> e dos custos de uma estrutura em concreto armado dimensionada para diversas resistências características do concreto.

Nessa perspectiva, a edificação é composta pelo pavimento de garagens, pavimento térreo, oito pavimentos tipos com dois apartamentos por andar, pavimento de cobertura e pavimento de casa de máquinas e reservatório. Na Figura 16 apresenta-se a planta de arquitetura do pavimento tipo. E os componentes da estrutura, como as lajes maciças, as vigas e os pilares em concreto armado, podem ser verificados na planta de formas do pavimento tipo representada pela Figura 17.

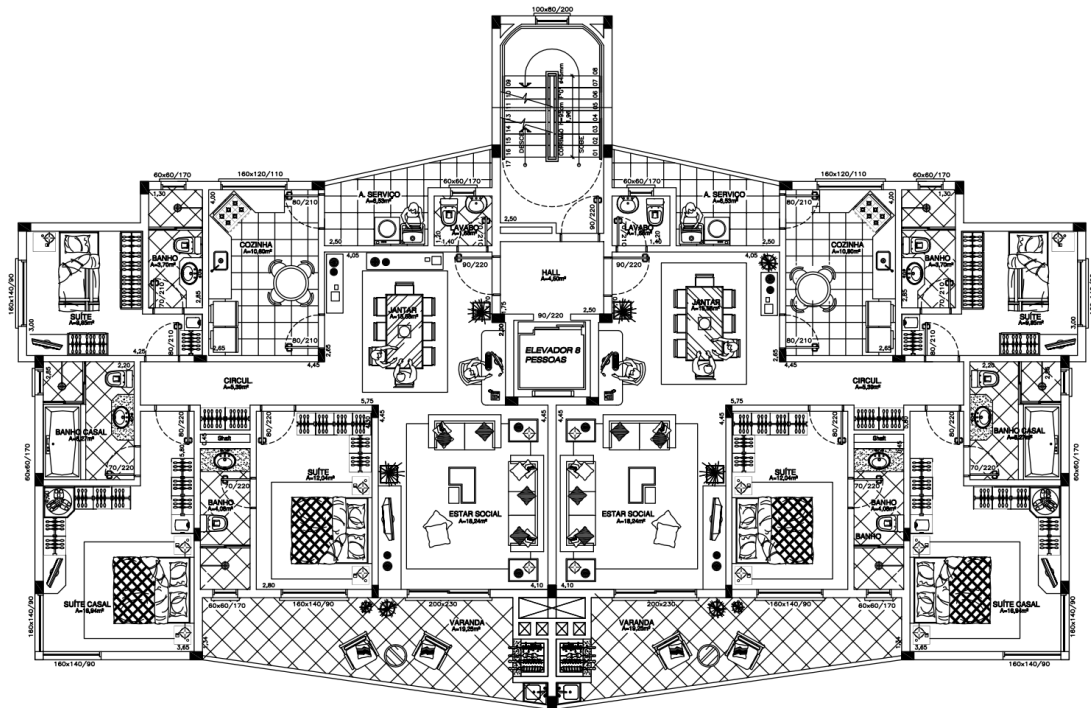
Convém destacar que o sistema estrutural em concreto armado tem como função principal dar suporte ao edifício, portanto, devem ser respeitados os requisitos mínimos da NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimentos (ABNT, 2014) e suas referências normativas, assim como as prescrições da NBR 6120 – Cargas para cálculo de estruturas de edificações (ABNT, 1980).

Já para análise e dimensionamento da estrutura utilizou-se o programa da AltoQi Eberick 2018 Pro para estruturas com até 12 pavimentos, do Instituto Federal Sul-Rio-Grandense, campus Passo Fundo. A classe de agressividade ambiental adotada foi a



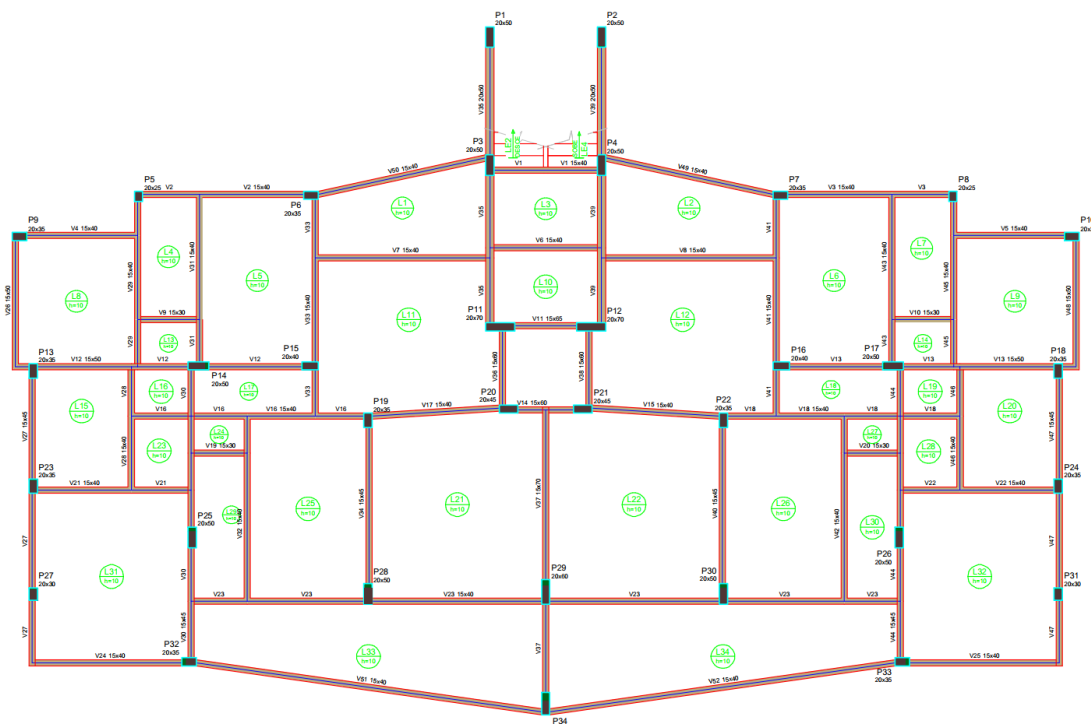
“moderada” (II) para região urbana. Por sua vez, os cobrimentos considerados foram: para vigas e pilares 3,0 cm, para lajes 2,5 cm.

Figura 16 – Planta de arquitetura do pavimento tipo da edificação.



Fonte: O autor.

Figura 17 – Planta de forma da estrutura do pavimento tipo da edificação.

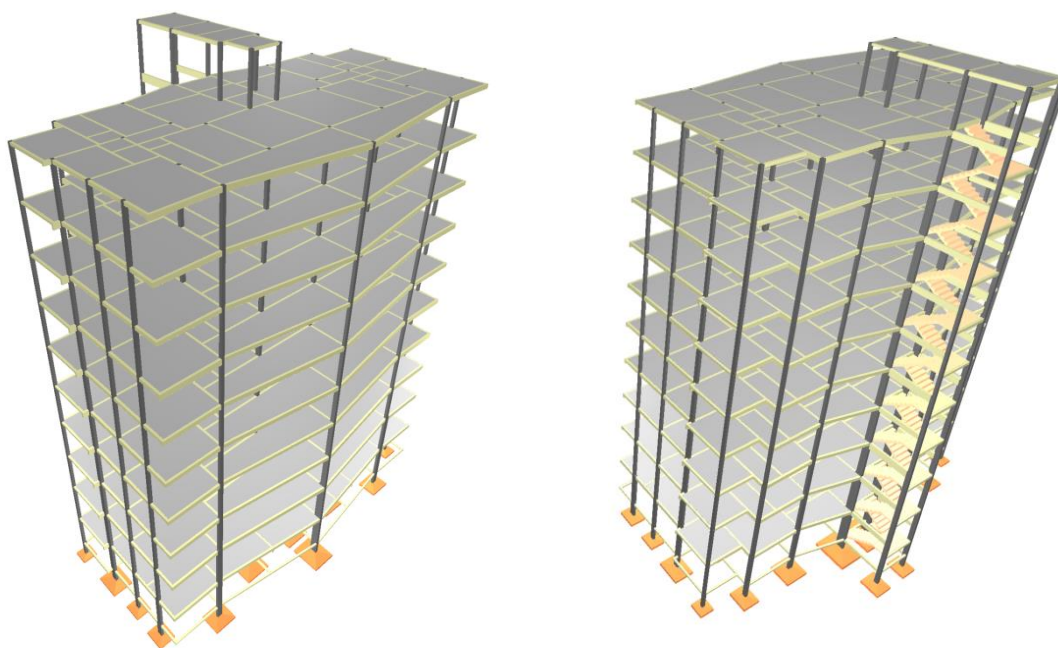


Fonte: O autor.

Para mais, as considerações do vento foram velocidade básica de 45 m/s, fator topográfico  $S1=1$ , categoria de rugosidade  $S2=$  categoria IV (terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada), classe da edificação  $S2=$  maior dimensão horizontal ou vertical entre 20 e 50 m, fator estatístico  $S3=1$  (edificações para hotéis e residências).

Em relação à durabilidade mínima, conforme a NBR 15575-1 – Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais (ABNT, 2013) e em referência à NBR 8681 – Ações e Segurança nas Estruturas (ABNT, 2004) para sistemas de estrutura como o estudado nestas análises, foi considerada uma vida útil de 50 anos. A área estrutural totalizou 3454,66 m<sup>2</sup> com disposição estrutural apresentada nas vistas 3D da Figura 18.

Figura 18 – Vistas em 3D da estrutura dimensionada.



Fonte: O autor.

Assim sendo, foram utilizadas sete classes de resistência à compressão do concreto ( $F_{ck}$ ) do Grupo I de resistência, a partir da classe C50, segundo a classificação da NBR 8953 – Concreto para fins estruturais – Classificação de grupos de resistência (ABNT, 2015), para as análises comparativas.

Portanto, através da Classe C50 – resistência característica à compressão de 50 MPa (de referência) – foram definidas as dimensões iniciais dos elementos estruturais (lajes maciças, vigas, pilares, escadas e fundações). Após, foram utilizadas as classes C45, C40, C35, C30, C25 e C20 (devido a agressividade ambiental adotada a resistência característica à compressão deve

ser maior ou igual a 25 MPa, mas por questões comparativas de estudo foi utilizada também a classe C20) com resistências características à compressão, respectivamente, de 45, 40, 35, 30, 25 e 20 MPa, modificando-se as dimensões dos elementos quando necessário devido à diminuição da resistência do concreto.

O processo de concepção da estrutura partiu da utilização do concreto da classe de resistência C50, a fim de buscar as dimensões mínimas das peças estruturais, lajes maciças, vigas, pilares, escadas e fundações que atendessem às mínimas condições de segurança estrutural e de comportamento em serviço.

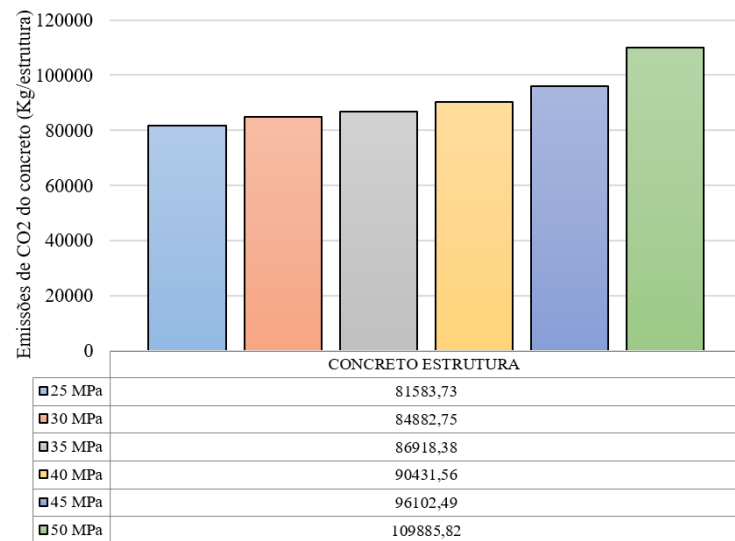
Obtendo-se a estrutura final para a utilização do concreto da classe de resistência C50, gerou-se uma nova estrutura, na qual se modificou somente a classe de resistência para C45 e, assim, consecutivamente, até a classe de resistência C20. Em cada mudança, quando necessário, foram alteradas as dimensões dos elementos estruturais, acrescentando-se, progressivamente, 1 cm de espessura para as lajes maciças, para as escadas e para as alturas das vigas; e 5 cm para as larguras dos pilares, sempre atendendo às condições de segurança e serviço.

### 5.3.1 Avaliações das emissões de CO<sub>2</sub> a partir do dimensionamento de estrutura em concreto armado considerando os valores obtidos para o cenário 1 de estudo

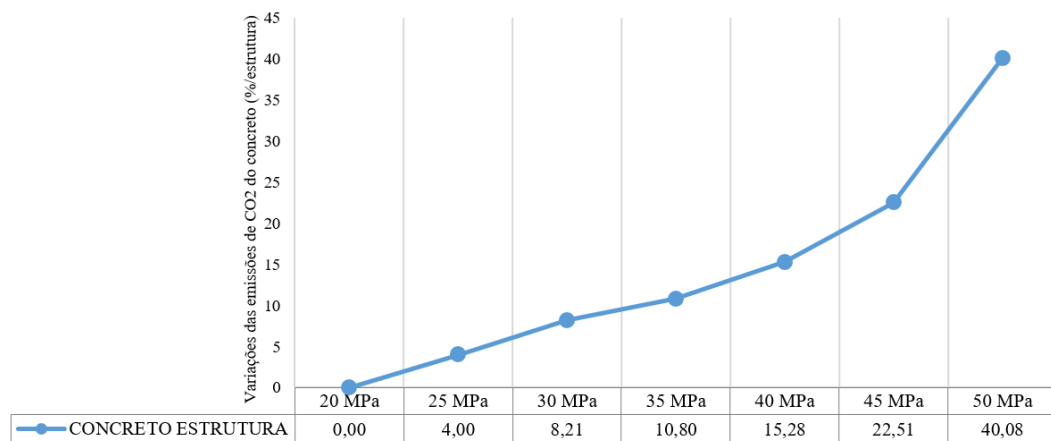
O dimensionamento da estrutura em concreto armado, levando em consideração os dados obtidos no cenário 1 de estudo, possibilitou análises e comparações, apresentadas na sequência, tanto da contribuição como do comportamento dos materiais, elementos estruturais e da estrutura nas diferentes resistências características do concreto.

#### 5.3.1.1 Contribuições e comportamentos dos materiais

O comportamento das emissões de CO<sub>2</sub> do concreto utilizado na estrutura a partir do dimensionamento para as diferentes resistências características do concreto é apresentado nos Gráficos 40 e 41, onde as emissões de CO<sub>2</sub> do concreto crescem 40,08% quando comparada a menor com a maior resistência. Observa-se que esse acréscimo é 21,61% menor se comparado com o acréscimo de emissões de CO<sub>2</sub> de um metro cúbico de concreto normal sem dimensionamento, devido à redução do volume de concreto gerado pelo dimensionamento da estrutura em concreto armado.

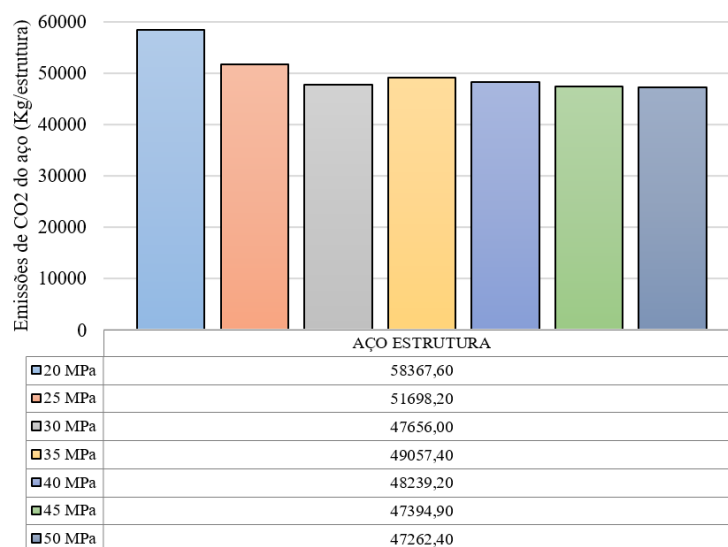
Gráfico 40 – Emissões de CO<sub>2</sub> do concreto da estrutura a partir do cenário 1.

Fonte: O autor.

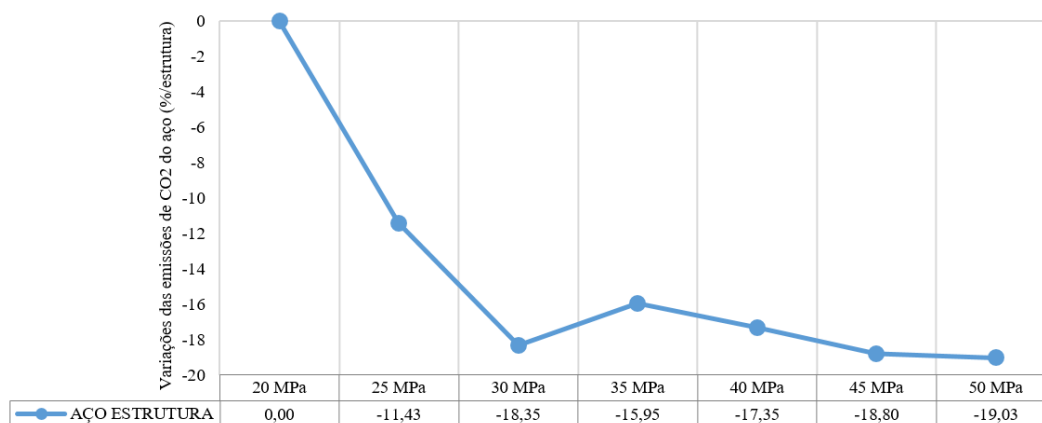
Gráfico 41 – Variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> do concreto da estrutura do cenário 1 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.

Fonte: O autor.

Quando analisado o comportamento do aço da estrutura, verifica-se que o acréscimo da resistência característica do concreto no dimensionamento gera uma redução das emissões de CO<sub>2</sub> de 19,03% se comparada a estrutura dimensionada com a resistência característica de 20 MPa com a de 50 MPa, conforme os Gráficos 42 e 43.

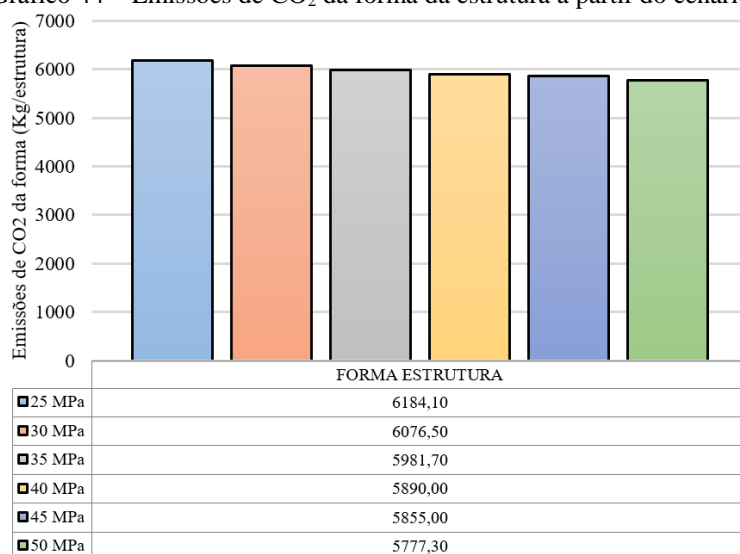
Gráfico 42 – Emissões de CO<sub>2</sub> do aço da estrutura a partir do cenário 1.

Fonte: O autor.

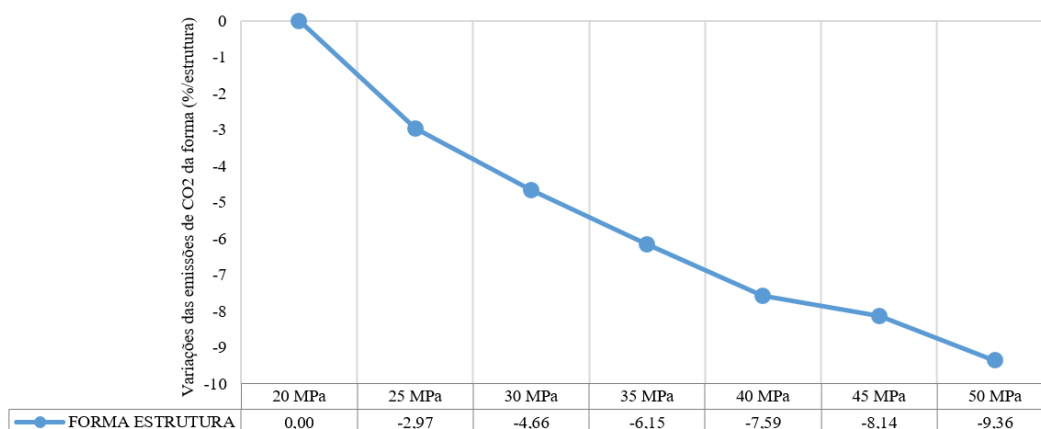
Gráfico 43 – Variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> do aço da estrutura do cenário 1 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.

Fonte: O autor.

Já para as formas, Gráficos 44 e 45, constata-se que o acréscimo da resistência característica do concreto no dimensionamento da estrutura gera uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> das formas devido à redução das dimensões dos elementos estruturais com consequente redução das áreas de formas.

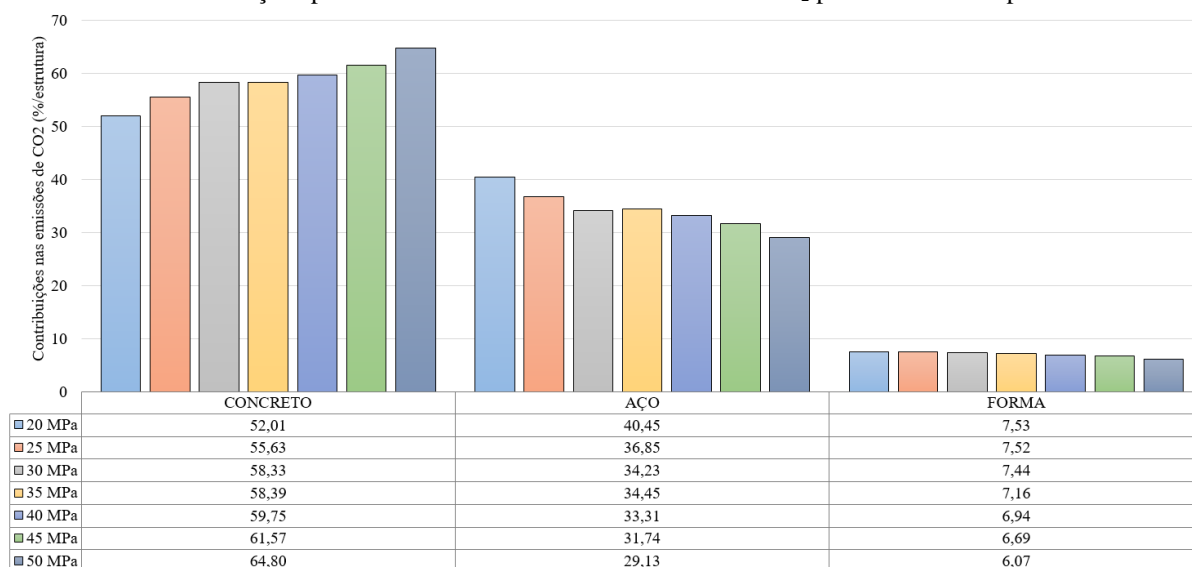
Gráfico 44 – Emissões de CO<sub>2</sub> da forma da estrutura a partir do cenário 1.

Fonte: O autor.

Gráfico 45 – Variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> da forma da estrutura do cenário 1 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.

Fonte: O autor.

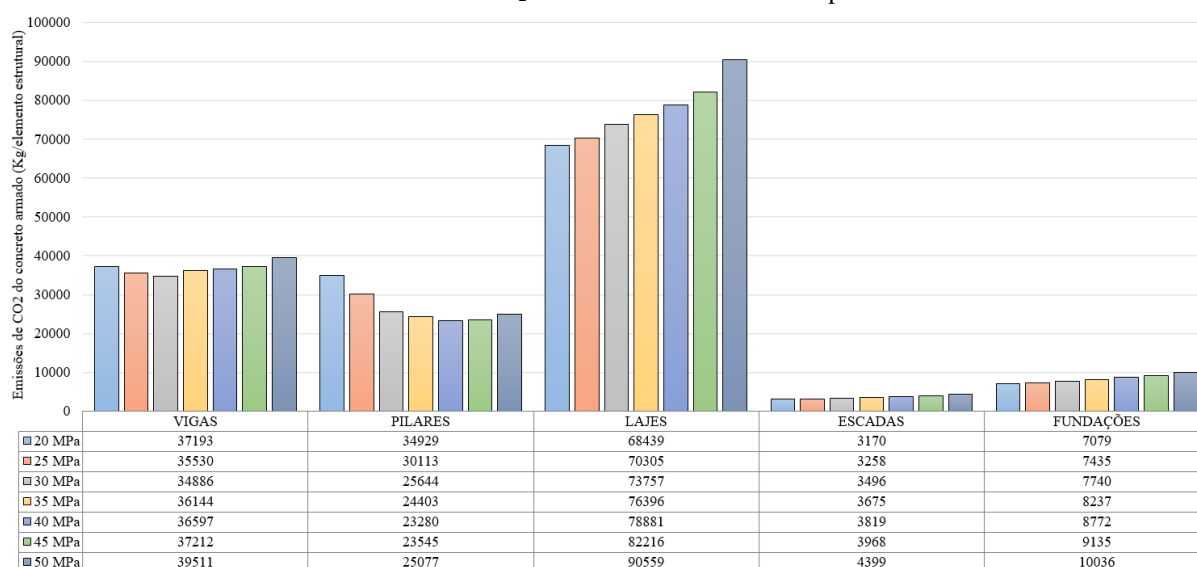
E, por fim, quando são avaliadas as parcelas percentuais de contribuição de cada material no total das emissões de CO<sub>2</sub> da estrutura nas diferentes resistências características do concreto estudadas, Gráfico 46, constata-se que o concreto tem a maior contribuição, ou seja, acresce com o aumento da resistência característica. Já o aço e a forma apresentam o comportamento inverso, diminuindo sua contribuição.

Gráfico 46 – Contribuições percentuais dos materiais nas emissões de CO<sub>2</sub> para a estrutura a partir do cenário 1.

Fonte: O autor.

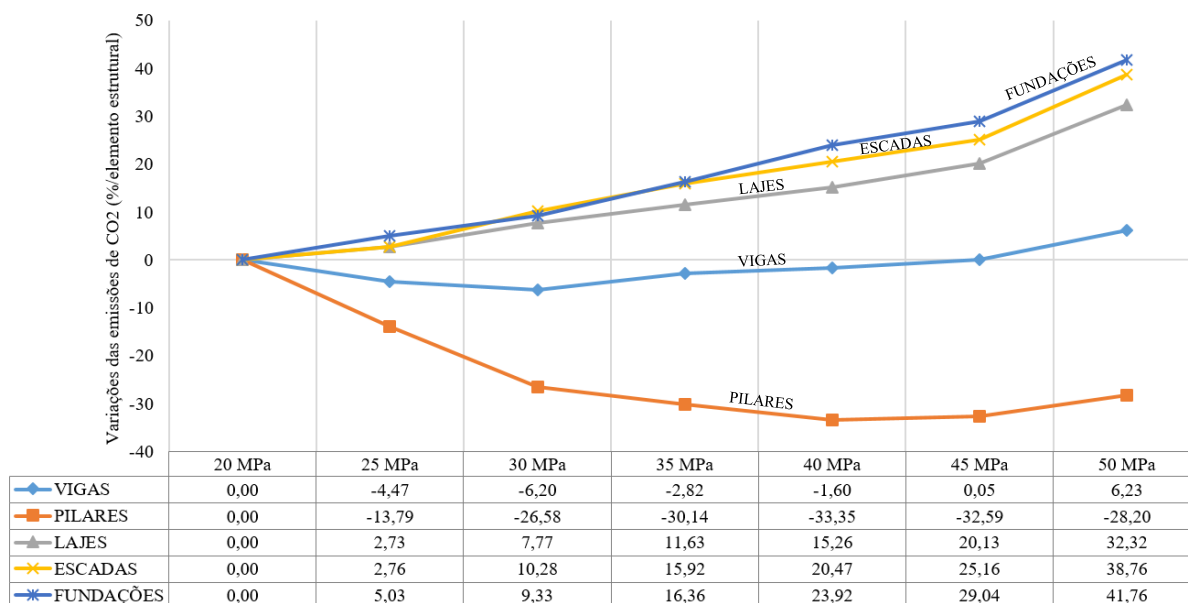
### 5.3.1.2 Contribuições e comportamentos dos elementos estruturais

Quando avaliadas as questões de emissões de CO<sub>2</sub> dos elementos estruturais, os valores obtidos e suas variações podem ser verificados nos Gráficos 47 e 48. Logo, o acréscimo da resistência característica do concreto no dimensionamento gerou um acréscimo nas emissões de CO<sub>2</sub> das lajes, das escadas e das fundações, já as vigas e os pilares, em sua maioria, tiveram os valores reduzidos.

Gráfico 47 – Emissões de CO<sub>2</sub> dos elementos estruturais a partir do cenário 1.

Fonte: O autor.

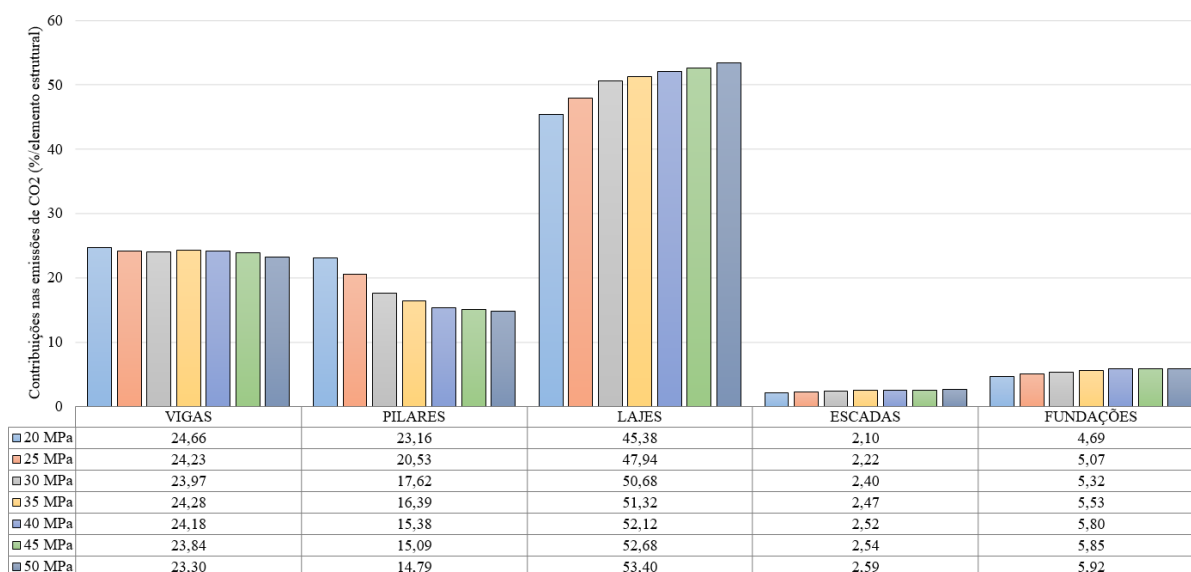
Gráfico 48 – Variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> dos elementos estruturais do cenário 1 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



Fonte: O autor.

No Gráfico 49 é apresentada a contribuição percentual de cada elemento estrutural a partir do acréscimo da resistência característica do concreto. Dessa maneira, constata-se que a laje contribui com a parcela mais significativa, chegando até a 53,40% das emissões de CO<sub>2</sub> totais, seguida pelas vigas, com até 24,66%, e pelos pilares, com até 23,66% das contribuições.

Gráfico 49 – Contribuições percentuais dos elementos estruturais nas emissões de CO<sub>2</sub> da estrutura em concreto armado a partir do cenário 1.



Fonte: O autor.

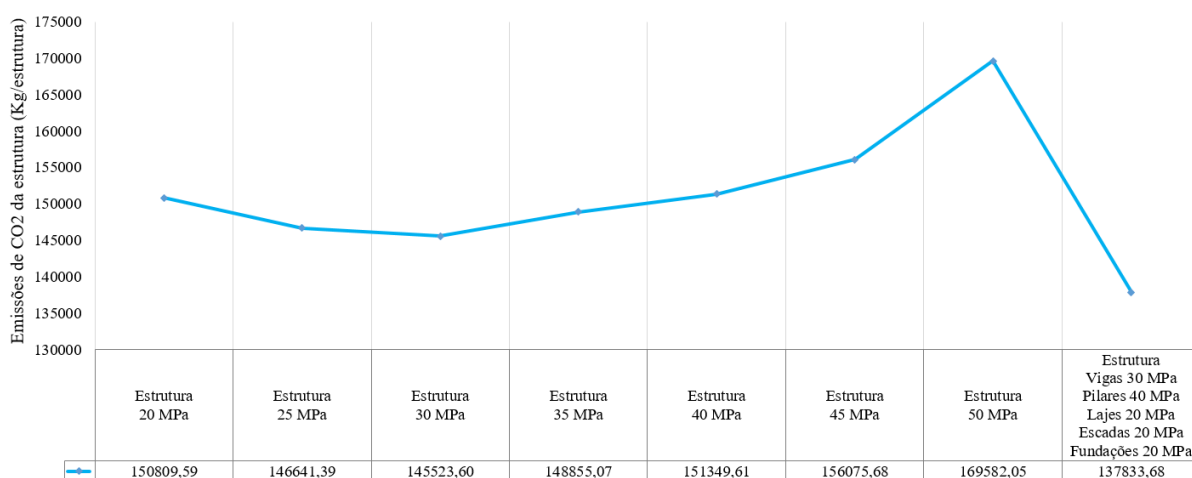


### 5.3.1.3 Comportamento da estrutura em concreto armado

Os valores totais de emissões de CO<sub>2</sub> da estrutura dimensionada nas diferentes resistências características do concreto podem ser verificados no Gráfico 50, onde também é apresentado o comportamento da estrutura se dimensionada com a resistência característica mais viável obtida neste estudo para cada elemento estrutural: 30 MPa para as vigas, 40 MPa para os pilares e 20 MPa para as lajes, escadas e fundações, conforme o Gráfico 48 apresentado anteriormente.

Conclui-se, a partir da avaliação do Gráfico 50, que a estrutura mais viável ambientalmente para o cenário 1 de estudo é a dimensionada com concreto de 30 MPa, emitindo até 14,19% menos quando comparada com as demais estruturas dimensionadas. Ainda, quando se utiliza a resistência de concreto mais viável obtida para cada elemento estrutural o resultado melhora ainda mais 4,53%.

Gráfico 50 – Emissões totais de CO<sub>2</sub> das estruturas em concreto armado dimensionadas a partir do cenário 1.



Fonte: O autor.

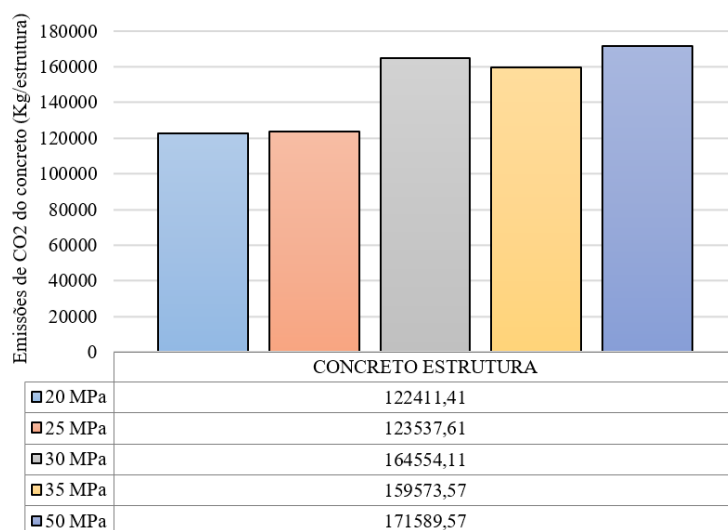
### 5.3.2 Avaliações das emissões de CO<sub>2</sub> a partir do dimensionamento de estrutura em concreto armado considerando os valores obtidos para o cenário 2 de estudo

O dimensionamento da estrutura em concreto armado, levando em consideração os dados obtidos no cenário 2 de estudo, possibilitou análises e comparações, apresentadas na sequência, tanto da contribuição como do comportamento dos materiais, elementos estruturais e da estrutura nas diferentes resistências características do concreto.

### 5.3.2.1 Contribuições e comportamentos dos materiais

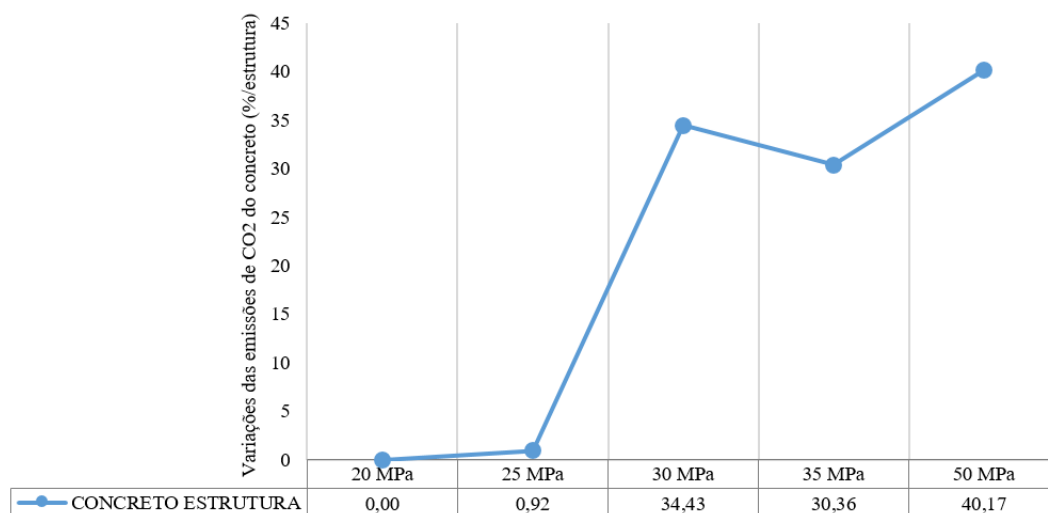
O comportamento das emissões de CO<sub>2</sub> do concreto utilizado na estrutura é apresentado nos Gráficos 51 e 52, nos quais as emissões de CO<sub>2</sub> do concreto crescem 40,17% quando comparadas a menor com a maior resistência. Observa-se que esse acréscimo é 15,98% menor se comparado com o acréscimo de emissões de CO<sub>2</sub> de um metro cúbico de concreto normal sem dimensionamento, devido à redução do volume de concreto gerado pelo dimensionamento da estrutura em concreto armado.

Gráfico 51 – Emissões de CO<sub>2</sub> do concreto da estrutura a partir do cenário 2.



Fonte: O autor.

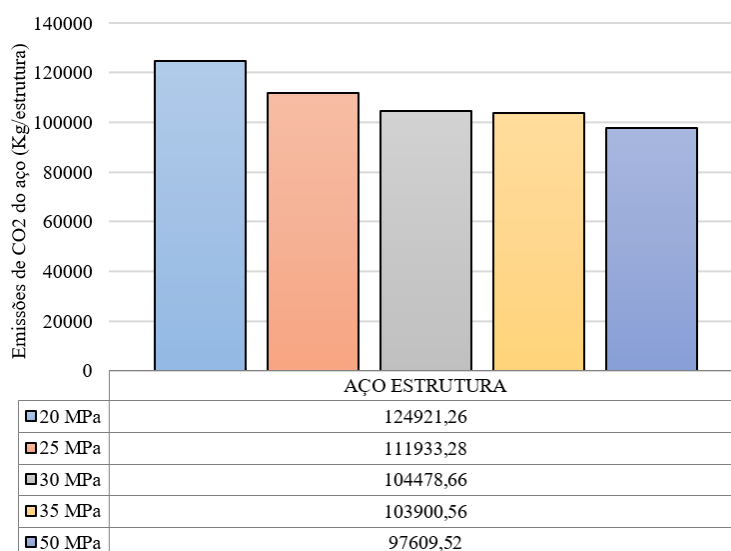
Gráfico 52 – Variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> do concreto da estrutura do cenário 2 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



Fonte: O autor.

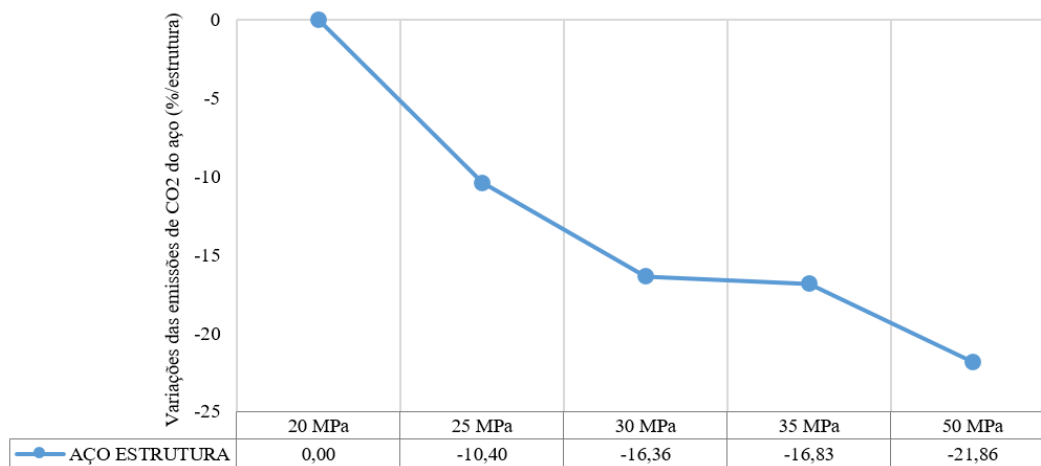
O comportamento do aço da estrutura com o acréscimo da resistência característica do concreto no dimensionamento apresenta, nos Gráficos 53 e 54, as emissões de CO<sub>2</sub> com reduções de até 21,86% quando se compara a estrutura dimensionada de 20 MPa com a de 50 MPa.

Gráfico 53 – Emissões de CO<sub>2</sub> do aço da estrutura a partir do cenário 2.



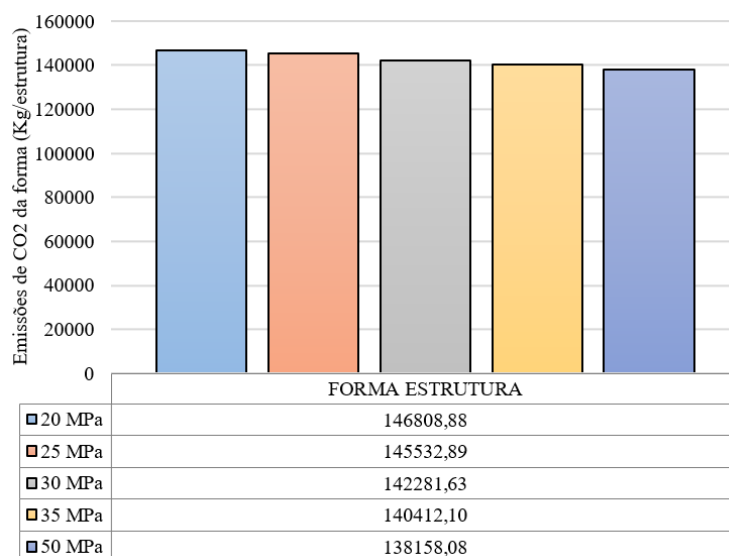
Fonte: O autor.

Gráfico 54 – Variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> do aço da estrutura do cenário 2 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.

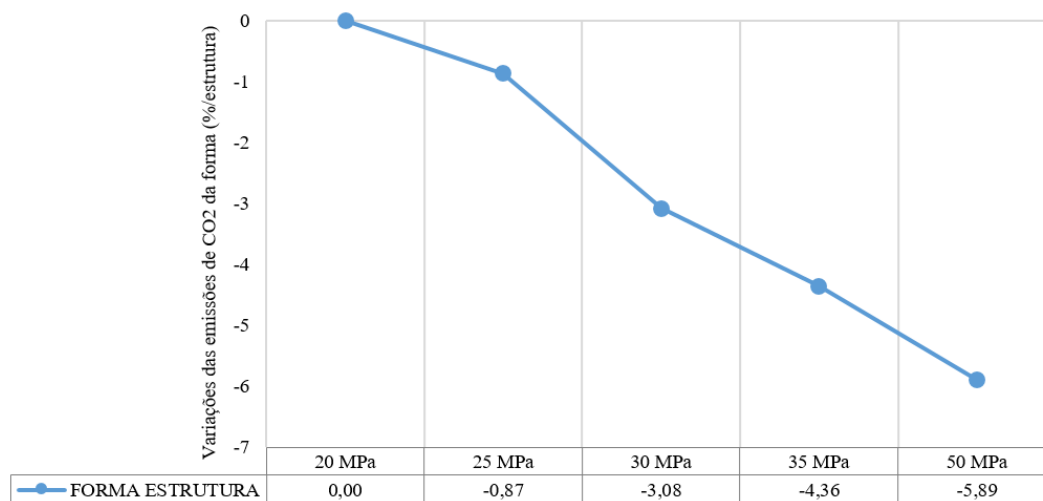


Fonte: O autor.

Já para as formas da estrutura, constata-se, nos Gráficos 55 e 56, que o acréscimo da resistência característica do concreto gera uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> de até 5,89% em razão da diminuição das dimensões dos elementos estruturais e, conseqüentemente, da redução das áreas de forma.

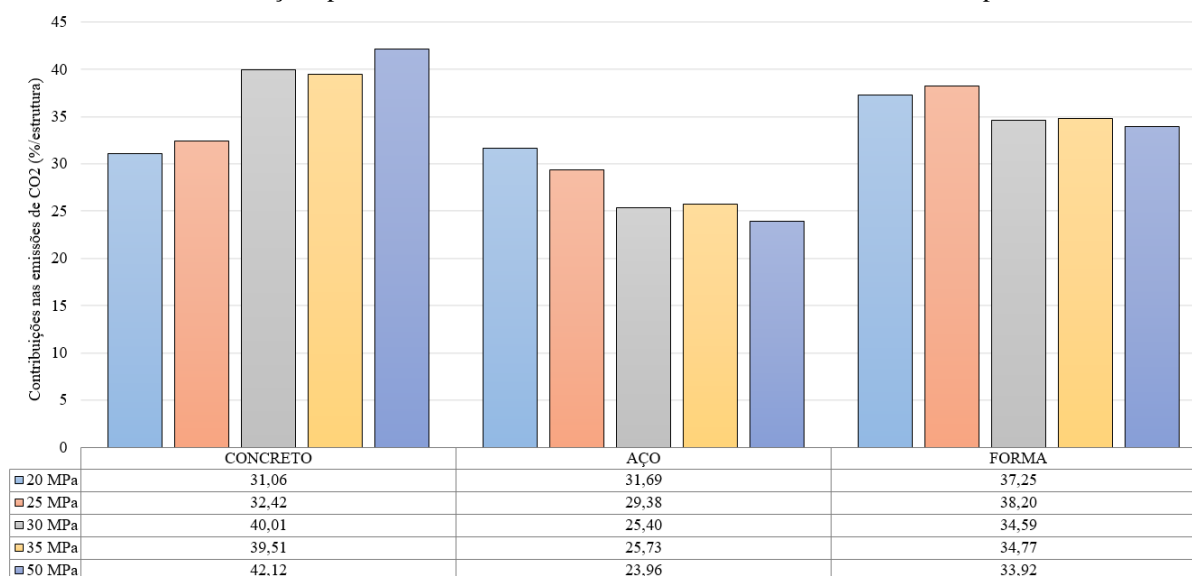
Gráfico 55 – Emissões de CO<sub>2</sub> da forma da estrutura a partir do cenário 2.

Fonte: O autor.

Gráfico 56 – Variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> da forma da estrutura do cenário 2 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.

Fonte: O autor.

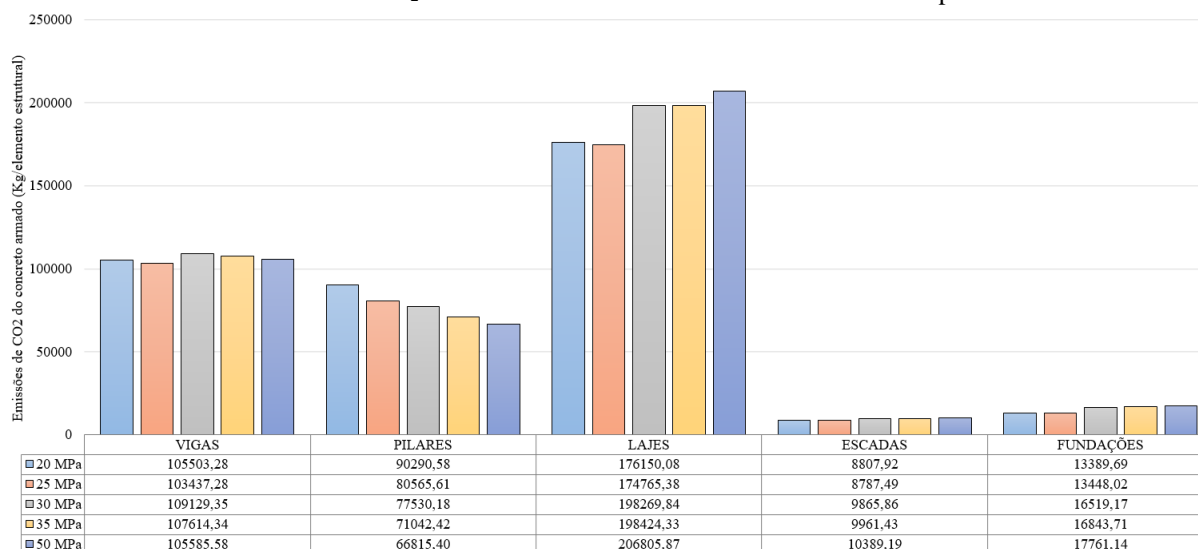
Quando avaliadas as parcelas percentuais de contribuição de cada material no total das emissões de CO<sub>2</sub> da estrutura nas diferentes resistências característica do concreto estudadas, Gráfico 57, diferentemente do cenário 1, tem-se o concreto e a forma com as maiores contribuições, sendo que a do concreto cresce com o aumento da resistência característica e a da forma decresce. Já o aço apresenta uma contribuição menor que reduz com o acréscimo da resistência característica do concreto.

Gráfico 57 – Contribuições percentuais dos materiais nas emissões de CO<sub>2</sub> da estrutura a partir do cenário 2.

Fonte: O autor.

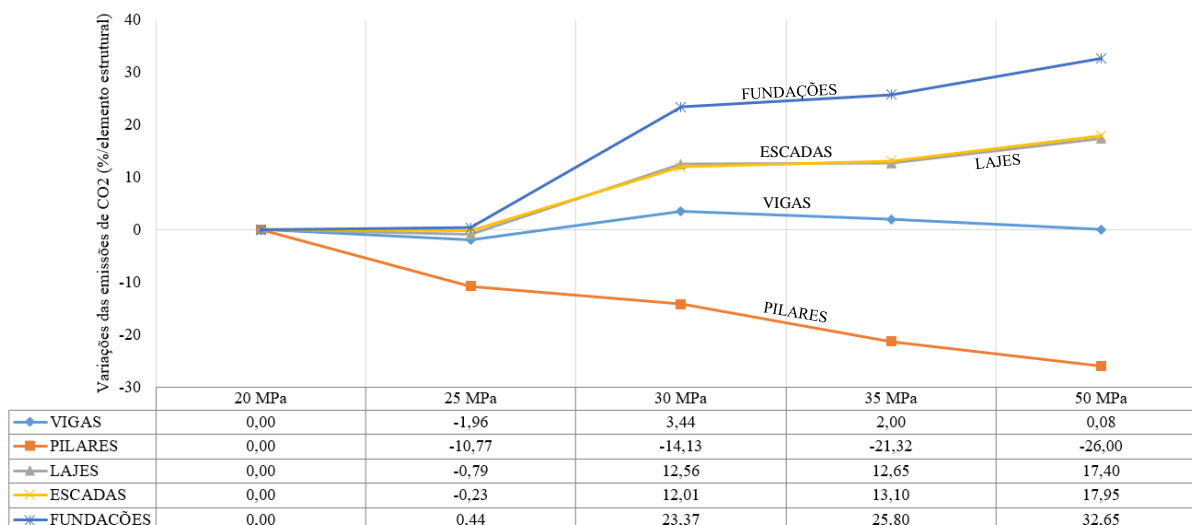
### 5.3.2.2 Contribuições e comportamentos dos elementos estruturais

Quando avaliadas as questões de emissões de CO<sub>2</sub> dos elementos estruturais, os valores obtidos e suas variações percentuais podem ser verificados nos Gráficos 58 e 59. O acréscimo da resistência característica do concreto a partir da resistência de 20 MPa gerou acréscimo nas emissões de CO<sub>2</sub> das lajes, escadas e fundações, já para as vigas essas variações se apresentaram pequenas. Por sua vez, os pilares tiveram variações consideráveis, a saber, com reduções dos valores em até 26%.

Gráfico 58 – Emissões de CO<sub>2</sub> do concreto armado dos elementos estruturais a partir do cenário 2.

Fonte: O autor.

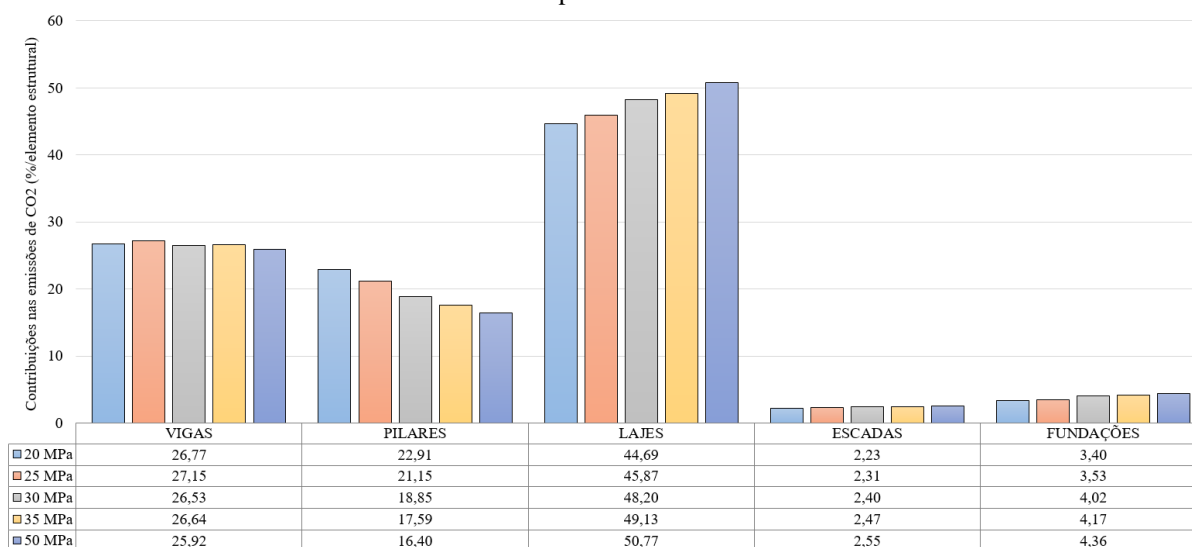
Gráfico 59 – Variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> do concreto armado dos elementos estruturais do cenário 2 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



Fonte: O autor.

No Gráfico 60 é apresentada a contribuição percentual de cada elemento estrutural e sua variação a partir do acréscimo da resistência característica do concreto. Constata-se, da mesma forma que no cenário 1, que a laje contribui com a parcela mais significativa, chegando até a 50,77% das emissões de CO<sub>2</sub> totais, tendo na sequência as vigas, com até 27,15%, e os pilares, com até 22,91% das contribuições.

Gráfico 60 – Contribuições percentuais dos elementos estruturais nas emissões de CO<sub>2</sub> da estrutura em concreto armado a partir do cenário 2.



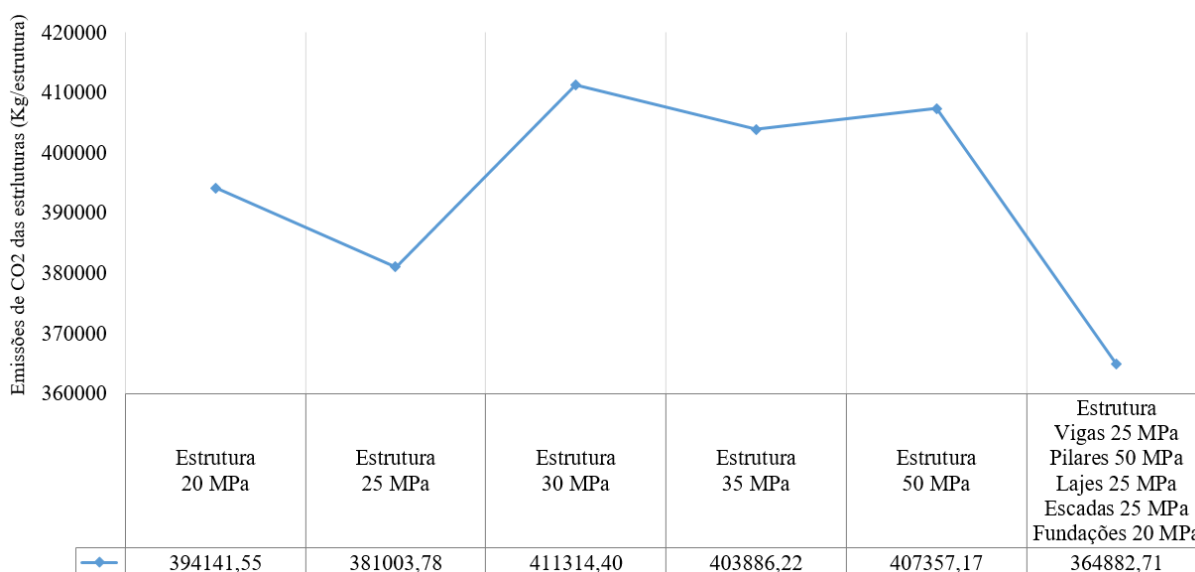
Fonte: O autor.

### 5.3.2.3 Comportamento da estrutura em concreto armado

Os valores totais de emissões de CO<sub>2</sub> da estrutura dimensionada nas diferentes resistências características do concreto podem ser verificados no Gráfico 61, onde também é apresentado o comportamento da estrutura se dimensionada com a resistência característica mais viável obtida neste cenário de estudo para cada elemento estrutural: 25 MPa para as vigas, lajes e escadas, 50 MPa para os pilares, e 20 MPa para as fundações, conforme o Gráfico 59 apresentado anteriormente.

Conclui-se, a partir dessa avaliação, que a estrutura mais viável ambientalmente para o cenário 2 de estudo é a dimensionada com concreto de 25 MPa, emitindo até 7,37% menos quando comparada com as demais estruturas dimensionadas. Se utiliza a resistência de concreto mais viável obtida para cada elemento estrutural o resultado melhora ainda mais 3,92%.

Gráfico 61 – Emissões totais de CO<sub>2</sub> das estruturas em concreto armado dimensionadas a partir do cenário 2.



Fonte: O autor.

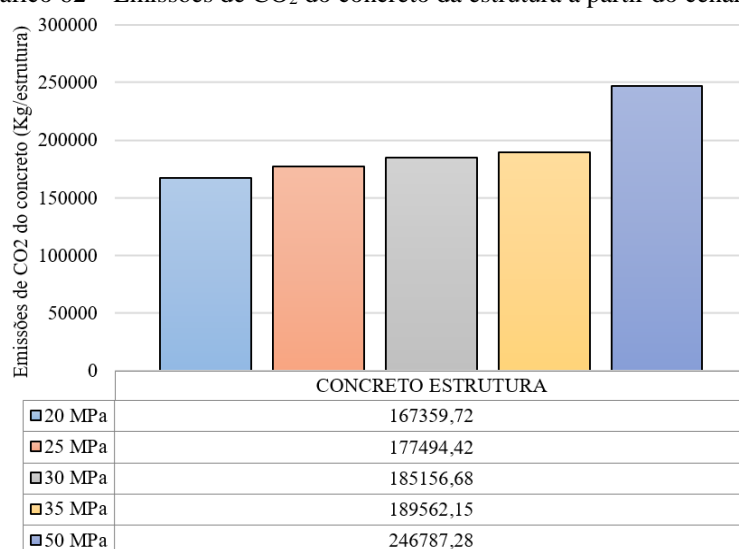
### 5.3.3 Avaliações das emissões de CO<sub>2</sub> a partir do dimensionamento de estrutura em concreto armado considerando os valores obtidos para o cenário 3 de estudo

O dimensionamento da estrutura em concreto armado, levando em consideração os dados obtidos no cenário 3 de estudo, possibilitou análises e comparações, apresentadas na sequência, tanto da contribuição como do comportamento dos materiais, elementos estruturais e da estrutura nas diferentes resistências características do concreto.

### 5.3.3.1 Contribuições e comportamentos dos materiais

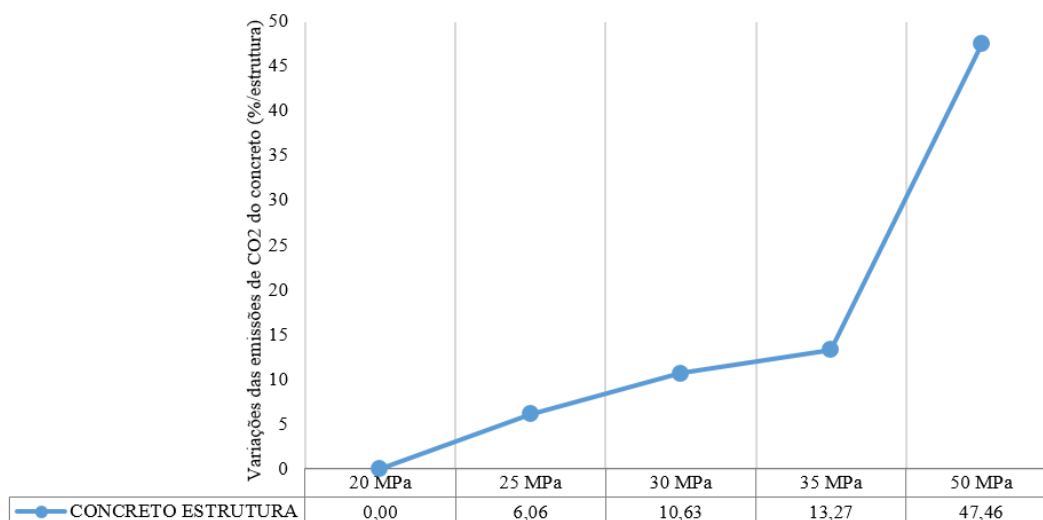
O comportamento das emissões de CO<sub>2</sub> do concreto utilizado na estrutura a partir do dimensionamento para as diferentes resistências características do concreto é apresentado nos Gráficos 62 e 63, em que as emissões de CO<sub>2</sub> do concreto crescem 47,46% quando se compara a menor com a maior resistência característica do concreto. Observa-se que esse acréscimo é 18,17% menor se comparado com o acréscimo de emissões de CO<sub>2</sub> de um metro cúbico de concreto normal sem dimensionamento, devido à redução do volume de concreto gerado pelo dimensionamento da estrutura em concreto armado.

Gráfico 62 – Emissões de CO<sub>2</sub> do concreto da estrutura a partir do cenário 3.



Fonte: O autor.

Gráfico 63 – Variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> do concreto da estrutura do cenário 3 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.

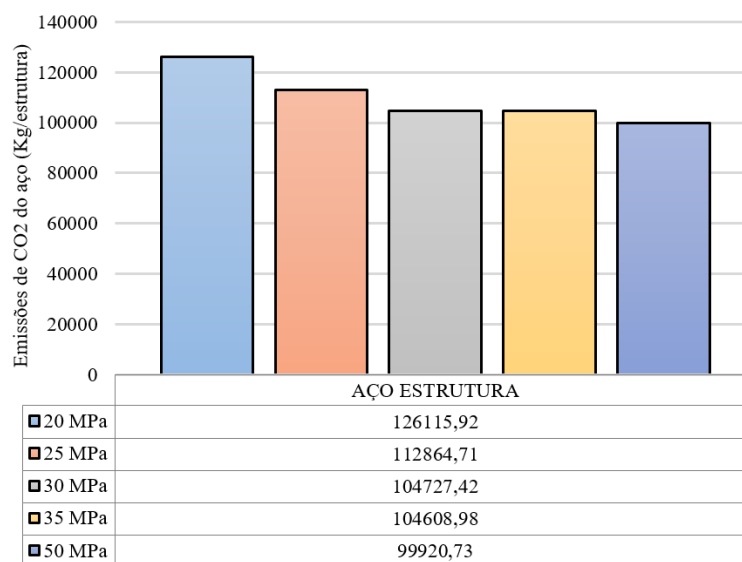


Fonte: O autor.



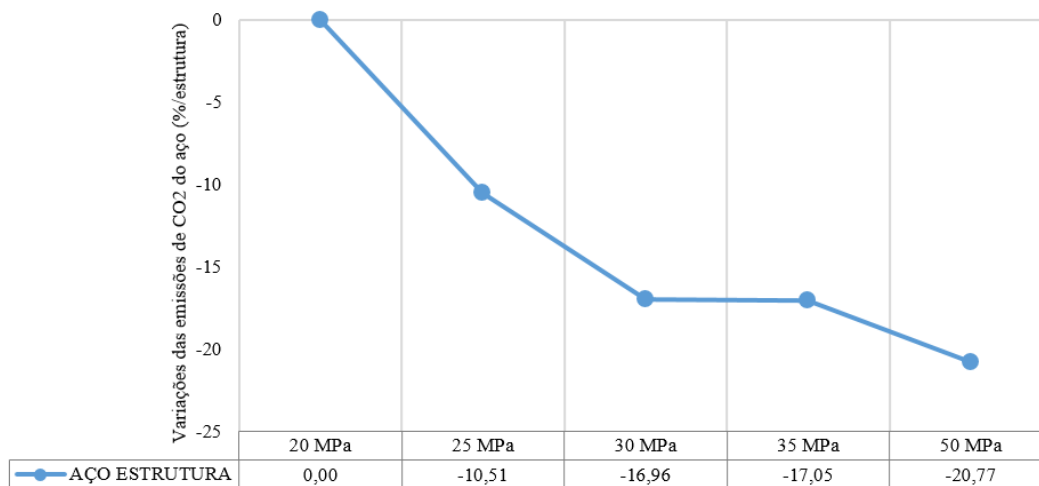
O comportamento das emissões de CO<sub>2</sub> do aço da estrutura com o acréscimo da resistência característica do concreto no dimensionamento apresentou uma redução que pode chegar até 20,77%, conforme os Gráficos 64 e 65.

Gráfico 64 – Emissões de CO<sub>2</sub> do aço da estrutura a partir do cenário 3.



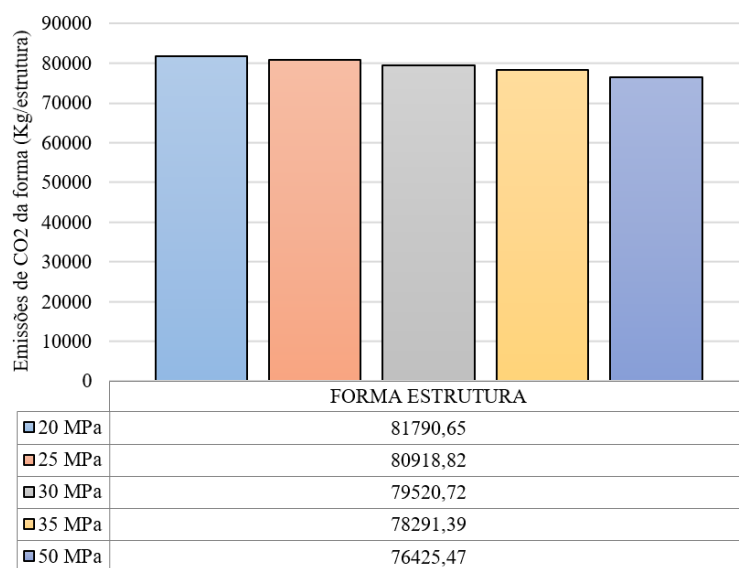
Fonte: O autor.

Gráfico 65 – Variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> do aço da estrutura do cenário 3 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.

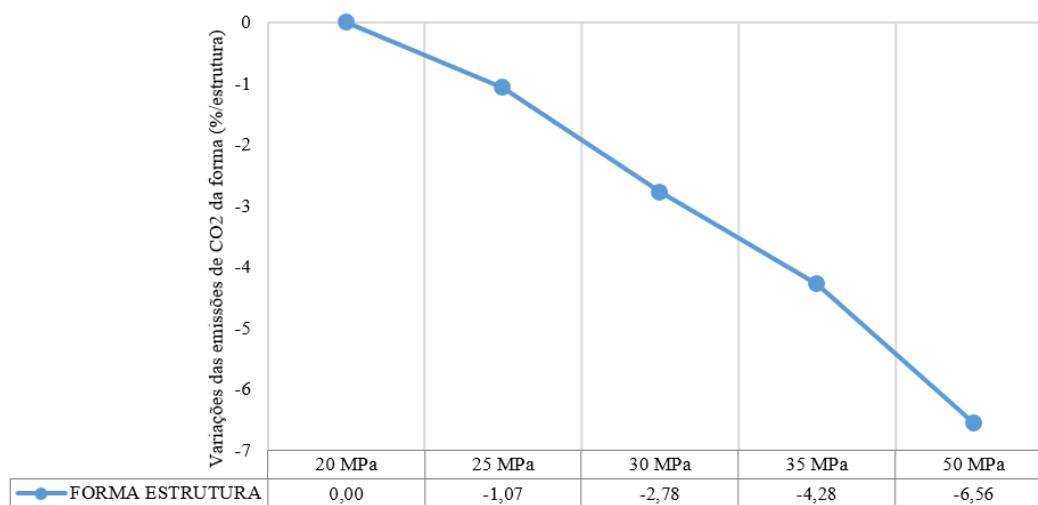


Fonte: O autor.

Já para as formas, através dos Gráficos 66 e 67, constata-se que o acréscimo da resistência característica do concreto no dimensionamento da estrutura gera uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> de até 6,56% por causa da redução das dimensões dos elementos estruturais.

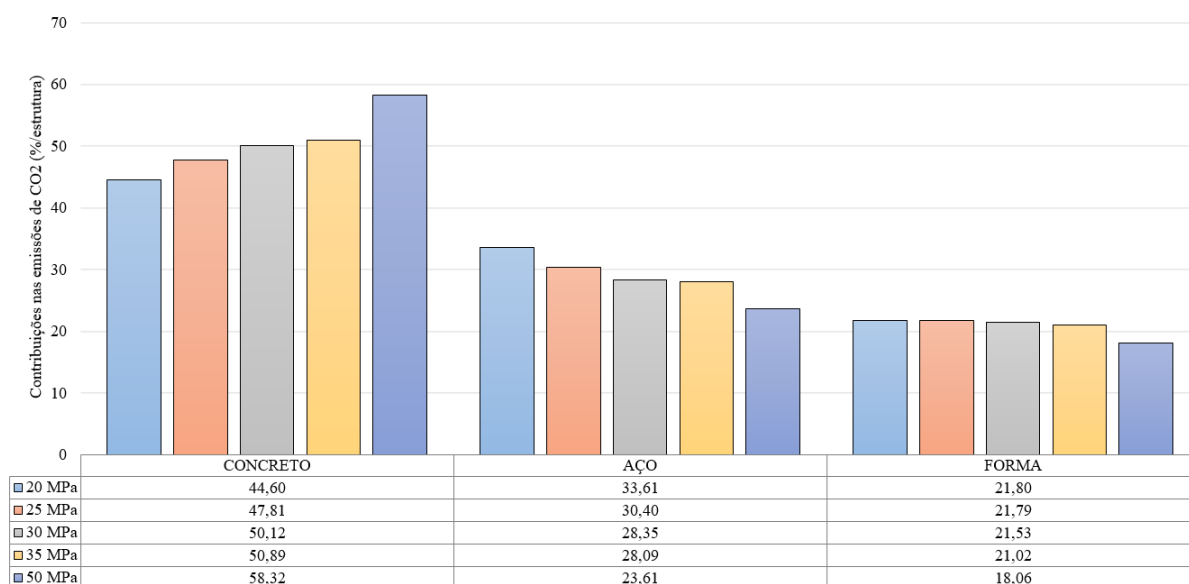
Gráfico 66 – Emissões de CO<sub>2</sub> da forma da estrutura a partir do cenário 3.

Fonte: O autor.

Gráfico 67 – Variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> da forma da estrutura do cenário 3 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.

Fonte: O autor.

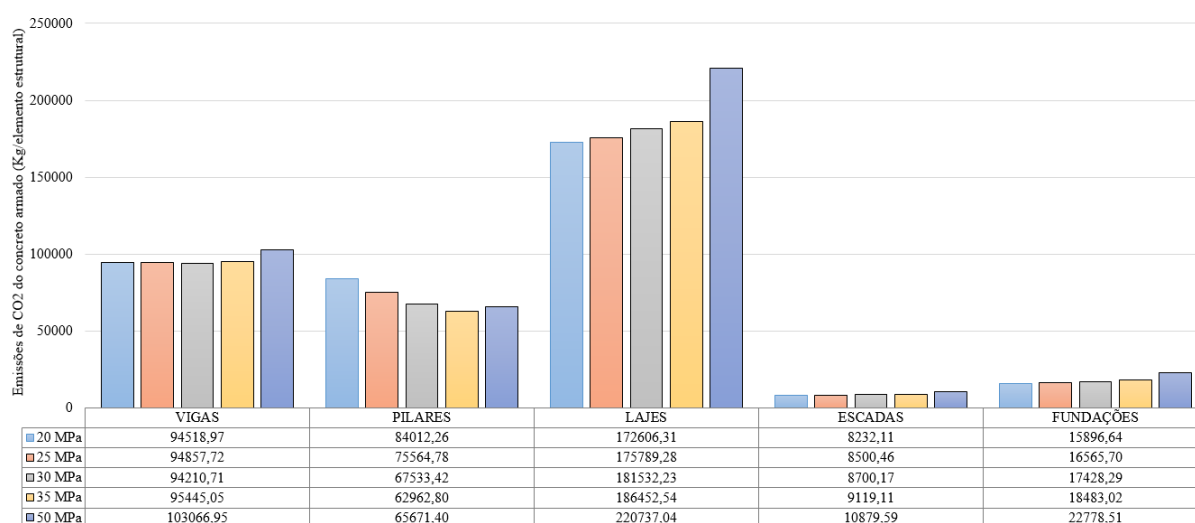
Quando avaliadas as parcelas percentuais de contribuição de cada material no total das emissões de CO<sub>2</sub> da estrutura nas diferentes resistências características do concreto estudadas, Gráfico 68, igualmente ao demonstrado no cenário de estudo 1, o concreto tem a maior contribuição, que acresce com o aumento da resistência característica, já o aço e a forma têm contribuições menores e mais semelhantes, ou seja, que decrescem.

Gráfico 68 - Contribuições percentuais dos materiais nas emissões de CO<sub>2</sub> da estrutura a partir do cenário 3.

Fonte: O autor.

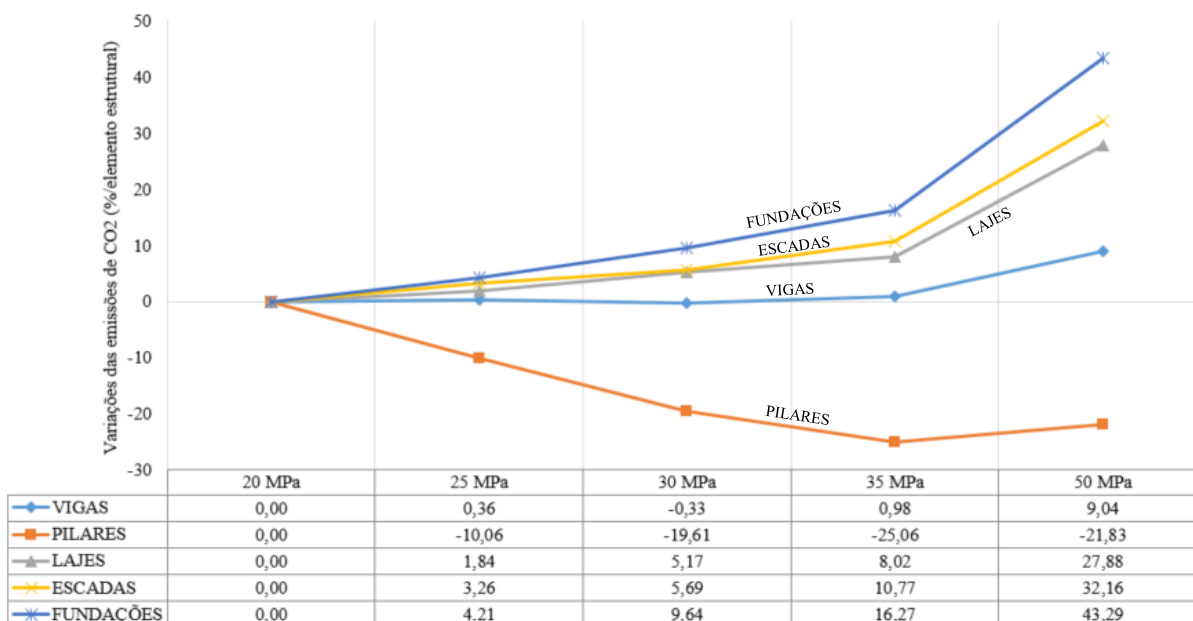
### 5.3.3.2 Contribuições e comportamentos dos elementos estruturais

Verifica-se, através dos Gráficos 69 e 70, quando avaliadas as questões de emissões de CO<sub>2</sub> dos elementos estruturais, os valores obtidos e suas variações. À vista disso, o acréscimo da resistência característica do concreto a partir da resistência de 20 MPa gera um aumento nas emissões de CO<sub>2</sub> das lajes, vigas, escadas e fundações, já para os pilares ocorrem reduções dos valores em até 25,06%.

Gráfico 69 – Emissões de CO<sub>2</sub> do concreto armado da estrutura a partir do cenário 3.

Fonte: O autor.

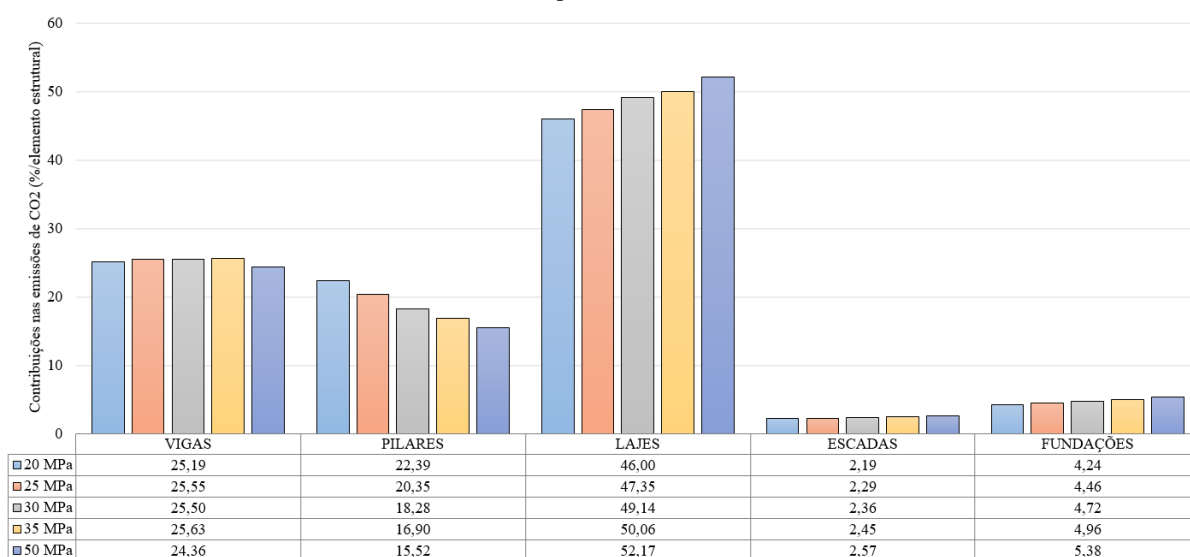
Gráfico 70 – Variações percentuais das emissões de CO<sub>2</sub> do concreto armado dos elementos estruturais do cenário 3 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



Fonte: O autor.

As contribuições percentuais de cada elemento estrutural e sua variação a partir do acréscimo da resistência característica do concreto podem ser verificadas no Gráfico 71. As lajes aparecem com a parcela mais significativa, chegando até a 52,17% das emissões de CO<sub>2</sub> totais, sendo seguida pelas vigas, com até 25,63%, e pelos pilares, com até 22,39% das contribuições.

Gráfico 71 – Contribuições percentuais dos elementos estruturais nas emissões de CO<sub>2</sub> da estrutura em concreto armado a partir do cenário 3.



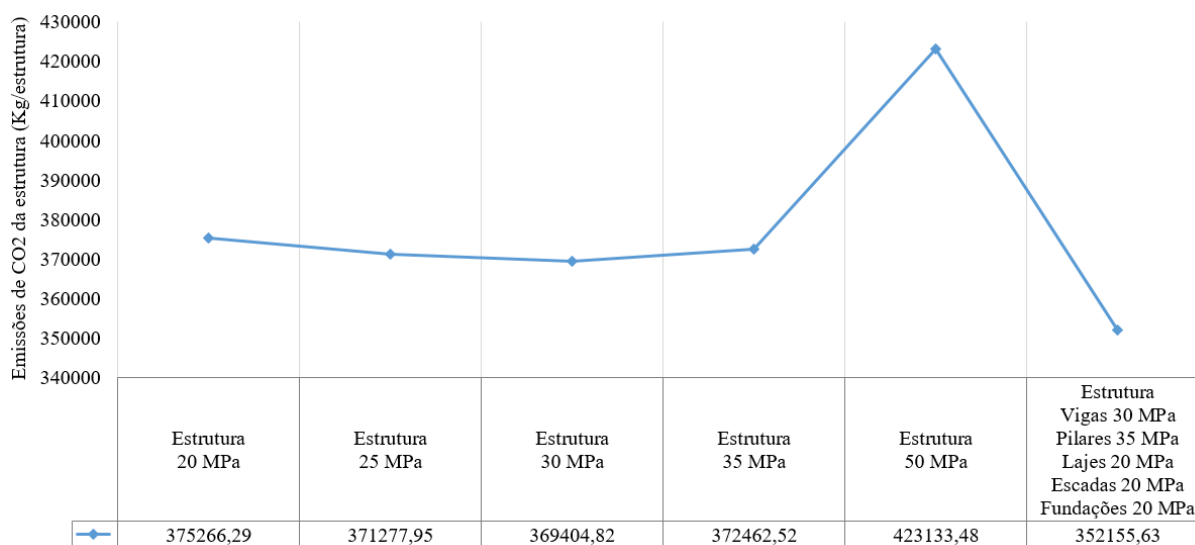
Fonte: O autor.

### 5.3.3.3 Comportamento da estrutura em concreto armado

Os valores totais de emissões de CO<sub>2</sub> da estrutura dimensionada nas diferentes resistências características podem ser verificados no Gráfico 72, onde também é apresentado o comportamento da estrutura se dimensionada com a resistência característica mais viável obtida neste cenário de estudo para cada elemento estrutural: 30 MPa para as vigas, 35 MPa para os pilares e 20 MPa para as lajes, escadas e fundações, conforme o Gráfico 70 apresentado anteriormente.

Conclui-se, portanto, que a estrutura mais viável ambientalmente para o cenário 3, igual ao cenário 1, é a dimensionada com concreto de 30 Mpa, emitindo até 12,70% menos quando comparada com as demais estruturas dimensionadas. Sobremaneira, quando se utiliza a resistência de concreto mais viável obtida para cada elemento estrutural o resultado melhora ainda mais 4,07%.

Gráfico 72 – Emissões totais de CO<sub>2</sub> das estruturas em concreto armado dimensionadas a partir do cenário 3.



Fonte: O autor.

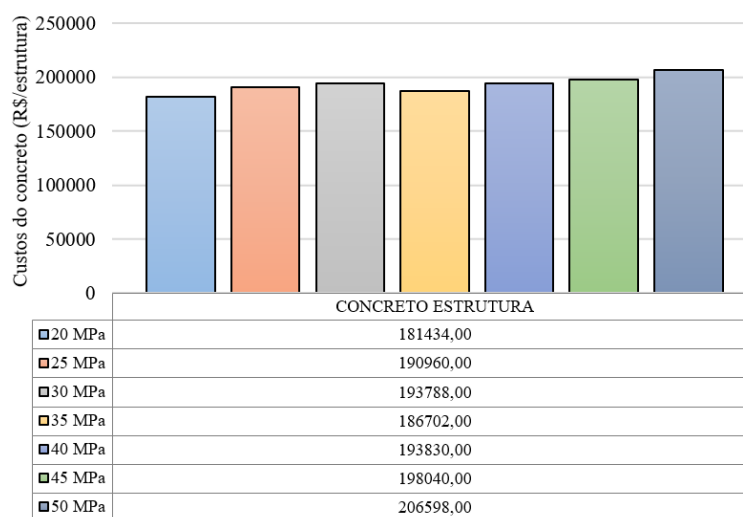
### 5.3.4 Avaliações dos custos a partir do dimensionamento de estrutura em concreto armado considerando os valores obtidos para o cenário 4 de estudo

O dimensionamento da estrutura em concreto armado, levando em consideração os dados obtidos no cenário 4 de estudo, possibilitou análises e comparações, apresentadas na sequência, tanto da contribuição como do comportamento dos materiais, elementos estruturais e da estrutura nas diferentes resistências características do concreto.

### 5.3.4.1 Contribuições e comportamentos dos materiais

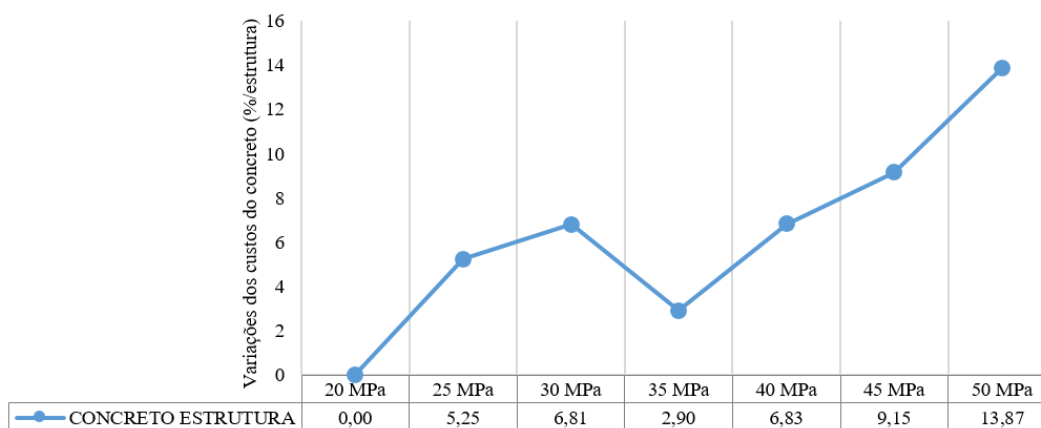
O comportamento dos custos do concreto utilizado na estrutura a partir do dimensionamento para as diferentes resistências características do concreto é apresentado nos Gráficos 73 e 74, onde os custos do concreto crescem em até 13,87% quando se compara a menor com a maior resistência característica do concreto. Observa-se que esse acréscimo é 13,40% menor se comparado com o acréscimo dos custos de um metro cúbico de concreto normal sem dimensionamento, devido à redução do volume de concreto gerado pelo dimensionamento da estrutura em concreto armado.

Gráfico 73 – Custos do concreto da estrutura a partir do cenário 4.



Fonte: O autor.

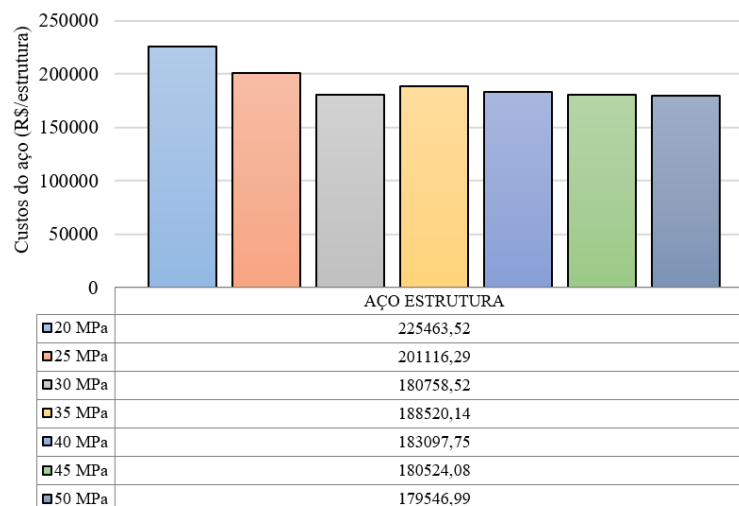
Gráfico 74 – Variações percentuais dos custos do concreto da estrutura do cenário 4 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



Fonte: O autor.

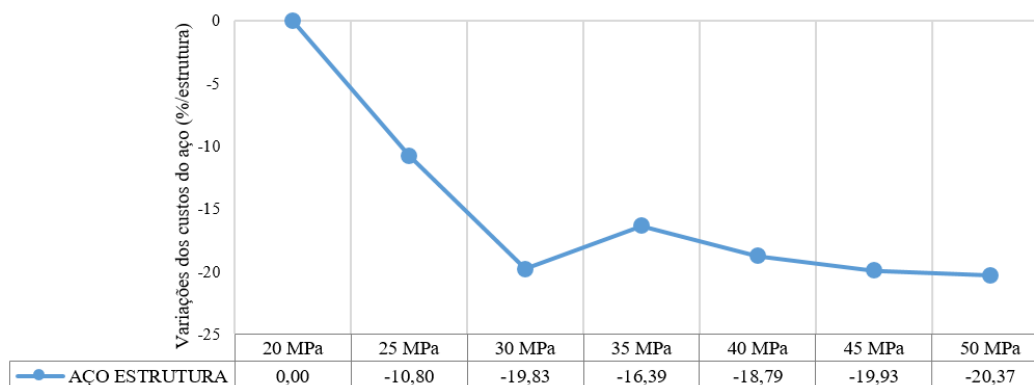
Quando analisado o comportamento do aço, Gráficos 75 e 76, com o acréscimo da resistência característica do concreto no dimensionamento da estrutura, os custos apresentam uma redução de até 20,37% ao se comparar as estruturas dimensionadas com 20 MPa e 50 MPa.

Gráfico 75 – Custos do aço da estrutura a partir do cenário 4.



Fonte: O autor.

Gráfico 76 – Variações percentuais dos custos do aço da estrutura do cenário 4 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.

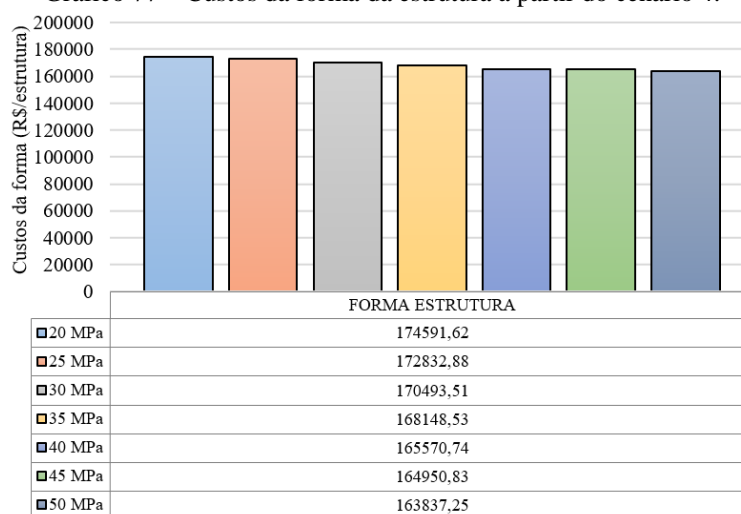


Fonte: O autor.

Já as formas, Gráficos 77 e 78, apresentam, com o acréscimo da resistência do concreto, uma redução nos custos de até 6,16% devido à redução das dimensões dos elementos estruturais e conseqüente redução da área de forma.

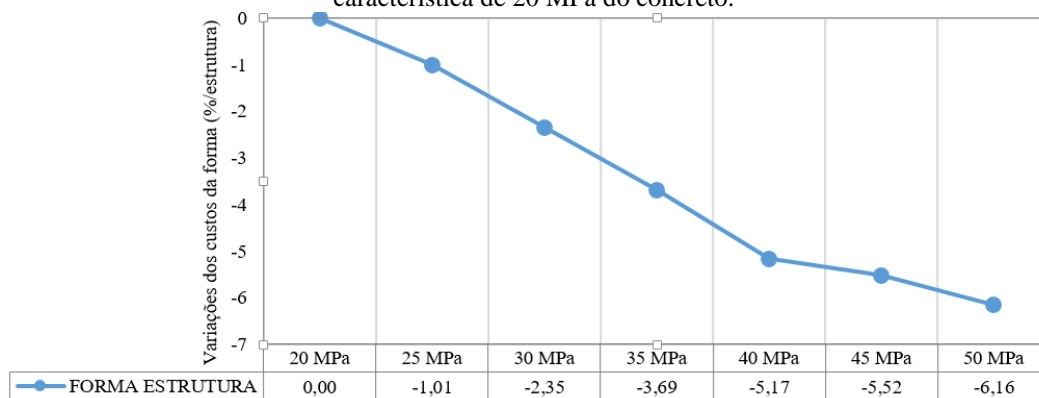
A contribuição de cada material nos custos da estrutura para as diferentes resistências características estudadas é bem parecida, segundo o Gráfico 79, com o concreto crescendo com o aumento da resistência característica, já o aço e a forma decrescendo.

Gráfico 77 – Custos da forma da estrutura a partir do cenário 4.



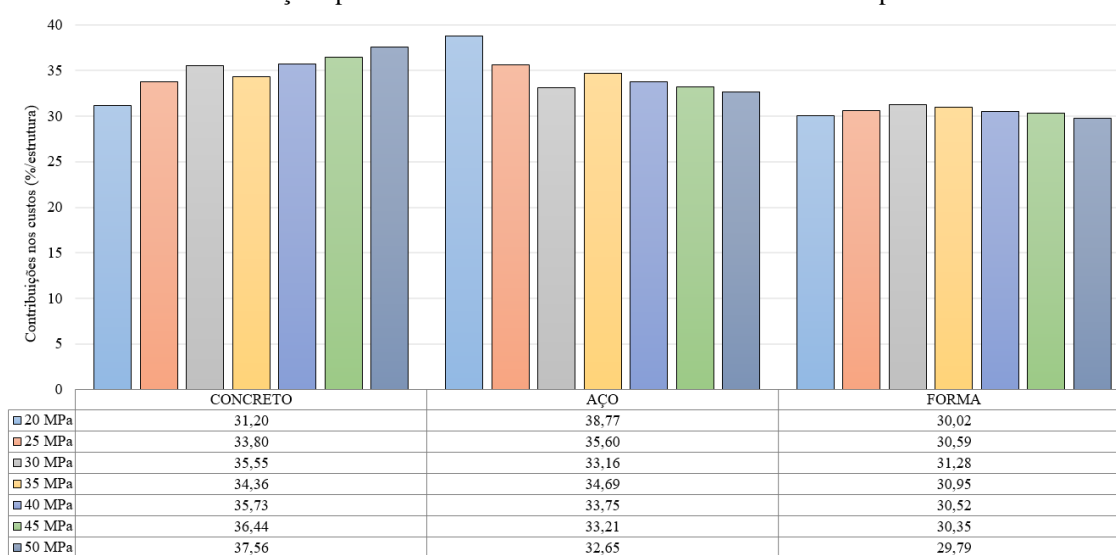
Fonte: O autor.

Gráfico 78 – Variações percentuais dos custos da forma da estrutura do cenário 4 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



Fonte: O autor.

Gráfico 79 – Contribuições percentuais dos materiais nos custos da estrutura a partir do cenário 4.



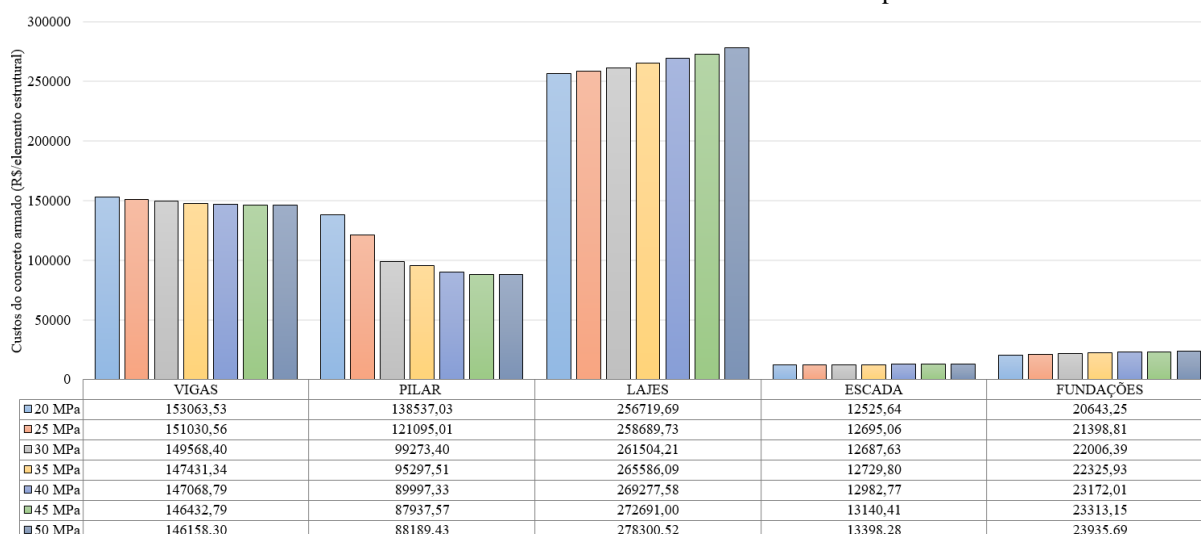
Fonte: O autor.



### 5.3.4.2 Contribuições e comportamentos dos elementos estruturais

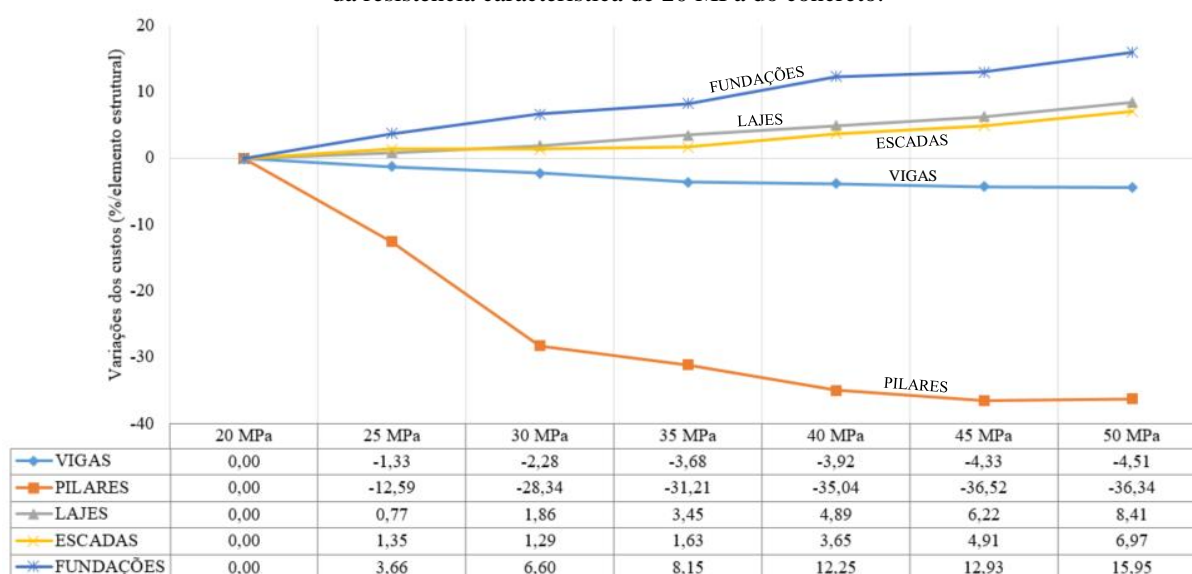
Observa-se, por meio dos Gráficos 80 e 81, quando avaliadas as questões de custos dos elementos estruturais os valores obtidos e suas variações, que o acréscimo da resistência característica do concreto a partir da resistência de 20 MPa gerou acréscimo nos custos das lajes, escadas e fundações, já para as vigas e pilares houve reduções dos valores.

Gráfico 80 – Custos do concreto armado dos elementos estruturais a partir do cenário 4.



Fonte: O autor.

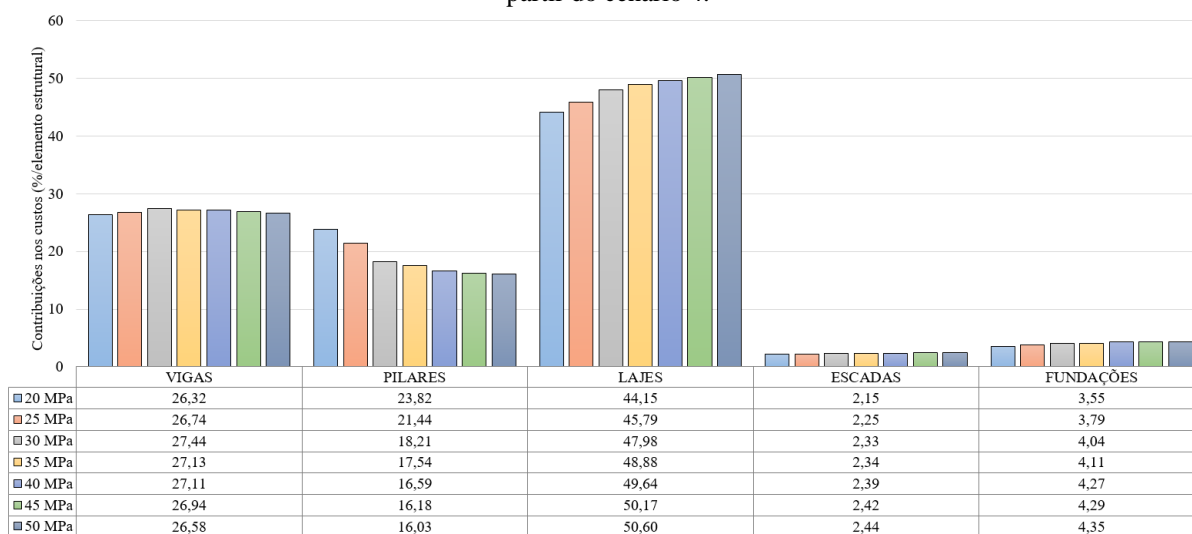
Gráfico 81 – Variações percentuais dos custos do concreto armado dos elementos estruturais do cenário 4 a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



Fonte: O autor.

A contribuição percentual de cada elemento estrutural e sua variação a partir do acréscimo da resistência característica do concreto é apresentada no Gráfico 82, em que, igualmente aos outros cenários de estudo, a laje contribui com a parcela mais significativa, isto é, chega até a 50,60% dos custos totais, em seguida aparecem as vigas, com até 27,44%, e os pilares, com até 23,82% das contribuições.

Gráfico 82 – Contribuições percentuais dos elementos estruturais nos custos da estrutura em concreto armado a partir do cenário 4.



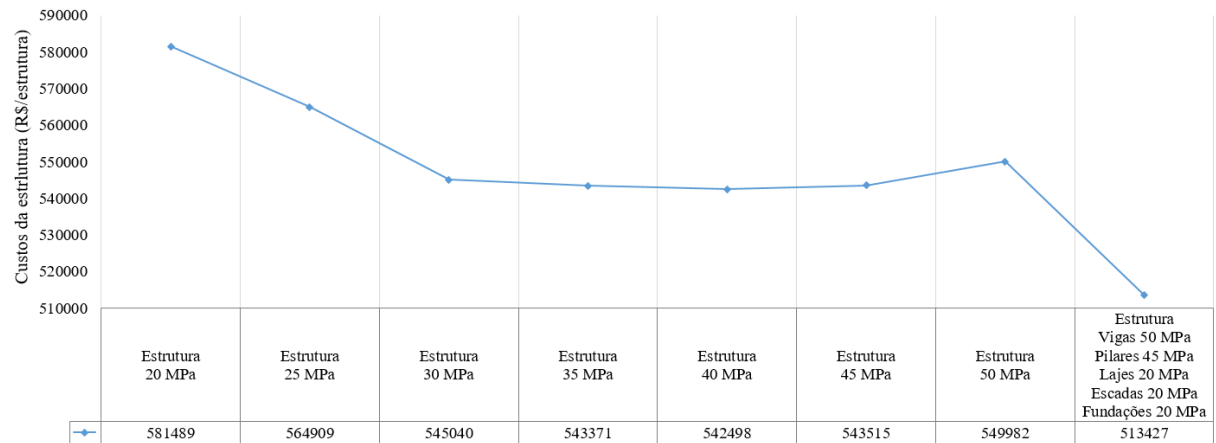
Fonte: O autor.

### 5.3.4.3 Comportamento da estrutura em concreto armado

Os valores totais dos custos da estrutura dimensionada nas diferentes resistências características do concreto podem ser verificados no Gráfico 83, no qual também é apresentado o comportamento da estrutura se dimensionada com a resistência característica mais viável obtida neste cenário de estudo para cada elemento estrutural: 50 MPa para as vigas, 45 MPa para os pilares e 20 MPa para as lajes, escadas e fundações, conforme Gráfico 81 apresentado anteriormente.

Conclui-se, a partir dessa avaliação, que a estrutura mais viável economicamente para o cenário 4 de estudo é a dimensionada com concreto de 40 Mpa, custando até 6,71% menos quando comparada com as demais estruturas dimensionadas. Salienta-se, também, que quando se utiliza a resistência de concreto mais viável obtida para cada elemento estrutural o resultado melhora ainda mais 4,99%.

Gráfico 83 – Custos das estruturas em concreto armado dimensionadas a partir do cenário 4.



Fonte: O autor.

## **6 AVALIAÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DA ESTRUTURA EM CONCRETO ARMADO EM ESTUDO**

Neste capítulo são avaliadas as categorias de impacto ambiental da estrutura de concreto armado dimensionada nas diferentes resistências características do concreto para os cenários 2 e 3 de estudo. Assim sendo, são geradas e comparadas as 18 categorias de impacto para o ponto médio (*midpoint*) e as três categorias de danos para o ponto final (*endpoint*).

### **6.1 DESEMPENHO AMBIENTAL DA ESTRUTURA EM CONCRETO ARMADO PARA AS 18 CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL**

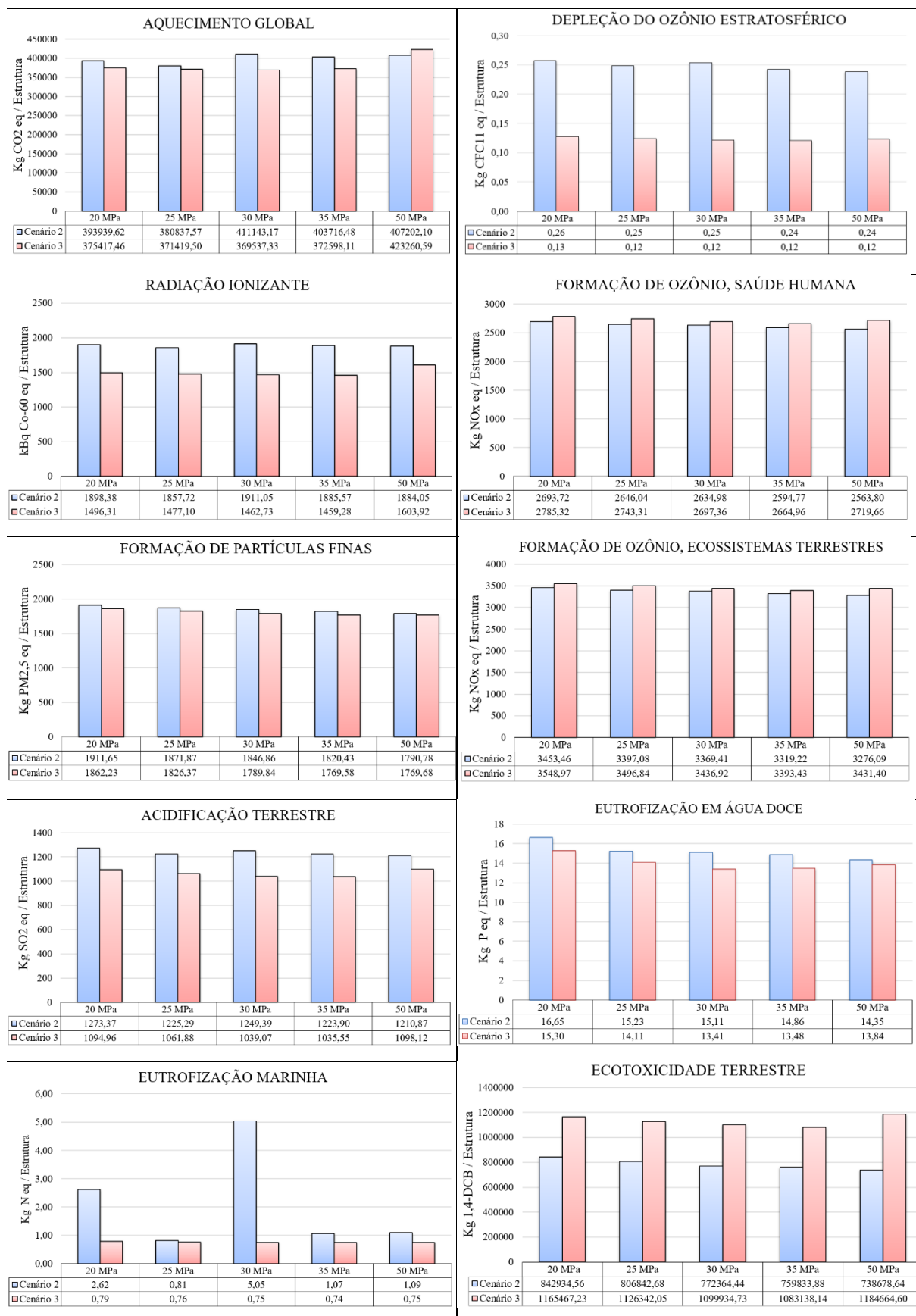
A partir do processamento no software SimaPro dos dados obtidos da estrutura dimensionada nas diferentes resistências características do concreto, foram gerados os valores de desempenho ambiental para as 18 categorias de impacto para os cenários 2 e 3 de estudo.

Apresenta-se, na Tabela 26, os valores obtidos para todas as categorias de impacto avaliadas, em que é possível comparar o comportamento dos resultados da estrutura em relação aos dois cenários de estudo nas diferentes resistências características do concreto, tendo quando avaliado e comparado o comportamento em relação aos dois cenários, uma proporcionalidade de melhores resultados.

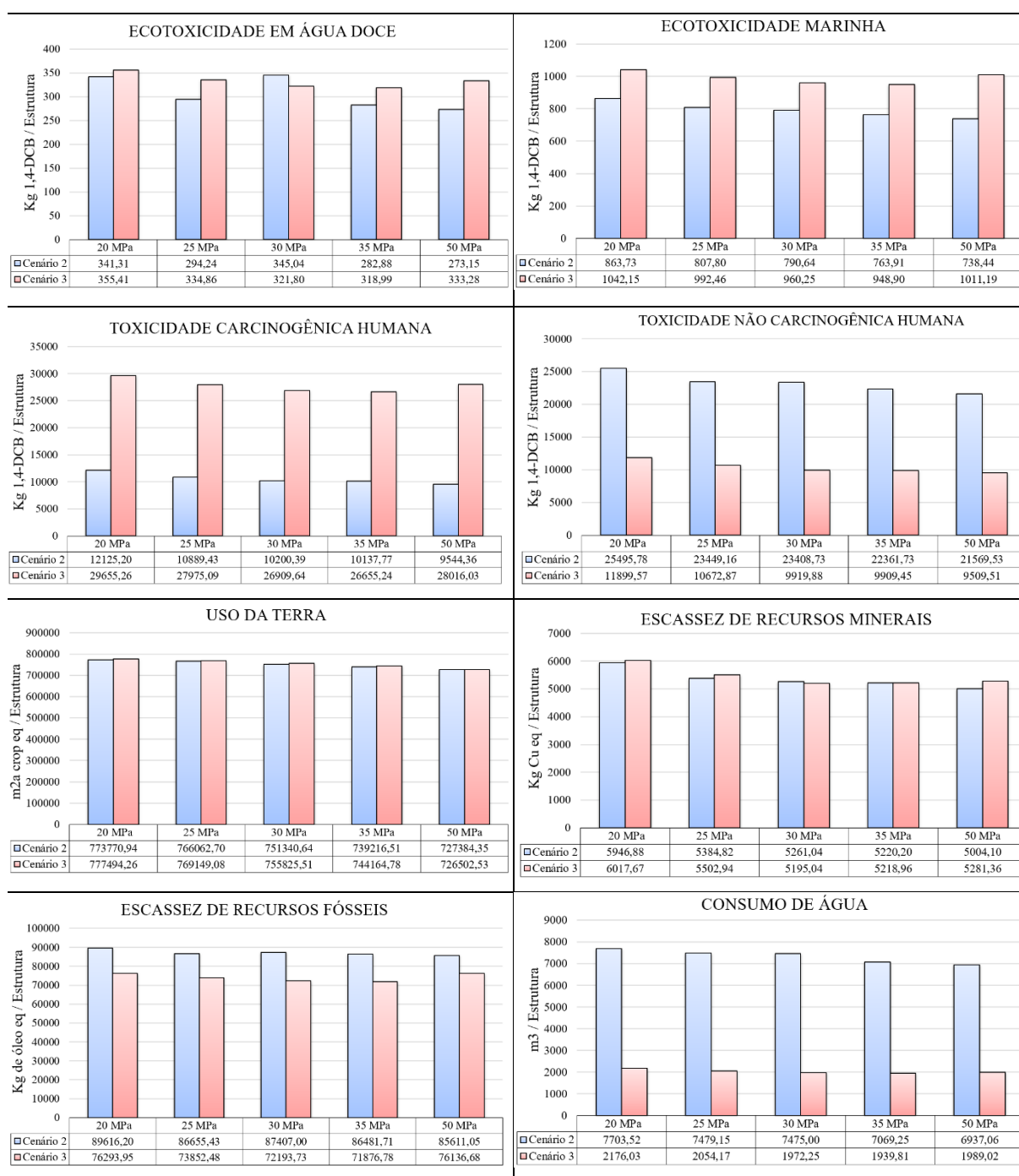
À medida que cada cenário de estudo é avaliado individualmente, verifica-se, para o cenário 2, a estrutura dimensionada com o concreto de resistência característica de 50 MPa como a que gera o menor impacto ambiental em 15 das 18 categorias avaliadas, ou seja, 83,33% dos impactos.

Já para o cenário 3, a resistência característica do concreto que gera o menor impacto ambiental em 13 das 18 categorias é a de 35 MPa, isto é, 71,22% dos impactos.

Tabela 26 – Comportamentos das categorias de impacto ambiental para as estruturas dimensionadas a partir dos cenários de estudo 2 e 3.



continuação da Tabela 25.



Fonte: O autor.

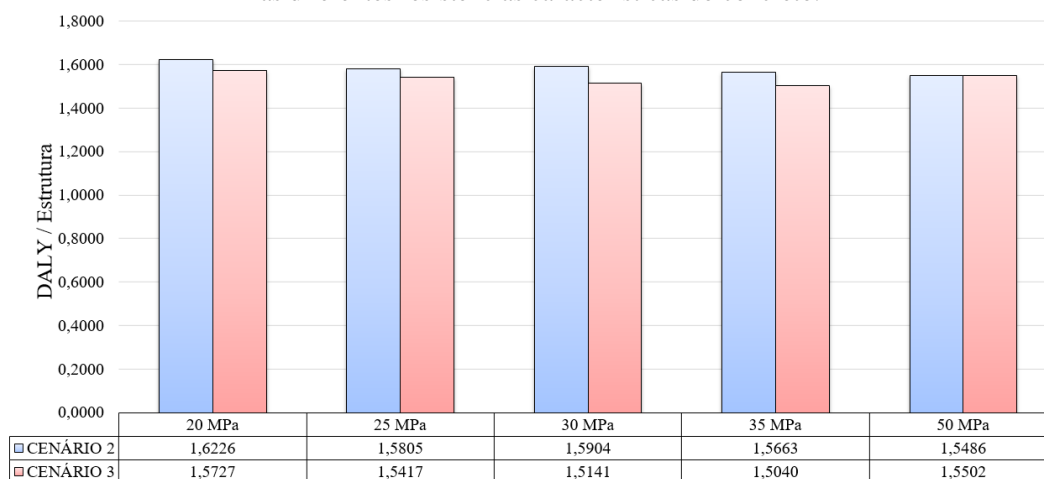
## 6.2 DESEMPENHO AMBIENTAL DA ESTRUTURA EM CONCRETO ARMADO PARA AS TRÊS CATEGORIAS DE DANOS

Essa avaliação – que combina uma série de categorias de impactos em uma categoria de danos de parâmetros finais – gera as categorias de danos para a saúde humana, aos ecossistemas e aos recursos.

O primeiro dano avaliado para os cenários 2 e 3 de estudo foi à saúde humana (DALY/estrutura), quando se estima o número de anos de vida perdidos e o número de anos vividos com deficiência. Esse dano reúne as categorias de impacto: aquecimento global saúde humana, depleção estratosférica de ozônio, radiação ionizante, formação ozônio saúde humana, formação de partículas finas, toxicidade carcinogênica humana e não carcinogênica humana.

Pode-se verificar, por meio do Gráfico 84, que quando comparados os dois cenários de estudo, o cenário 3 apresenta um desempenho ambiental melhor na maioria das resistências características do concreto da estrutura avaliada. E quando avaliado cada cenário individualmente, a resistência de 50 MPa é menos danosa à saúde humana para o cenário 2 e a de 35 MPa para o cenário 3.

Gráfico 84 – Danos à Saúde Humana da estrutura em concreto armado para os dois cenários de estudo avaliados nas diferentes resistências características do concreto.

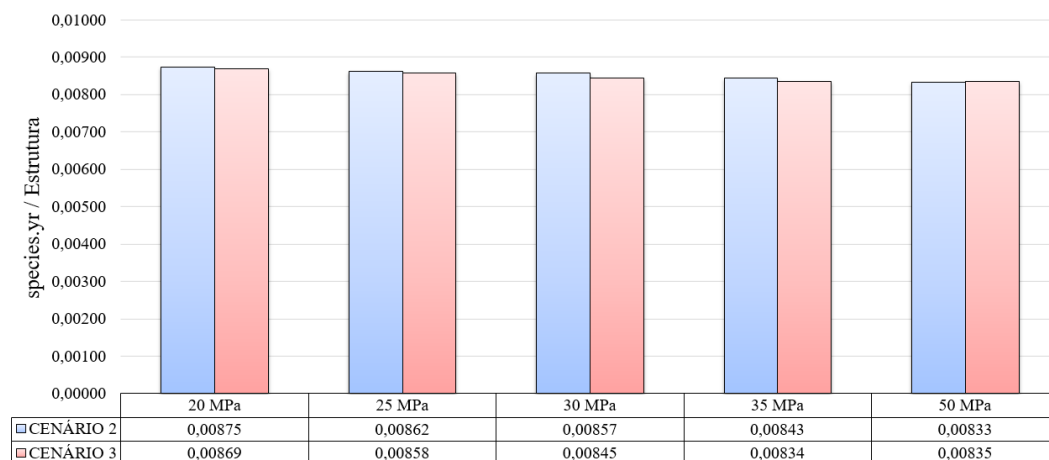


Fonte: O autor.

O segundo dano avaliado foi aos ecossistemas (espécies.yr / estrutura), que reúne as seguintes categorias de impacto: aquecimento global – ecossistemas terrestres e ecossistemas de água doce, formação de ozônio – ecossistemas terrestres, acidificação terrestre, eutrofização marinha e terrestre, ecotoxicidade terrestre em água doce e marinha, uso da terra e consumo de água – ecossistemas terrestre e aquáticos. A unidade do dano indica a perda de espécies sobre uma determinada área durante um certo tempo.

Quando comparados os cenários de estudo, conforme o Gráfico 85, o cenário 3 é o menos danoso na maioria das resistências características do concreto. Por sua vez, quando se avalia cada cenário individualmente, a resistência de 50 MPa no cenário 2 e a de 35 MPa no cenário 3 são as que se apresentam menos danosas aos ecossistemas.

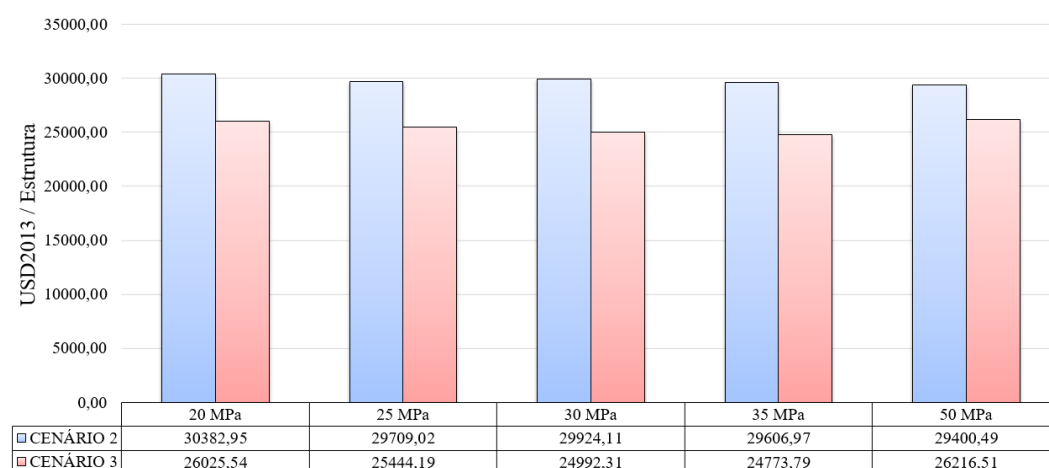
Gráfico 85 – Danos aos Ecossistemas da estrutura em concreto armado nos dois cenários de estudo avaliados nas diferentes resistências características do concreto.



Fonte: O autor.

O último dano avaliado refere-se aos recursos (USD2013 / estrutura), indica os custos excedentes da futura produção de recursos ao longo de um período infinito e é composto pelas categorias de impacto: escassez de recursos minerais e fósseis. Novamente, quando comparado os cenários de estudo, o cenário 3 se apresenta menos danoso em todas as resistências. Já quando se avalia cada cenário individualmente, a resistência característica do concreto de 50 MPa tem o melhor comportamento no cenário 2 e a de 35 MPa no cenário 3, segundo o Gráfico 86.

Gráfico 86 – Danos aos Recursos da estrutura em concreto armado nos dois cenários de estudo avaliados nas diferentes resistências características do concreto.



Fonte: O autor.



## 7 ANÁLISES E COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS

### 7.1 ELEMENTOS ESTRUTURAIS DIMENSIONADOS DE MANEIRA ISOLADA

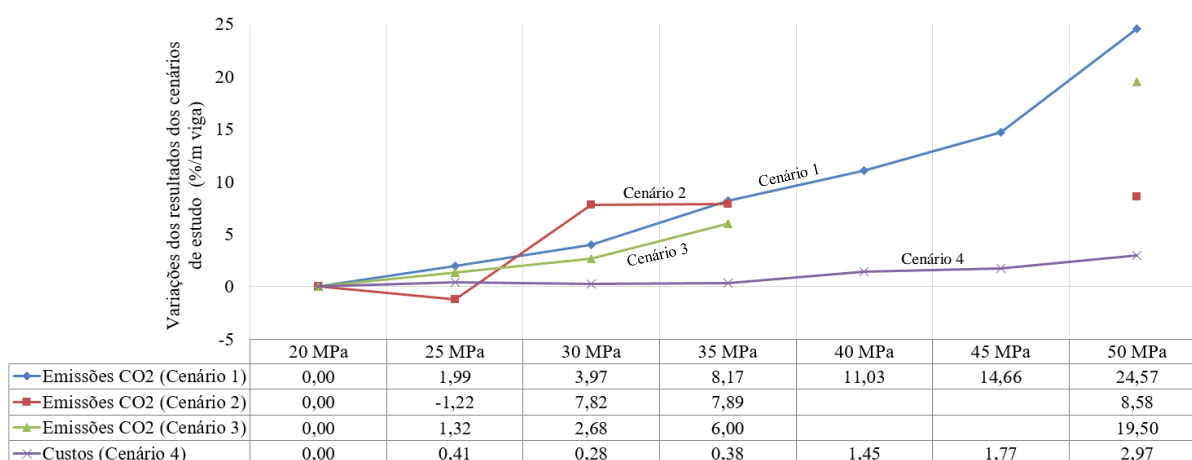
Os resultados obtidos dos dimensionamentos otimizados nas diferentes resistências características do concreto das vigas com diversos vãos e dos pilares com diferentes esforços atuantes foram avaliados e são apresentados na sequência, podendo-se verificar, para todos os cenários de estudo, as variações e os comportamentos em relação às emissões de CO<sub>2</sub> e aos custos.

#### 7.1.1 Vigas dimensionadas de maneira otimizada

As variações e os comportamentos dos resultados de cada cenário de estudo das vigas otimizadas para os vãos de 3, 6, 9 e 12 metros, a partir do acréscimo da resistência característica de 20 MPa do concreto, são apresentadas nos Gráficos 87, 88, 89 e 90.

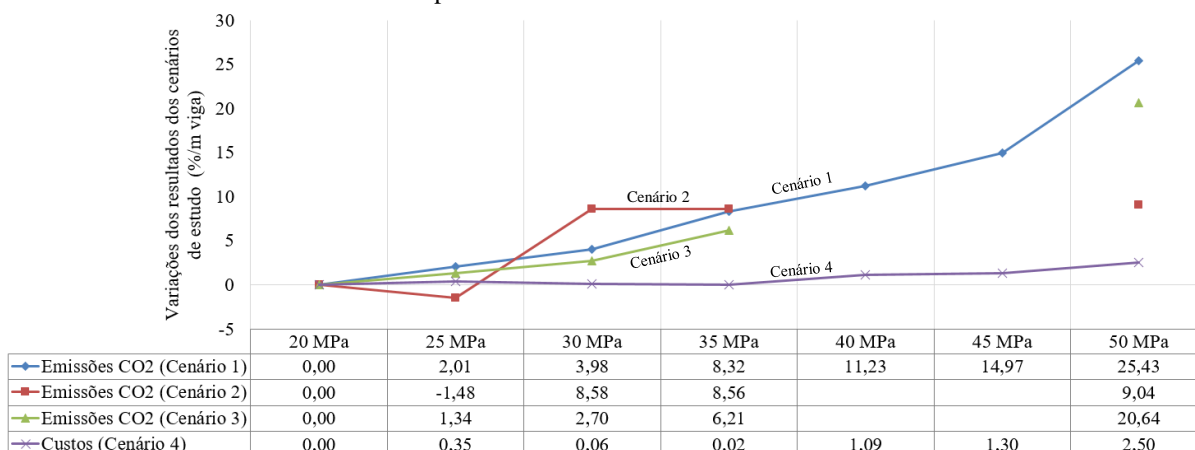
No tocante aos três cenários de emissões de CO<sub>2</sub>, as resistências características menores se apresentaram como mais viáveis ambientalmente. Em relação aos custos, cenário 4 de estudo, a escolha da resistência mais viável está atrelada à dimensão do vão da viga dimensionada, posto que para vãos menores, resistências menores são mais viáveis economicamente, já para vãos maiores, as resistências maiores se tornam as melhores.

Gráfico 87 – Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para as vigas otimizadas com vão de 3 metros a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



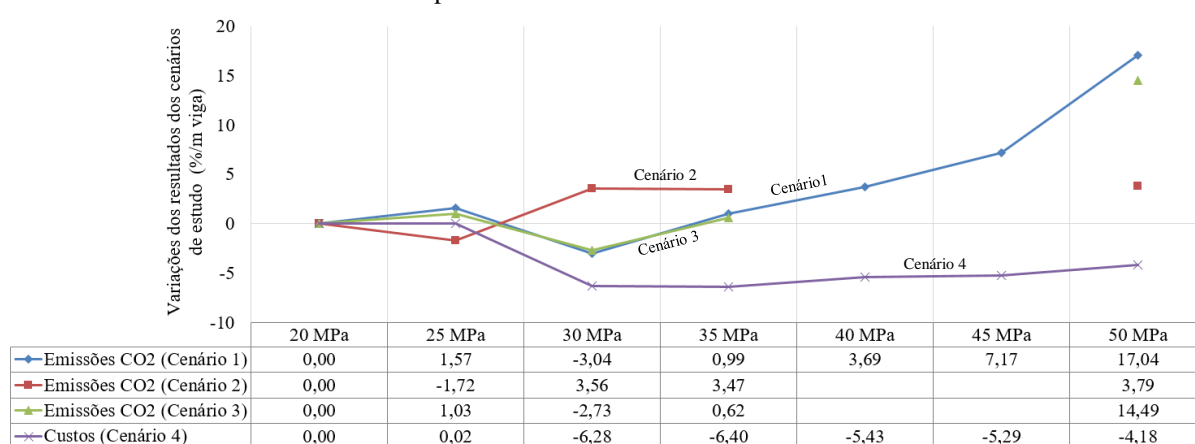
Fonte: O autor.

Gráfico 88 – Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para as vigas otimizadas com vão livre 6 metros a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



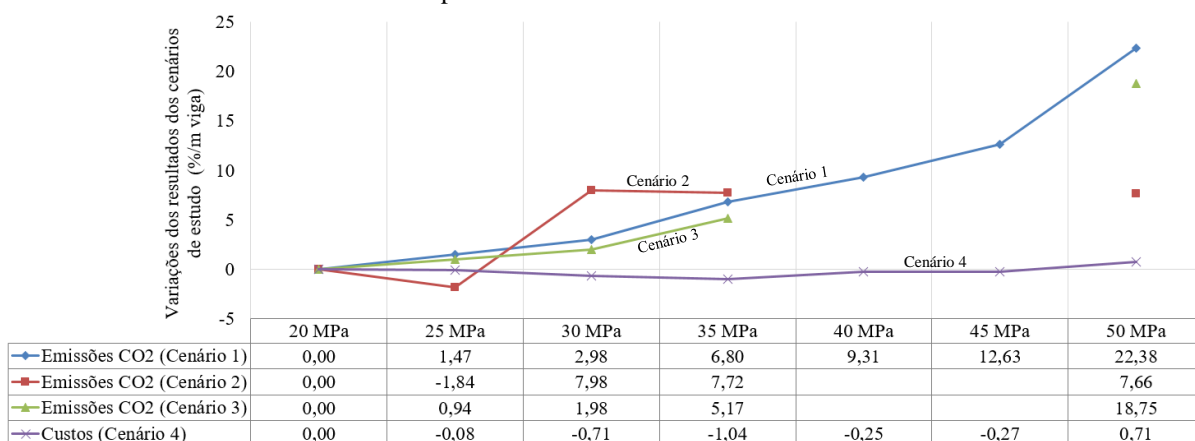
Fonte: O autor.

Gráfico 89 – Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para as vigas otimizadas com vão livre 9 metros a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



Fonte: O autor.

Gráfico 90 – Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para as vigas otimizadas com vão livre 12 metros a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



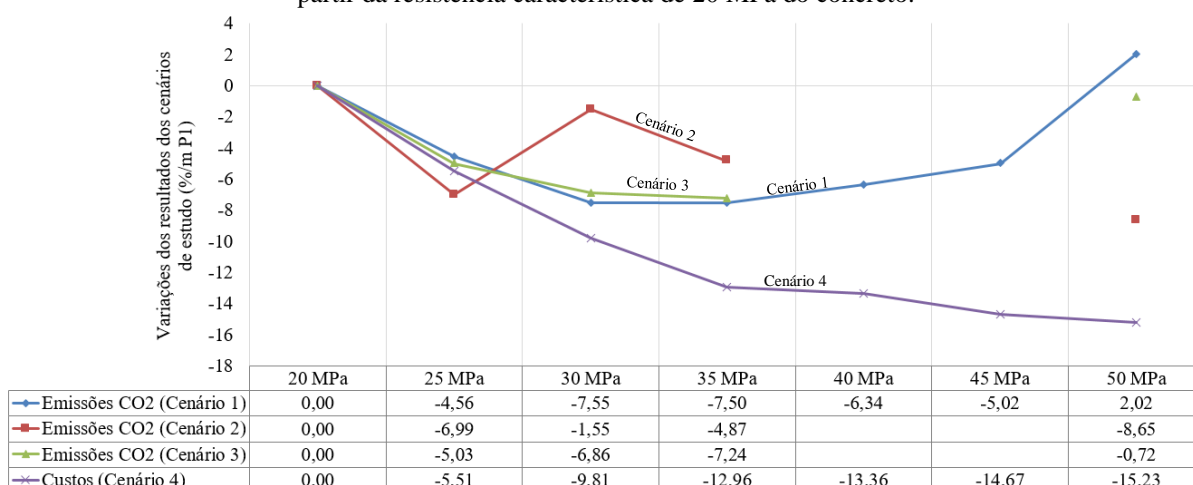
Fonte: O autor.

### 7.1.2 Pilares dimensionados de maneira otimizada

As variações e os comportamentos dos resultados das emissões de CO<sub>2</sub> e dos custos, a partir do acréscimo da resistência característica de 20 MPa do concreto de todos os pilares e cenários de estudo, podem ser verificadas nos Gráficos 91, 92, 93 e 94.

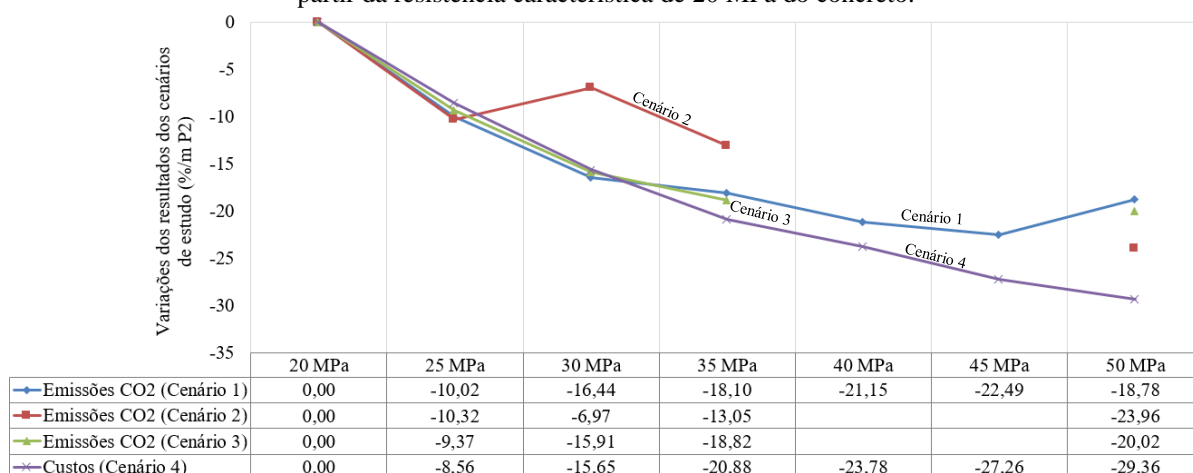
A maioria dos pilares, em todos os cenários de estudo e esforços atuantes, apresentaram as resistências maiores como as mais viáveis tanto na questão ambiental como econômica, tendo comportamento diferenciado em alguns cenários de estudo para o P1. Isso ocorreu porque os esforços atuantes no P1 foram pequenos e as restrições de norma não possibilitaram uma maior redução nas dimensões com o acréscimo da resistência característica do concreto.

Gráfico 91 – Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para os P1 otimizados a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



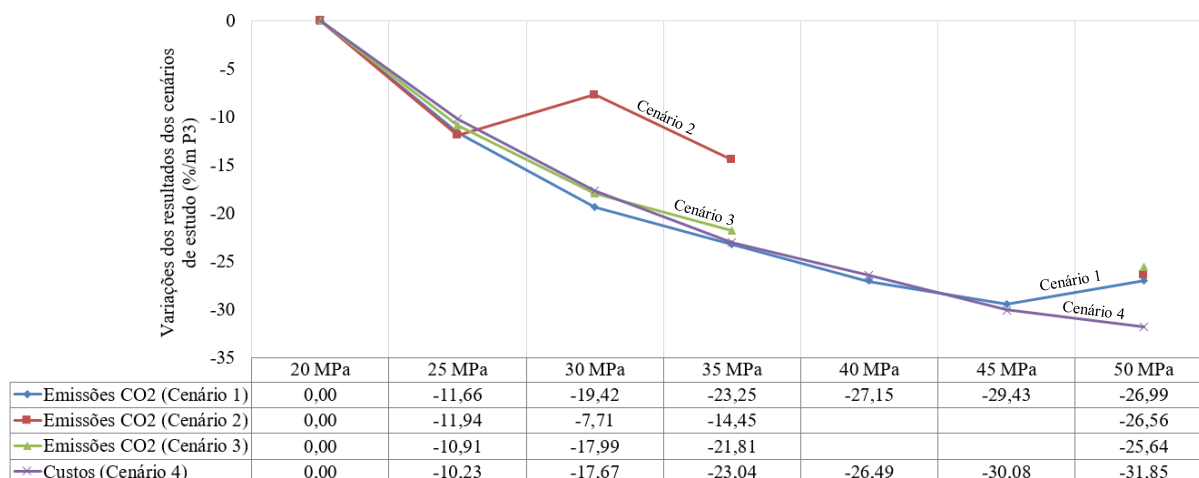
Fonte: O autor.

Gráfico 92 – Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para os P2 otimizados a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



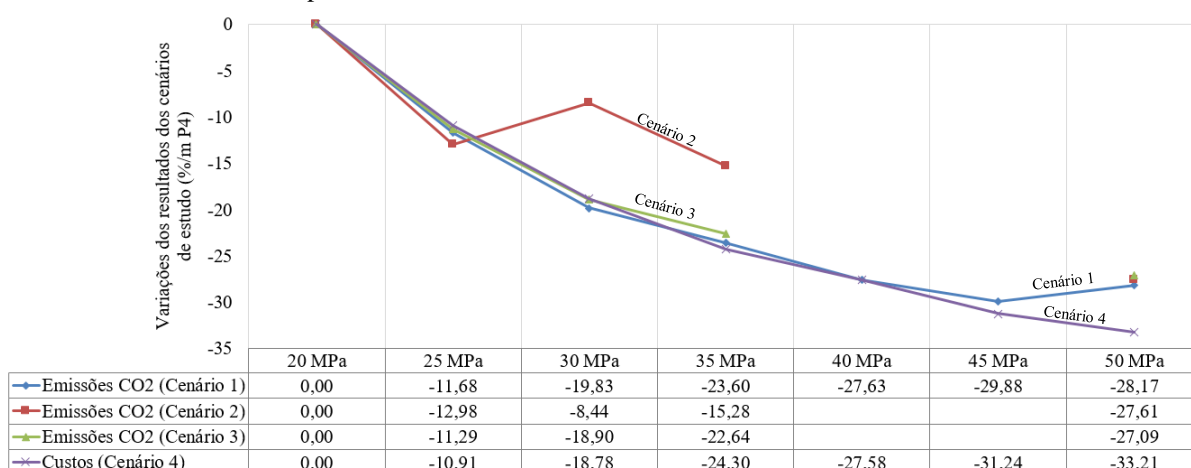
Fonte: O autor.

Gráfico 93 – Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para os P3 otimizados a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



Fonte: O autor.

Gráfico 94 – Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para os P4 otimizados a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



Fonte: O autor.

## 7.2 ELEMENTOS ESTRUTURAIS DIMENSIONADOS NA ESTRUTURA

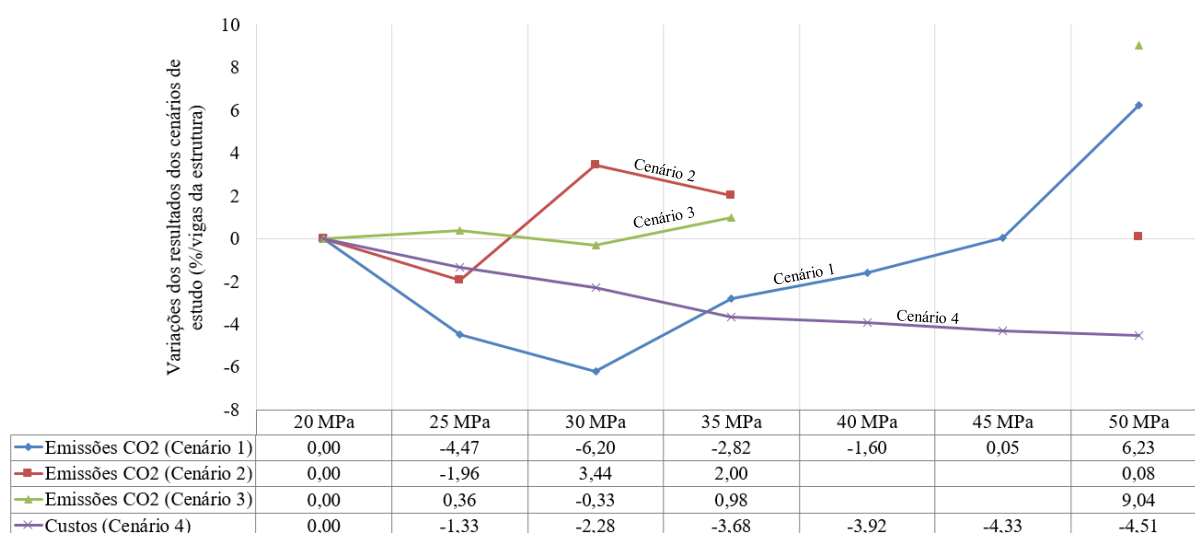
Os resultados do dimensionamento da estrutura em concreto armado, levando em consideração as emissões de CO<sub>2</sub> e os custos obtidos para cada cenário de estudo, foram avaliados e são comparados na sequência, quando se apresenta os comportamentos dos resultados obtidos para cada elemento estrutural nas diferentes resistências características do concreto.

### 7.2.1 Vigas dimensionadas na estrutura em concreto armado

As variações dos resultados e os comportamentos das emissões de CO<sub>2</sub> e dos custos obtidos para as vigas dimensionadas na estrutura, a partir do acréscimo da resistência característica de 20 MPa do concreto para todos os cenários de estudo, são apresentados no Gráfico 95.

Nesse sentido, constatou-se que, nos três cenários que tratam a questão ambiental das vigas da estrutura, as mais viáveis foram as dimensionadas com o concreto de resistência menor. Já no que tange às questões econômicas, as resistências maiores se apresentaram melhores.

Gráfico 95 – Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para as vigas dimensionadas na estrutura a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



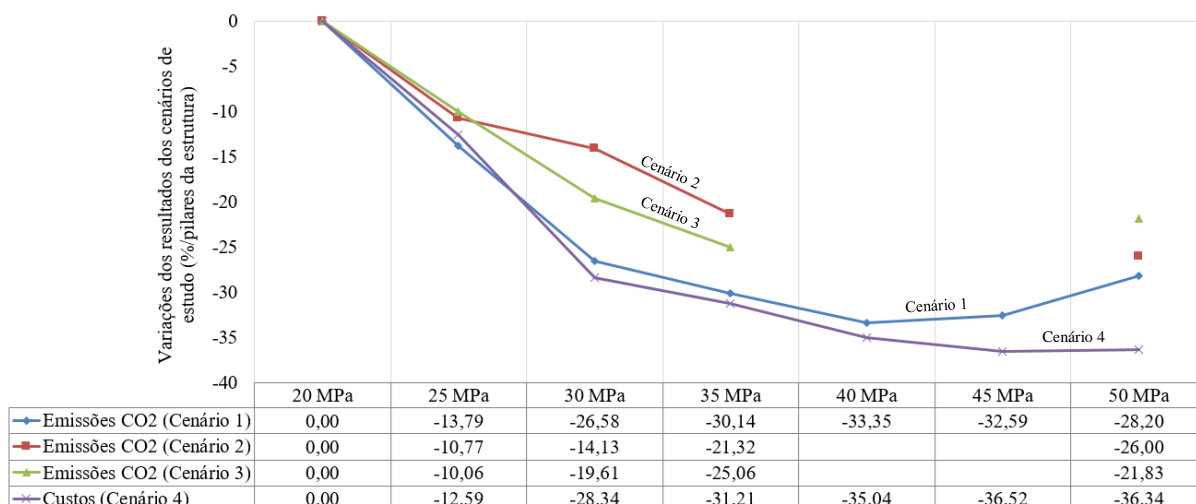
Fonte: O autor.

### 7.2.2 Pilares dimensionados na estrutura em concreto armado

As variações e os comportamentos dos resultados de emissões de CO<sub>2</sub> e custos obtidos para os pilares da estrutura, a partir do acréscimo da resistência característica de 20 MPa do concreto para todos os cenários de estudo, são apresentados no Gráfico 96.

Evidenciou-se, para todos os cenários, tanto ambiental como econômico, que os pilares dimensionados com concreto de maior resistência se apresentaram como os mais viáveis.

Gráfico 96 – Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para os pilares dimensionados na estrutura a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.

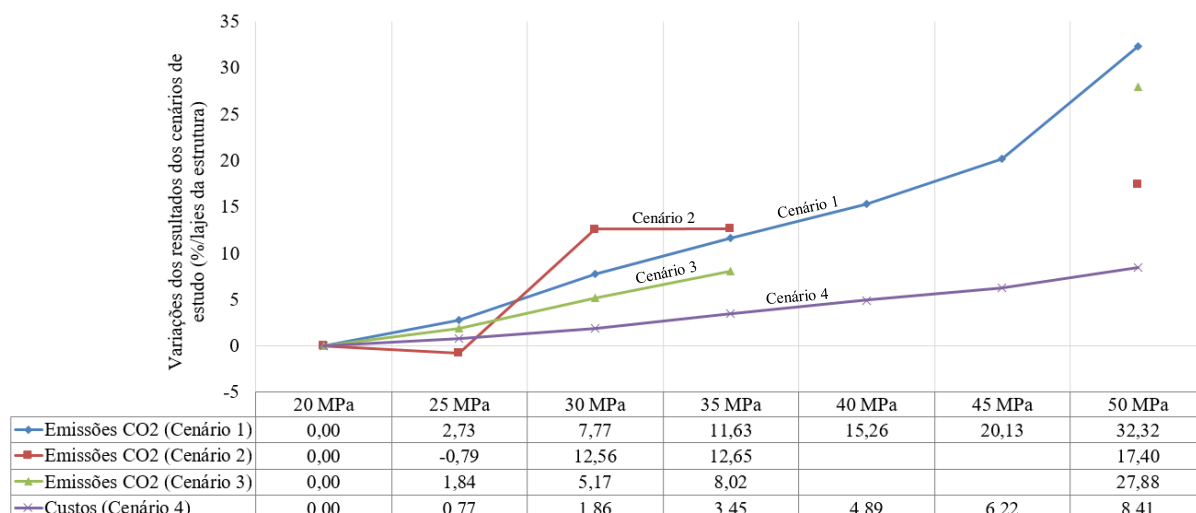


Fonte: O autor.

### 7.2.3 Lajes, escadas e fundações dimensionadas na estrutura de concreto armado

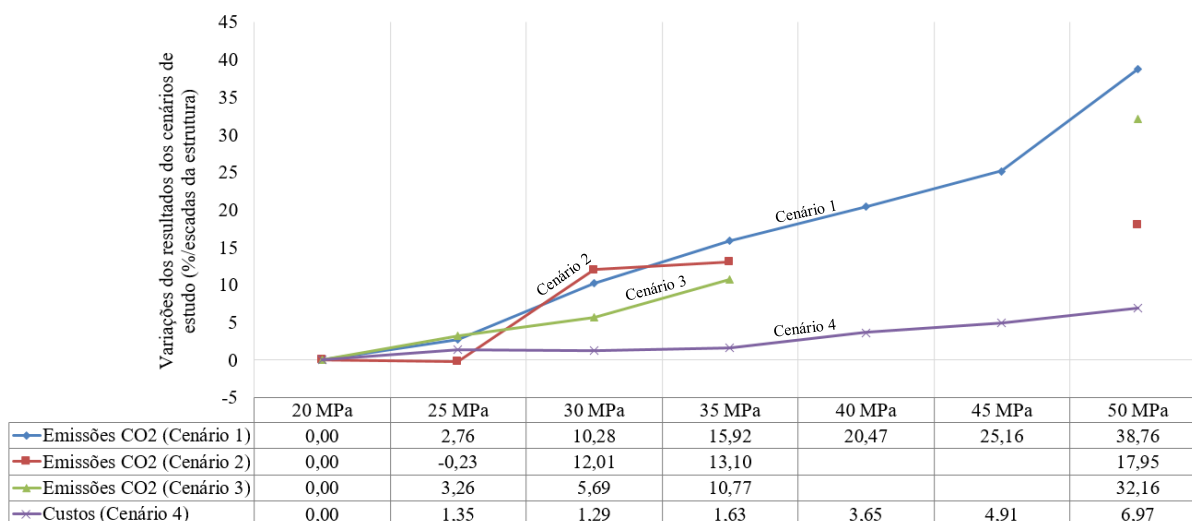
Os elementos estruturais, lajes, escadas e fundações, apresentaram variações e comportamentos dos resultados de emissões de CO<sub>2</sub> e custos para todos os cenários de estudo, a partir da variação da resistência característica de 20 MPa do concreto, que podem ser verificados nos Gráficos 97, 98 e 99. Isso posto, verificou-se que as resistências características menores se apresentaram como as mais viáveis ambiental e economicamente para todos esses elementos e em todos os cenários de estudo.

Gráfico 97 – Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para as lajes dimensionadas na estrutura a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



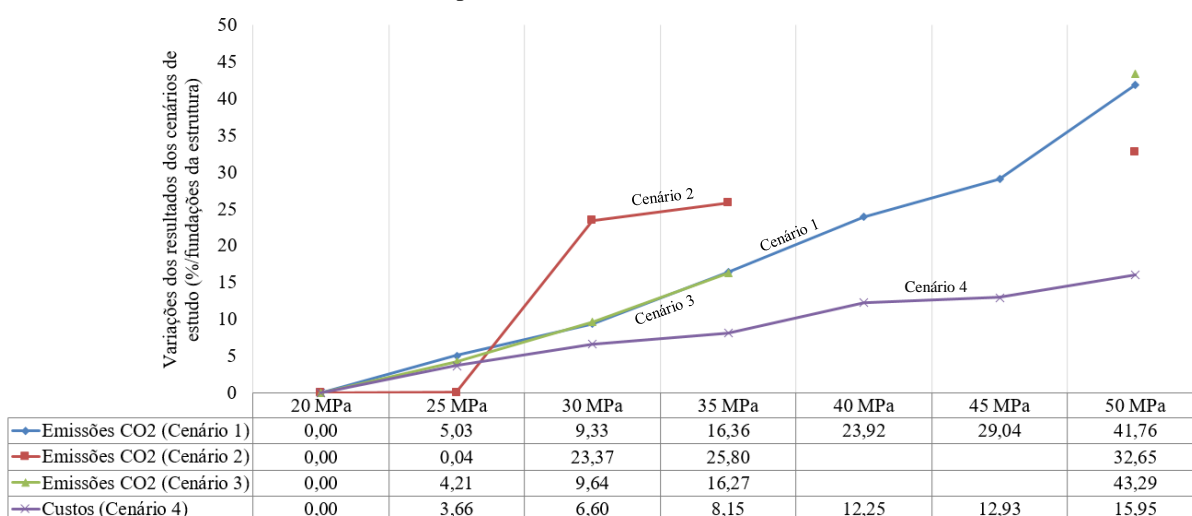
Fonte: O autor.

Gráfico 98 – Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para as escadas dimensionadas na estrutura a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



Fonte: O autor.

Gráfico 99 – Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para as fundações dimensionadas na estrutura a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.



Fonte: O autor.

## 7.3 ESTRUTURA DIMENSIONADA EM CONCRETO ARMADO

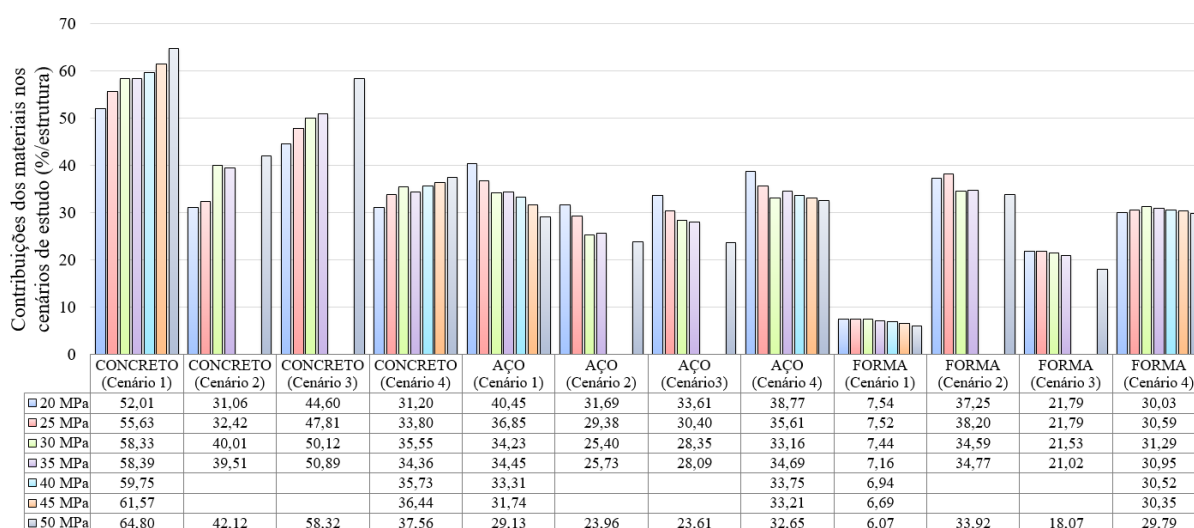
### 7.3.1 Contribuições e comportamentos dos materiais

A contribuição de cada material constituinte do concreto armado nos resultados de emissões de CO<sub>2</sub> e custos obtida para a estrutura dimensionada para cada cenário de estudo pode ser verificada no Gráfico 100.

Existe variação considerável de contribuição de cada material quando comparado um cenário de estudo com outro devido às diferenças significativas dos valores unitários de emissões de CO<sub>2</sub> e custos obtidos para cada material nos levantamentos realizados.

Contudo, em todos os cenários de estudo, o concreto apresentou um acréscimo de contribuição quando se acresceu a resistência característica de cálculo, já o aço apresentou o comportamento inverso, isto é, diminuiu a sua contribuição. A contribuição da forma se manteve mais constante, apenas apresentando pequenos decréscimos em razão do acréscimo da resistência característica.

Gráfico 100 – Contribuições percentuais dos materiais nos resultados obtidos para as estruturas em cada cenário de estudo e nas diferentes resistências características do concreto.



Fonte: O autor.

### 7.3.2 Contribuições e comportamentos dos elementos estruturais

A contribuição de cada elemento estrutural nos resultados das emissões de CO<sub>2</sub>, em cada cenário de estudo e para as diferentes resistências características do concreto, pode ser verificada no Gráfico 101.

Quando avaliada a contribuição das vigas a partir do acréscimo da resistência característica do concreto, verificou-se uma semelhança e uniformidade de contribuições nos três cenários avaliados, somente com pequenas variações, até 1,36%. De maneira geral, pode-se considerar que as vigas contribuíram, em média, com 25% das emissões totais da estrutura nos cenários de estudo de emissões de CO<sub>2</sub>.



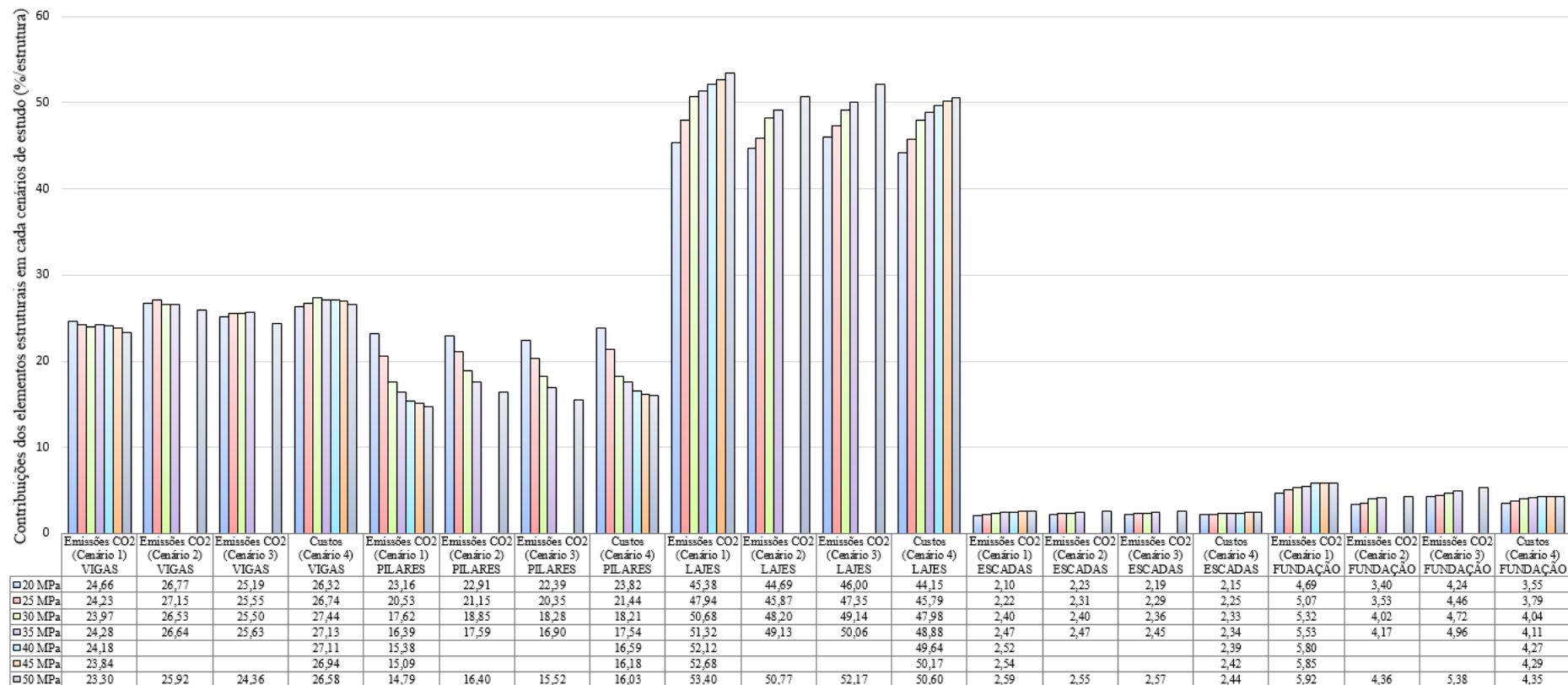
Os pilares, diferentemente das vigas, tiveram suas contribuições nas emissões de CO<sub>2</sub> da estrutura reduzidas em até 8,37% a partir do acréscimo da resistência característica do concreto. Essas reduções se apresentaram semelhantes em seu comportamento para os três cenários de estudo, o que indica uma contribuição média na estrutura por parte dos pilares de aproximadamente 18%.

Contribuindo com a maior porcentagem nas emissões de CO<sub>2</sub> da estrutura, média de aproximadamente 49%, as lajes apresentaram, a partir do acréscimo da resistência característica do concreto para os três cenários, acréscimos de contribuição nas emissões, chegando em até 8,02%.

Já para as escadas e fundações, verificaram-se contribuições menores, média de 3% e 5%, respectivamente, das emissões totais da estrutura. O acréscimo da resistência característica do concreto da estrutura gerou um acréscimo pequeno de contribuição nas emissões totais de CO<sub>2</sub>: para as escadas em até 0,49%, e para as fundações em até 1,23%.

Por fim, ao avaliar a contribuição de cada elemento estrutural para o cenário 4, custos, observou-se uma grande semelhança do comportamento com os cenários anteriormente avaliados de emissões de CO<sub>2</sub>, tanto na questão das contribuições de cada elemento estrutural nos custos totais da estrutura como nas variações a partir do acréscimo da resistência característica do concreto.

Gráfico 101 – Contribuições percentuais de cada elemento estrutural nos resultados obtidos para a estrutura em concreto armado em cada cenário de estudo e nas diferentes resistências características do concreto.



Fonte: O autor.

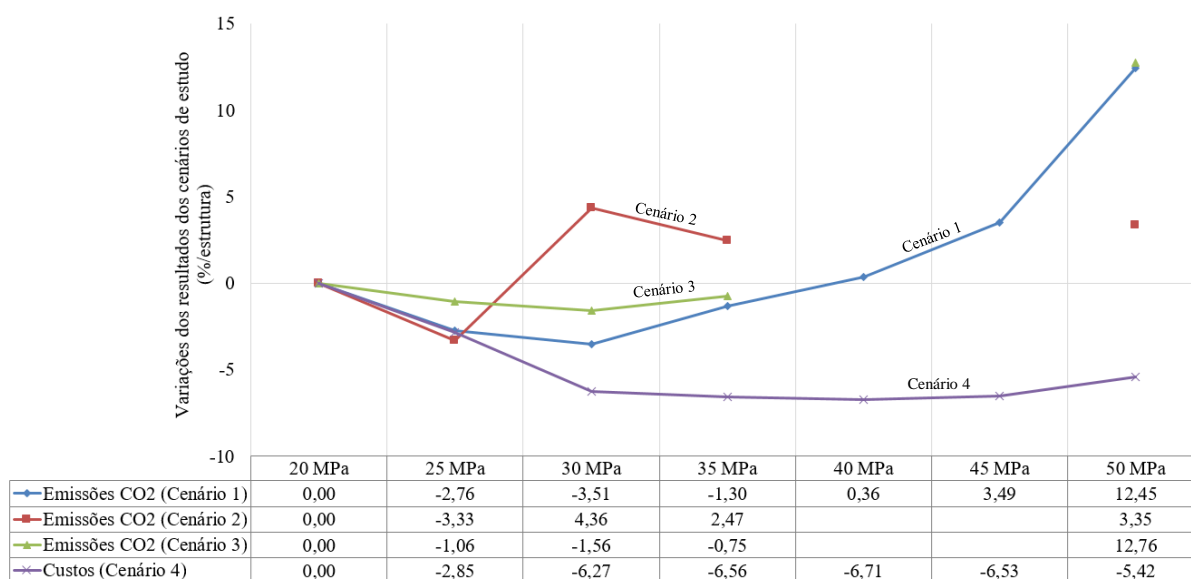
### 7.3.3 Comportamento da estrutura em concreto armado

Quando avaliados os resultados obtidos para as emissões de CO<sub>2</sub> e custos da estrutura dimensionada em concreto armado para os diversos cenários de estudo e resistências características do concreto, tem-se, no Gráfico 102, os comportamentos das variações desses resultados a partir do acréscimo da resistência de 20 MPa do concreto. Com base na análise do gráfico, concluiu-se que as resistências menores, 25 MPa para o cenário 2 e 30 MPa para os cenários 1 e 3, se apresentaram como as mais viáveis ambientalmente; já para o cenário 4, a resistência de 40 MPa demonstrou ser a mais viável economicamente.

Observou-se, também, que os cenários 1 e 3 apresentaram valores de variações percentuais que se mantiveram semelhantes e muito diferentes das variações do cenário 2 de estudo. Tal semelhança reforça a importância e o entendimento de que os ajustes dos valores das dosagens dos traços de concreto, das distâncias de transporte e dos consumos de energia elétrica na base de dados do software ao gerar o cenário 3 traduziu-se em resultados mais condizentes e semelhantes com os obtidos na região de estudo, cenário 1.

Já o cenário 4 apresentou variações percentuais bem menores, mantendo-se na casa de 1% para a maioria das resistências características.

Gráfico 102 – Variações percentuais dos resultados obtidos em cada cenário de estudo para a estrutura dimensionada a partir da resistência característica de 20 MPa do concreto.

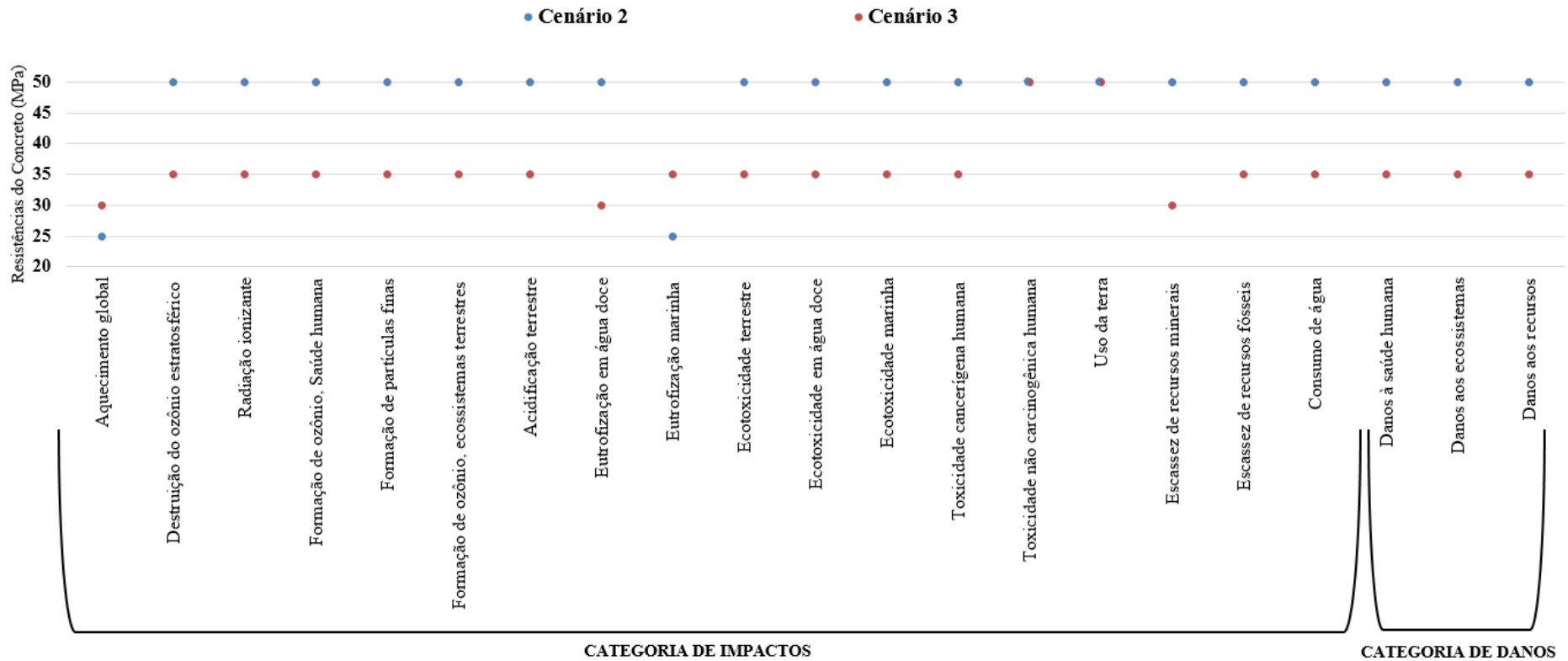


Fonte: O autor.

7.3.4 Comportamento das categorias de impacto e danos ambientais da estrutura

A avaliação de todas as categorias de impactos e danos ambientais apresentou as resistências características do concreto da estrutura de 50 MPa para o cenário 2 e 35 MPa para o cenário 3 como as mais viáveis ambientalmente na maioria das categorias avaliadas, segundo o Gráfico 103.

Gráfico 103 – Resistências características do concreto da estrutura mais viáveis ambientalmente para as diferentes categorias de impactos e danos.



Fonte: O autor.

## 8 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo objetivou a busca de subsídios para a obtenção e minimização do impacto ambiental no que diz respeito às emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), a fim de que eles sejam considerados durante a realização de estudos e na elaboração de projetos estruturais em concreto armado. Paralelamente, também foram trabalhadas as questões dos custos dessas mesmas estruturas.

Inicialmente, constatou-se, a partir do referencial teórico revisado, que os estudos a respeito do tema se concentram, quando o objetivo é a busca de estratégias de mitigação dos valores de emissões de CO<sub>2</sub> do concreto armado, na produção do aglomerante e suas adições, bem como na fase de dimensionamento das estruturas com a definição das resistências características do concreto mais viáveis.

Isso dito, quatro cenários de estudo para uma mesma região foram gerados, sendo três de emissões de CO<sub>2</sub> e um de custos, com as seguintes unidades de medida trabalhadas: metro cúbico para o concreto, quilograma para o aço e metro quadrado para a forma de madeira.

O cenário 1 foi gerado a partir de levantamentos realizados na região de estudo e complementado com dados obtidos em referenciais teóricos, já os cenários 2 e 3 foram gerados a partir da utilização de software de análise ambiental, o primeiro utilizou o banco de dados global existente no software, e o segundo, o banco de dados existente ajustado com os valores das distâncias de transportes, dos traços de concreto e dos consumos de energia obtidos para a região de estudo. E, por fim, o cenário 4, econômico, foi gerado a partir dos custos médios dos materiais na região de estudo.

Os cenários de estudo apresentaram diferenças percentuais consideráveis nos valores das unidades de medida das emissões de CO<sub>2</sub>, com até 125,28% nos concretos com diferentes resistências características, 100% nos aços e 1.250% nas formas de madeira. Quando comparadas as variações percentuais dos cenários 1 e 3 para os concretos, a partir do acréscimo da resistência característica de 20 MPa, constatou-se semelhanças de comportamento entre elas, indício que os ajustes dos dados realizados no software geraram valores com comportamentos mais condizentes, semelhantes à região de estudo.

Também, observou-se que em todos os cenários de emissões de CO<sub>2</sub> o aglomerante é a matéria-prima com maior contribuição, com valores sempre acima de 85%, indicando a sua grande influência nos resultados de emissões do concreto, e justificando a tendência

apresentada no referencial teórico de grande concentração de estudos na produção do aglomerante quando busca-se a minimização das emissões de CO<sub>2</sub> do concreto.

Para a obtenção dos resultados mais viáveis tanto nas questões ambientais como econômicas, a partir dos valores obtidos para cada cenário de estudo e diferentes resistências características do concreto, foram realizados dimensionamentos otimizados de vigas com diferentes vãos e pilares com diferentes esforços atuantes, bem como dimensionada uma estrutura em concreto armado.

As vigas dimensionadas de forma otimizada em todos os cenários de emissões de CO<sub>2</sub> demonstraram a resistência menor como a mais viável ambientalmente, indicando que as reduções de consumo dos materiais devido ao acréscimo da resistência característica do concreto não foram suficientes para viabilizar a utilização das resistências maiores. Já para o cenário econômico, constatou-se que resistências menores são mais viáveis para os vãos menores das vigas, tendendo a inverter seu comportamento com o acréscimo da dimensão dos vãos.

No tocante aos pilares otimizados, em todos os cenários de estudo eles apresentaram a resistência maior como a mais viável tanto na questão ambiental como na econômica. Observou-se, ainda, que quanto maior o esforço atuante no pilar, maiores serão as variações dos resultados obtidos com o acréscimo da resistência do concreto. Assim, as reduções de consumo de materiais com o acréscimo da resistência característica do concreto se apresentaram mais viáveis nos dimensionamentos dos pilares.

Já quando dimensionada e avaliada a estrutura de concreto armado, percebeu-se que as vigas mais viáveis ambientalmente em todos os cenários de estudo foram as dimensionadas com os concretos de resistências características menores, ou seja, segue a tendência verificada anteriormente para as vigas dimensionadas de maneira otimizada. E economicamente, as resistências maiores se apresentaram melhores para as vigas da estrutura.

Em relação aos pilares da estrutura, as resistências maiores se apresentaram melhores ambiental e economicamente em todos os cenários de estudo, da mesma forma que se apresentaram nos dimensionamentos otimizados de pilares.

No que tange ao comportamento das lajes, escadas e fundações da estrutura, constatou-se, para todos os cenários de estudo, a resistência menor como a mais viável tanto para a questão ambiental como econômica. Portanto, o fato de o acréscimo da resistência do concreto não gerar grandes reduções de volumes quando do dimensionamento desses elementos estruturais torna a resistência característica menor como a mais viável.

Para mais, a contribuição de cada material (concreto, aço e forma) nas emissões de CO<sub>2</sub> da estrutura apresentou, quando comparados os cenários de estudo, diferenças significativas, seguindo a mesma tendência das diferenças dos valores unitários obtidos em cada cenário.

A saber, o concreto se apresentou como o maior contribuinte em todos os cenários de estudo da estrutura, tendo aumentado sua contribuição com o acréscimo da resistência característica do concreto, demonstrando que a redução do volume de concreto pelo acréscimo da resistência característica não foi suficiente para diminuir sua contribuição nas emissões de CO<sub>2</sub>. Já o aço revelou comportamento inverso, diminuindo sua contribuição com o aumento da resistência característica do concreto da estrutura, indicando que o acréscimo da resistência diminuiu a utilização do aço. Quanto às formas, observou-se o mesmo comportamento do aço, isto é, o aumento da resistência do concreto gerou a redução das dimensões dos elementos estruturais e conseqüente diminuição das áreas de forma e contribuição.

Já quando avaliada a contribuição de cada elemento estrutural nos diferentes cenários de estudo e nas diferentes resistências características do concreto, verificou-se contribuições semelhantes de cada elemento, sendo as lajes responsáveis, em média, por aproximadamente 49% das contribuições, as vigas 25%, os pilares 18%, e as escadas e fundações com os 8% restantes. O conhecimento da contribuição e influência de cada elemento estrutural no resultado obtido para a estrutura torna-se relevante na medida em que pode direcionar escolhas de elementos estruturais a serem estudados em relação ao seu desempenho ambiental.

Além disso, observou-se nas avaliações realizadas que, havendo a possibilidade de dimensionar e executar a estrutura utilizando a resistência mais viável obtida para cada elemento estrutural, se gera uma melhoria dos resultados em aproximadamente 5% para as emissões de CO<sub>2</sub> e custos.

A respeito da estrutura em concreto armado e seus cenários estudados, as resistências características do concreto que se apresentaram mais viáveis ambientalmente foram as menores, especificamente de 25 MPa para o cenário 2 e 30 MPa para o cenário 1 e 3. Economicamente, as resistências características maiores do concreto tiveram comportamento melhor na estrutura, apresentando a resistência de 40 MPa como a mais viável, destacando-se que as resistências de 30, 35 e 45 MPa apresentaram resultados muito semelhantes, com valores no máximo 0,44% maiores.

Em relação à questão ambiental avaliada, tanto para os elementos estruturais isoladamente ou para a estrutura, mesmo existindo diferenças consideráveis entre os valores de emissões de CO<sub>2</sub> em cada cenário de estudo, os resultados mais viáveis se assemelharam. Aqui

cabe destacar que ajustes da base de dados no software com as condições da região de estudo (cenário 3) lograram resultados idênticos aos obtidos para a região de estudo (cenário 1) e diferentes aos do cenário 2.

Paralelamente ao estudo, para os cenários 2 e 3 que utilizaram o software de análise SimaPro, foram gerados e avaliados os impactos e danos ambientais da estrutura de concreto armado dimensionada, obtendo-se a resistência característica do concreto de 50 MPa no cenário 2 e a de 35 MPa no cenário 3 como as mais viáveis para a maioria das categorias. Esses resultados corroboram também para demonstrar a relevância dos ajustes com valores de dados locais na base de dados mundial do software, pelo fato da ocorrência de mudança da resistência mais viável quando comparado um cenário com o outro.

E, por fim, para a questão ambiental e econômica avaliada, no que diz respeito à estrutura em concreto armado, pode-se concluir e sugerir a partir do estudo realizado:

- a) utilizar dados para a avaliação do impacto ambiental que expressem as condições existentes na região de estudo, independentemente do método utilizado, se traduz na obtenção de resultados mais condizentes e mais próximos com a realidade local;
- b) optar pela utilização de traços de concreto com porcentagens menores de aglomerante para a mesma resistência característica, colabora em muito com a minimização das emissões de CO<sub>2</sub> do concreto devido à majoritária contribuição e influência dessa matéria-prima na composição final das emissões;
- c) trabalhar com resistências características do concreto menores para as vigas, lajes, escadas e fundações e maiores para os pilares – quando possível e viável – possibilita a obtenção de estruturas com menor impacto ambiental final em relação a emissões de CO<sub>2</sub> do concreto armado.
- d) optar pela resistência característica do concreto mais viável ambientalmente neste estudo se estará reduzindo em até 14,19% as emissões de CO<sub>2</sub> da estrutura dimensionada.
- e) optar pela resistência característica do concreto mais viável economicamente neste estudo se estará reduzindo em até 6,71% os custos da estrutura dimensionada.



## 8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e avaliados neste estudo, sugere-se, como aprimoramento ao que já foi desenvolvido:

- a) dar continuidade aos estudos, trabalhando com as resistências características do concreto da classe de resistência do Grupo II (resistências características à compressão entre 55 e 100 MPa), da NBR 8953 (ABNT, 2015), verificando e comparando o comportamento das emissões de CO<sub>2</sub> quando dimensionados elementos ou estruturas em concreto armado com essas resistências superiores;
- b) avaliar e comparar, para diferentes resistências características do concreto, pela majoritária contribuição nos resultados obtidos, diferentes tipologias de lajes para estruturas em concreto armado, a fim de otimizar seus dimensionamentos em relação às emissões de CO<sub>2</sub>;
- c) avaliar e comparar, pela significativa contribuição nas emissões de CO<sub>2</sub> do concreto, traços de concreto com mesma resistência característica, mas com dosagens de aglomerante diferentes, buscando aferir o quanto essa variação pode impactar nos resultados;
- d) avaliar outros softwares de análise de impacto ambiental, adequando os valores da base de dados de acordo com a região de estudo específica, buscando aferir o quanto esses ajustes de dados modificam e direcionam os resultados para a realidade local.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, S. L.; LUZ, A. B. **Manual de agregados para a construção civil**. 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. 411p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – **ABCP**: Sustentabilidade. Disponível em: < <http://www.abcp.org.br/cms/sustentabilidade/meio-ambiente/sustentabilidade-meio-ambiente/>>. Acesso em: 24 maio 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 2009. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15696**: Formas e escoramentos para estruturas de concreto – Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos. Rio de Janeiro, 2009. 27 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009. 21 p.

BASTOS, E. A. **Otimização de pilares retangulares em concreto armado submetidos à flexo-compressão oblíqua utilizando algoritmos genéticos**. 2004. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

BENTO, R. C. **Análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado: uso da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no processo decisório do dimensionamento.** 2016. 216 f. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

BERNDT, M. L. Influence of concrete mix design on CO<sub>2</sub> emissions for large wind turbine foundations. **Renewable Energy**, v. 83, p. 608-614, 2015.

BITAR, O. Y. **Avaliação da recuperação de áreas degradadas por mineração na região metropolitana de São Paulo.** 1997. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia: Engenharia Mineral), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

BORDIGNON, R.; KRIPKA, M. Dimensionamento otimizado da seção transversal de pilares em concreto armado submetido à flexocompressão. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, v. 10, n. 1, p. 26-46, 2013.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Processos Industriais, Produção de Metais, Ferro e Aço.** Brasília, DF, 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Processos Industriais, Produtos Minerados, Produção de Cimento.** Brasília, DF, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013 Ano Base 2012.** Brasília, DF, 2014.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional 2018, Ano Base 2017.** Rio de Janeiro, RJ, 2018.

CABELLO, J. F.; GARCIA, E. F.; ASCACIBAR, E. M. P.; ASCACIBAR, F. J. M. P. Minimizing greenhouse gas emissions and cost for structures with flat slabs. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 922-930, 2016.

CAMPOS, E. F. **Emissões de CO<sub>2</sub> da madeira serrada da Amazônia: o caso da exploração convencional.** 2012, 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

CARNEIRO, R. M. S.; QUEVEDO, S.; FLORES, A. R. B.; ULBRICHT, V. R.; VANZIN, T. Sustentabilidade: a especificação consciente dos materiais em arquitetura. In: SEGUNDO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESIGN SUSTENTÁVEL, 2009, São Paulo, **Anais II SBDS**, São Paulo, 2009, p.1-10.

CHOI, S. W.; OH, B. K.; PARK, J. S.; PARK, H. S. Sustainable design model to reduce environmental impact of building construction with composite structures. **Journal of Cleaner Production**, v.137, p.823-832, 2016.

COLLINS, F. 2nd generation concrete construction: carbono footprint accounting. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 20, p. 330-344, 2013.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **A Indústria do Aço no Brasil**. Instituto Aço Brasil, Brasília, CNI, 2017.

COSTA, B. L. C. **Quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. 2012. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

D' ALESSANDRO, A.; FABIANI, C.; PISELLO, A. L.; UBERTINI, F.; MATERAZZI, A. L.; COTANA, F. Innovative concretes for low-carbon constructions: a review. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 12, p. 289-309, 2017.

EDVARDBSEN, C.; TOLLOSE, K. Environmentally “Green” Concrete Structures. In: FIB SYMPOSIUM CONCRETE AND ENVIRONMENT, Berlin, 2001. **Proceedings...** Berlin, 2001.

ELEFThERIADIS, S.; DUFFOUR, P.; GREENING, P.; STEPHENSON, B.; MUMOVIC, D. Investigating relationships between cost and CO<sub>2</sub> emissions in reinforced concrete structures using a BIM-based design optimisation approach. **Energy and Buildings**, v. 166, p. 330-346, 2018.

EVANGELISTA, P. P. A.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A.; GONÇALVES, J. P. Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA). **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 748-761, 2018.

FAVIER, A.; DE WOLF, C.; SCRIVENER, K.; HABERT, G. **A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry. Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050**. 2018

FRAILE-GRACIA, E.; FERREIRO-CABELLO, J.; MARTÍNEZ DE PISÓN, F. J.; PERNIA-ESPINOZA, A. V. Effects off Design and Construction on the Carbon Footprint of Reinforced Concrete Columns in Residential Buildings. **Materiales de Construcción**, v. 69, n. 335, p. 1-11, 2019.

FLOWER, D. J. M.; SANJAYAN, J. G. Green House Gas Emissions due to Concrete Manufacture. **Int J LCA**, v.12, n. 5, p. 282-288, 2007.

**GaBi Software System and Databases.** Disponível em: <<http://www.gabi-software.com/brazil/overview/what-is-gabi-software/>>. Acesso em: Abril de 2018.

GARCÍA-SEGURA, T.; YEPES, V.; ALCALÁ, J. Life cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.10, p. 3-12, 2014.

GARCÍA-SEGURA, T.; YEPES, V.; FRANGOPOL, D. M.; YANG, D. Y. Lifetime reliability-based optimization of post-tensioned box-girder bridges. **Engineering Structures**, v. 154, p 381-391, 2017.

HABERT, G.; ROUSSEL, N. Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. **Cement & Concrete Composites**, v.31, p.397-402, 2009.

HÁJEK, P.; FIALA, C.; KYNCLOVÁ, M. Life cycle assessments of concrete structures – a step towards environmental savings. **Structural Concrete**, v. 12, n. 1, 2011.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2016.** Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: 16 abr. 2018.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2018.** Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: 12 set. 2018.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 1712 p. Inclui bibliografia, referências bibliográficas e índice remissivo. ISBN v.1: 978-85-98576-18-3 v.2: 978-85-98576-19-0

JAHANDIDEH, F.; RAMAN, S. N.; JAMIL, M.; SYED, Z. I. Carbon Footprint Assessment in the Life-Cycle Design of Concrete Structures in the Tropics: A Case Study of Residential Buildings in Malaysia. **Journal of Design and Built Environment**, v. 20, n. 2, p. 27-34, 2020.

KIM, T. H.; TAE, S. H.; SUK, S. J.; FORD, G.; YANG, K. H. An Optimization System for Concrete Life Cycle Cost and Related CO<sub>2</sub> Emissions. **Sustainability Journal**, v. 8, n. 361, p. 1-16, 2016.

LEE, J.; TAE, S.; KIM, R. A Study on the Analysis of CO<sub>2</sub> Emissions of Apartment Housing in the Construction Process. **Sustainability Journal**, v. 10, n. 365, p. 1-16, 2018.

LIMA, J. A. R. **Avaliação das conseqüências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas.** 2010. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia: Engenharia de construção civil e urbana), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MACEDO, D. B. G., **Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida em edificações em um Sistema Estruturado de Aço**. 2011, 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia: Engenharia de Estruturas), Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011.

MEDEIROS, G. F. **Método da busca harmônica aplicado na otimização de seções de pilares retangulares em concreto armado considerando custos econômicos e ambientais**, 2012. 214 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia: Infraestrutura e meio ambiente), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2012.

MEDEIROS, G. F.; KRIPKA, M. Optimization of reinforced concrete columns according to different environmental impact assessment parameters. **Engineering Structures**. v. 59, p. 185-194, 2014.

MILLER, S. A.; HORVATH A.; MONTEIRO P. J. M. Readily implementable techniques can cut annual CO<sub>2</sub> emissions from the production of concrete by over 20%, **Environmental Research Letters**. v. 11, p. 1-7, 2016.

MIKULCIC, H.; KLEMES, J. J.; VUJANOVIC, M.; URBANIEC, K.; DUIC, N. Reducing greenhouse gas emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process. **Journal of Cleaner Production**, v. 136, p. 119-132, 2016.

**NIST - National Institute of Standards and Technology**. Disponível em: <https://www.nist.gov/services-resources/software/bees>. Acesso em: 19 abr. 2018.

OH, B. K.; CHOI, S. W.; PARK, H. S. Influence of variations in CO<sub>2</sub> emission data upon environmental impact of building construction. **Journal of Cleaner Production**, p. 1-10, 2016.

OLIVEIRA, A. S. **Análise Ambiental da Viabilidade da Seleção de Produtos da Construção Civil através do ACV e do Software BEES 3.0**. 2007, 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

OLIVEIRA, V. C. H. C.; DAMINELI, B. L.; AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Estratégias para a minimização da emissão de CO<sub>2</sub> de concretos. **Ambiente Construído**, v. 14, p. 167-181, 2014.

PAIK, I.; NA, S.; YOON, S. Assessment of CO<sub>2</sub> Emissions by Replacing an Ordinary Reinforced Concrete Slab with the Void Slab System in a High-Rise Commercial Residential Complex Building in South Korea. **Sustainability**, v. 11, n. 82, p. 1-14, 2019.

PARK, H. S.; KWON, B.; SHIN, Y.; KIM, Y.; HONG, T.; CHOI, S. W. Cost and CO<sub>2</sub> Emission Optimization of Steel Reinforced Concrete Columns in High-Rise Buildings. **Journal Energies**, v.6, p. 5609-5624, 2013.

PARK, H. S.; LEE, H.; KIM, Y.; HONG, T.; CHOI, S. W. Evaluation of the influence of design factors on the CO<sub>2</sub> emissions and costs of reinforced concrete columns. **Energy and Buildings**, v.82, p.378-384, 2014.

PARK, J.; TAE, S.; KIM, T. Life cycle assessment of concrete by compressive strength on construction site in Korea. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p 2940-2946, 2012.

PAYA-ZAFORTEZA, I.; YEPES, V.; GONZÁLEZ-VIDOSA, F.; HOSPITALER, A. Multiobjective optimization of concrete frames by simulated annealing, **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v.23, p.596-610, 2008.

PAYA-ZAFORTEZA, I.; YEPES, V.; HOSPIRALER, A.; GONZÁLEZ-VIDOSA, F. CO<sub>2</sub> – optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing. **Engineering Structures**, v.31, p.1501-1508, 2009.

PEINADO, H. S.; VANDERLEI, R. D.; MIOTTO, J. L.; SANTOS, W. W. F.; NAGANO, M. F. Estudo de impacto econômico e ambiental devido ao aumento da resistência do concreto na produção de pilares submetidos a pequenas cargas de compressão. **Ciência & Engenharia**, v. 22, n. 1, p. 69-78, 2013.

POSSAN, E.; FELIX, E. F.; THOMAZ, W. A. CO<sub>2</sub> uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures. **Jounal Build Rehabil**, v.1:7, p. 1-9, 2016.

PULLEN, S.; CHIVERALLS, K.; ZILLANTE, G.; PALMER, J.; WILSON, W. ; ZUO, J. **Minimising the Impact of Resource Consumption in the Design and Construction of Buildings**. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE ARCHITECTURAL SCIENCE ASSOCIATION, Queensland, 2012. Proceedings... Queensland, 2012.

PURNELL, P. Material Nature versus Structural Nurture: The Embodied Carbon of Fundamental Structural Elements. **Environmental Science & Technology**, v. 46, p. 454-461, 2012.

SANTORO, J. F. **Determinação de parâmetros ambientais para o dimensionamento otimizado de estruturas em concreto armado**. 2015. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2015.

SANTORO, J. F., KRIPKA, M. Studies on Environmental Impact Assessment of Reinforced Concrete in Different Life Cycle Phases. **International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research**, v. 1, p. 32-40, 2017.

SILVA, B. V. **Construção de ferramenta para avaliação do ciclo de vida de edificações**. 2013. 146 f. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

**SimaPro PRé Consultants.** Disponível em: <<https://simapro.com/>>. Acesso em: 27 abr. 2018.

SOUTO-MARTINEZ, A.; AREHART, J. H.; SRUBAR III, W. V. Cradle-to-gate CO<sub>2</sub>e emissions vs. in situ CO<sub>2</sub> sequestration of structural concrete elements. **Energy and Buildings**, v.167, p. 301-311, 2018.

SOUZA, A. **Avaliação do ciclo de vida da areia em mineradora de pequeno porte, na região de São José do Rio Preto – SP.** 2012. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

TOGAN, V. **Design of planar steel frames using teaching-learning based optimization.** *Engineering Structures*, v. 34, p. 225-232, 2012.

**Umberto LCA+ ifu hamburg.** Disponível em:< <https://www.ifu.com/umberto/>>. Acesso em: 26 abr. 2018.

VIEIRA, D. R.; CALMON, J. L.; COELHO, F. Z. Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 124, p.656-666, out. 2016.

WALACH, D.; DYBEL, P.; SAGAN, J.; GICALA, M. Environmental of ordinary and new generation concrete structures-a comparative analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 3980-3990, 2019.

WBCSD – WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT; **Cement Sustainability Initiative.** Disponível em:<https://www.wbcsd.org/Projects/Cement-Sustainability-Initiative/News/Cement-technology-roadmap-shows-how-the-path-to-achieve-CO2-reductions-up-to-24-by-2050>>. Acesso em: 19 abr. 2018.

WILLERS, C. D.; RODRIGUES, L. B.; SILVA, C. A. Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais. **Revista Produção**, v.23, n.2, p. 436-447, 2013.

YANG, K. H.; JUNG, Y. B.; CHO, M. S.; TAE, S. H. Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO<sub>2</sub> emissions from concrete. **Journal of Cleaner Production**, v.103, p.74-783, 2015.

YEO, D.; GABBAI, R. D. Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimization. **Energy and Buildings**, v.43, p.2028-2033, 2011.

YEO, D.; POTRA, F. A. Sustainable Design of Reinforced Concrete Structures through CO<sub>2</sub> Emission Optimization. **Journal of Structural Engineering**, v. 141(3), 2015.



YOON, Y.; KIM, K.; LEE, S.; YEO, D. Sustainable design for reinforced concrete columns through embodied energy and CO<sub>2</sub> emission optimization. **Energy and Buildings**, v. 174, p. 44-53, 2018.

YEPES, V.; GONZALEZ-VIDOSA, F. ALCALA, J.; VILALBA, P. CO<sub>2</sub>-Optimization Design of Reinforced Concrete Retaining Walls Based on a VNS-Threshold Acceptance Strategy. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 26(3), p. 378-386, 2012.

ZHANG, X.; WANG, F. Life-cycle assessment and control measures for carbon emissions of typical buildings in China. **Building and Environment**, v. 86, p. 89-97, 2015.

## APÊNDICES

### Apêndice A

Produção científica relacionada à tese

SANTORO, J. F., KRIPKA, M., Studies on Environmental Impact Assessment of Reinforced Concrete in Different Life Cycle Phases. **International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research**, v. 1, p. 32-40, 2017.

SANTORO, J. F., KRIPKA, M., Minimizing Environmental Impact from Optimized Sizing of Reinforced Concrete Elements. **Computers and Concrete**, v.25, p. 111-118, 2020.

SANTORO, J. F., KRIPKA, M., Evaluation of CO<sub>2</sub> emissions from reinforced concrete building structures in the cradle-to-gate phase. Submetido (**Engineering Structures**).

## Apêndice B

### Resultados dos dimensionamentos otimizados das vigas para o cenário 1 de estudo proposto

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 20 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	EMISSÃO INICIAL (KgCO <sub>2</sub> )	EMISSÃO FINAL (KgCO <sub>2</sub> )	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> )	EMISSÃO CONCRETO (KgCO <sub>2</sub> )	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	EMISSÃO AÇO (KgCO <sub>2</sub> )	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> )	EMISSÃO FORMA (KgCO <sub>2</sub> )
V20-300	3,00	0,30	0,20	37,02	30,86	16,62	0,12	17,11	9,14	0,92	10,05	10,51	1,82	3,25
V20-350	3,50	0,35	0,24	49,83	41,17	17,38	0,17	23,29	11,87	1,21	13,07	12,78	2,36	4,21
V20-400	4,00	0,40	0,27	64,57	53,04	17,86	0,22	30,47	14,99	1,54	16,53	17,28	2,97	5,30
V20-450	4,50	0,45	0,31	81,28	66,52	18,16	0,28	38,64	18,52	1,91	20,43	21,35	3,66	6,52
V20-500	5,00	0,50	0,34	99,94	81,61	18,35	0,34	47,83	22,47	2,32	24,79	25,91	4,42	7,87
V20-550	5,50	0,55	0,38	120,59	98,34	18,45	0,41	58,04	26,83	2,78	29,61	30,95	5,25	9,35
V20-600	6,00	0,60	0,41	143,23	116,75	18,49	0,49	69,30	31,63	3,28	34,91	36,50	6,15	10,96
V20-650	6,50	0,65	0,45	181,75	136,85	24,70	0,58	81,61	36,88	3,82	40,70	42,54	7,13	12,70
V20-700	7,00	0,70	0,48	210,64	158,68	24,67	0,68	94,98	42,58	4,41	46,99	49,12	8,18	14,58
V20-750	7,50	0,75	0,52	241,73	182,25	24,61	0,78	109,43	48,75	5,04	53,79	56,23	9,31	16,60
V20-800	8,00	0,80	0,56	275,04	207,59	24,52	0,89	124,96	55,40	5,72	61,11	63,87	10,52	18,75
V20-850	8,50	0,85	0,59	310,58	234,74	24,42	1,01	141,00	62,53	6,44	68,97	72,09	11,81	21,05
V20-900	9,00	0,90	0,63	348,37	282,38	18,94	1,14	159,35	88,03	7,21	95,24	99,54	13,18	23,49
V20-950	9,50	0,95	0,67	388,42	315,42	18,79	1,27	178,23	98,29	8,02	106,31	111,12	14,63	26,07
V20-1000	10,00	1,00	0,71	430,74	350,47	18,64	1,42	198,25	109,21	8,88	118,09	123,43	16,15	28,79
V20-1050	10,50	1,05	0,75	475,35	387,55	18,47	1,57	219,41	120,78	9,79	130,57	136,48	17,77	31,66
V20-1100	11,00	1,10	0,78	522,27	426,71	18,30	1,73	241,74	133,04	10,75	143,78	150,28	19,46	34,68
V20-1150	11,50	1,15	0,82	571,51	467,96	18,12	1,89	265,24	145,98	11,75	157,73	164,86	21,24	37,85
V20-1200	12,00	1,20	0,86	623,08	511,33	17,94	2,07	289,92	159,63	12,81	172,43	180,24	23,10	41,17

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 25 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	EMISSÃO INICIAL (KgCO <sub>2</sub> )	EMISSÃO FINAL (KgCO <sub>2</sub> )	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> )	EMISSÃO CONCRETO (KgCO <sub>2</sub> )	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	EMISSÃO AÇO (KgCO <sub>2</sub> )	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> )	EMISSÃO FORMA (KgCO <sub>2</sub> )
V25-300	3,00	0,30	0,20	38,82	31,48	18,91	0,12	17,63	9,17	1,04	10,21	10,67	1,78	3,17
V25-350	3,50	0,35	0,23	52,27	42,00	19,65	0,16	24,01	11,92	1,36	13,28	13,88	2,31	4,11
V25-400	4,00	0,40	0,26	67,76	54,12	20,13	0,21	31,39	15,06	1,73	16,80	17,55	2,90	5,17
V25-450	4,50	0,45	0,30	85,30	67,87	20,44	0,27	39,81	18,61	2,15	20,76	21,70	3,57	6,36
V25-500	5,00	0,50	0,33	104,91	83,26	20,63	0,33	49,27	22,57	2,62	25,19	26,33	4,30	7,66
V25-550	5,50	0,55	0,36	126,58	100,33	20,74	0,40	59,79	26,96	3,13	30,09	31,44	5,11	9,10
V25-600	6,00	0,60	0,40	150,36	119,10	20,79	0,48	71,37	31,77	3,69	35,47	37,07	5,98	10,66
V25-650	6,50	0,65	0,43	190,10	139,59	26,57	0,56	84,03	37,03	4,30	41,34	43,21	6,93	12,35
V25-700	7,00	0,70	0,47	220,31	161,83	26,54	0,66	97,79	42,75	4,96	47,71	49,87	7,95	14,17
V25-750	7,50	0,75	0,50	252,81	185,85	26,49	0,75	112,66	48,93	5,67	54,60	57,07	9,05	16,12
V25-800	8,00	0,80	0,54	287,63	211,66	26,41	0,86	128,64	55,58	6,43	62,01	64,81	10,22	18,21
V25-850	8,50	0,85	0,57	324,77	239,30	26,32	0,98	145,75	62,72	7,24	69,95	73,12	11,46	20,43
V25-900	9,00	0,90	0,61	364,24	286,82	21,25	1,10	164,01	87,60	8,10	95,70	100,03	12,79	22,79
V25-950	9,50	0,95	0,65	406,08	320,33	21,12	1,23	183,42	97,78	9,01	106,79	111,62	14,19	25,29
V25-1000	10,00	1,00	0,68	450,27	355,86	20,97	1,37	203,99	108,60	9,98	118,58	123,95	15,67	27,92
V25-1050	10,50	1,05	0,72	496,85	393,45	20,81	1,51	225,75	120,08	11,00	131,07	137,00	17,23	30,70
V25-1100	11,00	1,10	0,76	545,83	433,13	20,65	1,67	248,70	132,22	12,07	144,29	150,82	18,87	33,62
V25-1150	11,50	1,15	0,79	597,21	474,92	20,48	1,83	272,85	145,03	13,20	158,23	165,38	20,58	36,68
V25-1200	12,00	1,20	0,83	651,02	518,85	20,30	2,00	298,22	158,54	14,38	172,92	180,74	22,38	39,88

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 30 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	EMISSÃO INICIAL (KgCO <sub>2</sub> )	EMISSÃO FINAL (KgCO <sub>2</sub> )	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> )	EMISSÃO CONCRETO (KgCO <sub>2</sub> )	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	EMISSÃO AÇO (KgCO <sub>2</sub> )	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> )	EMISSÃO FORMA (KgCO <sub>2</sub> )
V30-300	3,00	0,30	0,19	40,48	32,09	20,73	0,11	18,10	9,26	1,14	10,41	10,87	1,75	3,12
V30-350	3,50	0,35	0,22	54,53	42,82	21,48	0,16	24,63	12,04	1,50	13,54	14,15	2,26	4,03
V30-400	4,00	0,40	0,26	70,71	55,18	21,96	0,20	32,22	15,21	1,91	17,12	17,90	2,84	5,07
V30-450	4,50	0,45	0,29	89,02	69,19	22,28	0,26	40,85	18,79	2,37	21,16	22,12	3,49	6,22
V30-500	5,00	0,50	0,32	109,49	84,88	22,48	0,32	50,56	22,78	2,89	25,67	26,83	4,21	7,50
V30-550	5,50	0,55	0,35	132,13	102,28	22,59	0,39	61,34	27,20	3,45	30,65	32,04	4,99	8,89
V30-600	6,00	0,60	0,39	156,94	121,40	22,65	0,46	73,22	32,06	4,07	36,12	37,76	5,85	10,42
V30-650	6,50	0,65	0,42	197,82	142,27	28,08	0,55	86,21	37,36	4,74	42,09	43,99	6,77	12,06
V30-700	7,00	0,70	0,45	229,25	164,92	28,06	0,64	100,32	43,11	5,46	48,57	50,77	7,77	13,84
V30-750	7,50	0,75	0,49	263,06	189,38	28,01	0,73	115,56	49,32	6,24	55,56	58,08	8,83	15,74
V30-800	8,00	0,80	0,52	299,27	215,66	27,94	0,84	131,95	56,01	7,07	63,09	65,94	9,97	17,77
V30-850	8,50	0,85	0,56	337,90	243,79	27,85	0,95	149,49	63,19	7,96	71,15	74,37	11,18	19,93
V30-900	9,00	0,90	0,59	378,95	273,80	27,75	1,07	168,21	70,86	8,91	79,77	83,38	12,47	22,22
V30-950	9,50	0,95	0,63	422,44	325,30	23,00	1,19	188,10	97,77	9,91	107,68	112,55	13,83	24,65
V30-1000	10,00	1,00	0,66	468,39	361,34	22,85	1,33	209,19	108,56	10,97	119,53	124,93	15,27	27,21
V30-1050	10,50	1,05	0,70	516,80	399,46	22,70	1,47	231,49	120,00	12,08	132,08	138,06	16,78	29,91
V30-1100	11,00	1,10	0,74	567,69	439,69	22,55	1,62	255,01	132,10	13,26	145,36	151,93	18,38	32,75
V30-1150	11,50	1,15	0,77	621,08	482,05	22,38	1,77	279,76	144,87	14,50	159,36	166,57	20,04	35,72
V30-1200	12,00	1,20	0,81	676,98	526,58	22,22	1,94	305,75	158,32	15,79	174,11	181,99	21,79	38,84

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 35 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	EMISSÃO INICIAL (KgCO <sub>2</sub> )	EMISSÃO FINAL (KgCO <sub>2</sub> )	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> )	EMISSÃO CONCRETO (KgCO <sub>2</sub> )	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	EMISSÃO AÇO (KgCO <sub>2</sub> )	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> )	EMISSÃO FORMA (KgCO <sub>2</sub> )
V35-300	3,00	0,30	0,19	43,17	33,38	22,68	0,11	19,22	9,38	1,24	10,62	11,10	1,72	3,06
V35-350	3,50	0,35	0,22	58,19	44,57	23,41	0,15	26,16	12,18	1,63	13,81	14,44	2,22	3,96
V35-400	4,00	0,40	0,25	75,48	57,45	23,89	0,20	34,22	15,39	2,08	17,46	18,25	2,79	4,98
V35-450	4,50	0,45	0,28	95,06	72,05	24,20	0,25	43,39	19,00	2,58	21,58	22,55	3,43	6,11
V35-500	5,00	0,50	0,31	116,94	88,41	24,40	0,31	53,70	23,04	3,13	26,17	27,35	4,12	7,35
V35-550	5,50	0,55	0,34	141,13	106,53	24,51	0,38	65,16	27,50	3,74	31,24	32,65	4,89	8,72
V35-600	6,00	0,60	0,38	167,65	126,46	24,57	0,45	77,78	32,40	4,41	36,81	38,47	5,73	10,21
V35-650	6,50	0,65	0,41	210,37	148,21	29,55	0,53	91,57	37,74	5,13	42,88	44,82	6,63	11,82
V35-700	7,00	0,70	0,44	243,80	171,80	29,53	0,62	106,55	43,55	5,92	49,46	51,70	7,60	13,55
V35-750	7,50	0,75	0,48	279,76	197,27	29,48	0,71	122,73	49,81	6,76	56,57	59,13	8,65	15,41
V35-800	8,00	0,80	0,51	318,26	224,64	29,42	0,82	140,13	56,55	7,66	64,21	67,12	9,76	17,39
V35-850	8,50	0,85	0,54	359,32	253,94	29,33	0,92	158,76	63,78	8,62	72,40	75,68	10,94	19,50
V35-900	9,00	0,90	0,58	402,95	285,19	29,23	1,04	178,63	71,51	9,64	81,15	84,82	12,20	21,74
V35-950	9,50	0,95	0,61	449,17	337,50	24,86	1,16	199,75	98,00	10,73	108,72	113,64	13,53	24,11
V35-1000	10,00	1,00	0,65											

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 40 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	EMISSÃO INICIAL (KgCO <sub>2</sub> )	EMISSÃO FINAL (KgCO <sub>2</sub> )	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> )	EMISSÃO CONCRETO (KgCO <sub>2</sub> )	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	EMISSÃO AÇO (KgCO <sub>2</sub> )	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> )	EMISSÃO FORMA (KgCO <sub>2</sub> )
V40-300	3,00	0,30	0,18	45,20	34,27	24,19	0,11	19,92	9,50	1,34	10,84	11,33	1,69	3,02
V40-350	3,50	0,35	0,21	60,94	45,76	24,92	0,15	27,13	12,34	1,75	14,09	14,72	2,19	3,90
V40-400	4,00	0,40	0,24	79,07	58,99	25,40	0,19	35,48	15,58	2,23	17,81	18,61	2,75	4,90
V40-450	4,50	0,45	0,27	99,60	73,99	25,71	0,25	44,99	19,23	2,76	22,00	22,99	3,37	6,01
V40-500	5,00	0,50	0,31	122,54	90,79	25,91	0,31	55,68	23,31	3,36	26,67	27,87	4,06	7,23
V40-550	5,50	0,55	0,34	147,90	109,40	26,03	0,37	67,56	27,82	4,01	31,83	33,27	4,81	8,57
V40-600	6,00	0,60	0,37	175,69	129,86	26,09	0,44	80,64	32,76	4,73	37,49	39,19	5,63	10,33
V40-650	6,50	0,65	0,40	219,81	152,19	30,76	0,52	94,95	38,16	5,50	43,66	45,64	6,51	11,61
V40-700	7,00	0,70	0,43	254,73	176,42	30,74	0,61	110,48	44,01	6,34	50,35	52,64	7,46	13,30
V40-750	7,50	0,75	0,47	292,30	202,56	30,70	0,70	127,26	50,34	7,24	57,58	60,18	8,48	15,12
V40-800	8,00	0,80	0,50	332,52	230,66	30,63	0,80	145,29	57,14	8,21	65,34	68,30	9,54	17,01
V40-850	8,50	0,85	0,53	375,41	260,73	30,55	0,90	164,60	64,42	9,23	73,66	76,99	10,73	19,13
V40-900	9,00	0,90	0,56	420,98	292,79	30,45	1,02	185,20	72,21	10,33	82,53	86,26	11,97	21,33
V40-950	9,50	0,95	0,60	469,24	326,88	30,34	1,14	207,09	80,50	11,49	91,99	96,15	13,27	23,65
V40-1000	10,00	1,00	0,63	520,21	383,77	26,23	1,26	230,29	109,16	12,71	121,87	127,39	14,65	26,10
V40-1050	10,50	1,05	0,67	573,91	424,20	26,09	1,40	254,82	120,61	14,00	134,61	140,71	16,09	28,68
V40-1100	11,00	1,10	0,70	630,33	466,85	25,94	1,54	280,69	132,72	15,36	148,08	154,78	17,61	31,38
V40-1150	11,50	1,15	0,74	689,51	511,75	25,78	1,69	307,91	145,49	16,79	162,28	169,62	19,21	34,23
V40-1200	12,00	1,20	0,77	751,45	558,93	25,62	1,85	336,50	158,93	18,29	177,22	185,23	20,87	37,20

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 45 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	EMISSÃO INICIAL (KgCO <sub>2</sub> )	EMISSÃO FINAL (KgCO <sub>2</sub> )	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> )	EMISSÃO CONCRETO (KgCO <sub>2</sub> )	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	EMISSÃO AÇO (KgCO <sub>2</sub> )	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> )	EMISSÃO FORMA (KgCO <sub>2</sub> )
V45-300	3,00	0,30	0,18	47,61	35,39	25,67	0,11	20,86	9,63	1,42	11,05	11,55	1,67	2,98
V45-350	3,50	0,35	0,21	64,22	47,27	26,41	0,15	28,41	12,50	1,87	14,36	15,01	2,16	3,85
V45-400	4,00	0,40	0,24	83,35	60,95	26,88	0,19	37,16	15,77	2,37	18,14	18,97	2,71	4,83
V45-450	4,50	0,45	0,27	105,01	76,46	27,19	0,24	47,12	19,47	2,94	22,41	23,42	3,32	5,92
V45-500	5,00	0,50	0,30	129,21	93,83	27,38	0,30	58,32	23,59	3,57	27,16	28,38	4,00	7,12
V45-550	5,50	0,55	0,33	155,96	113,07	27,50	0,36	70,76	28,14	4,27	32,41	33,87	4,74	8,44
V45-600	6,00	0,60	0,36	185,29	134,22	27,56	0,43	84,47	33,14	5,02	38,16	39,88	5,54	9,87
V45-650	6,50	0,65	0,39	231,06	157,31	31,92	0,51	99,45	38,58	5,85	44,43	46,44	6,41	11,42
V45-700	7,00	0,70	0,42	267,78	182,35	31,90	0,59	115,72	44,49	6,74	51,23	53,55	7,35	13,09
V45-750	7,50	0,75	0,46	307,27	209,37	31,86	0,68	133,29	50,87	7,69	58,57	61,21	8,34	14,87
V45-800	8,00	0,80	0,49	349,54	238,41	31,79	0,78	152,18	57,73	8,72	66,45	69,45	9,42	16,78
V45-850	8,50	0,85	0,52	394,62	269,48	31,71	0,89	172,40	65,08	9,81	74,89	78,27	10,55	18,81
V45-900	9,00	0,90	0,55	442,50	302,62	31,61	1,00	193,96	72,93	10,97	83,90	87,69	11,76	20,96
V45-950	9,50	0,95	0,59	493,22	337,84	31,50	1,11	216,89	81,29	12,20	93,48	97,71	13,04	23,24
V45-1000	10,00	1,00	0,62	546,77	395,51	27,66	1,24	241,19	109,61	13,50	123,11	128,68	14,39	25,64
V45-1050	10,50	1,05	0,65	603,17	437,15	27,52	1,37	266,88	121,09	14,87	135,96	142,11	15,81	28,17
V45-1100	11,00	1,10	0,69	662,44	481,08	27,38	1,51	293,96	133,22	16,31	149,53	156,29	17,30	30,83
V45-1150	11,50	1,15	0,72	724,58	527,32	27,22	1,66	322,46	146,02	17,82	163,83	171,25	18,86	33,61
V45-1200	12,00	1,20	0,75	789,62	575,91	27,07	1,81	352,39	159,48	19,41	178,89	186,98	20,50	36,53

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 50 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	EMISSÃO INICIAL (KgCO <sub>2</sub> )	EMISSÃO FINAL (KgCO <sub>2</sub> )	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> )	EMISSÃO CONCRETO (KgCO <sub>2</sub> )	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	EMISSÃO AÇO (KgCO <sub>2</sub> )	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> )	EMISSÃO FORMA (KgCO <sub>2</sub> )
V50-300	3,00	0,30	0,18	53,36	38,45	27,94	0,11	23,74	9,76	1,50	11,26	11,77	1,65	2,94
V50-350	3,50	0,35	0,20	72,04	51,42	28,63	0,14	32,33	12,65	1,97	14,63	15,29	2,13	3,80
V50-400	4,00	0,40	0,23	93,55	66,36	29,07	0,19	42,29	15,97	2,51	18,47	19,31	2,67	4,76
V50-450	4,50	0,45	0,26	117,91	83,31	29,35	0,24	53,63	19,70	3,11	22,81	23,84	3,28	5,84
V50-500	5,00	0,50	0,29	145,14	102,29	29,52	0,29	66,38	23,86	3,77	27,63	28,88	3,94	7,02
V50-550	5,50	0,55	0,32	175,23	123,32	29,62	0,36	80,54	28,46	4,50	32,97	34,46	4,67	8,32
V50-600	6,00	0,60	0,35	208,21	146,44	29,67	0,43	96,15	33,51	5,30	38,81	40,56	5,46	9,73
V50-650	6,50	0,65	0,39	257,96	171,67	33,45	0,50	113,20	39,01	6,17	45,18	47,22	6,31	11,25
V50-700	7,00	0,70	0,42	298,97	199,04	33,42	0,58	131,72	44,97	7,11	52,08	54,43	7,23	12,89
V50-750	7,50	0,75	0,45	343,06	228,58	33,37	0,67	151,72	51,41	8,12	59,53	62,22	8,22	14,65
V50-800	8,00	0,80	0,48	390,26	260,32	33,30	0,77	173,22	58,33	9,20	67,52	70,58	9,27	16,52
V50-850	8,50	0,85	0,51	440,58	294,28	33,21	0,87	196,23	65,74	10,35	76,09	79,52	10,39	18,52
V50-900	9,00	0,90	0,54	494,02	330,49	33,10	0,98	220,78	73,65	11,57	85,22	89,07	11,58	20,63
V50-950	9,50	0,95	0,58	550,61	368,98	32,99	1,09	246,87	82,08	12,86	94,94	99,24	12,83	22,87
V50-1000	10,00	1,00	0,61	610,35	429,73	29,59	1,22	274,53	110,12	14,23	124,35	129,98	14,16	25,23
V50-1050	10,50	1,05	0,64	673,26	474,99	29,45	1,35	303,76	121,63	15,68	137,30	143,52	15,55	27,72
V50-1100	11,00	1,10	0,67	739,35	522,73	29,30	1,48	334,59	133,79	17,20	150,98	157,81	17,02	30,33
V50-1150	11,50	1,15	0,71	808,64	572,97	29,14	1,63	367,02	146,61	18,79	165,40	172,89	18,56	33,07
V50-1200	12,00	1,20	0,74	881,13	625,76	28,98	1,78	401,08	160,11	20,46	180,57	188,75	20,17	35,94

## Apêndice C

## Resultados dos dimensionamentos otimizados das vigas para o cenário 2 de estudo proposto

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 20 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	EMISSÃO INICIAL (KgCO <sub>2</sub> )	EMISSÃO FINAL (KgCO <sub>2</sub> )	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> )	EMISSÃO CONCRETO (KgCO <sub>2</sub> )	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	EMISSÃO AÇO (KgCO <sub>2</sub> )	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> )	EMISSÃO FORMA (KgCO <sub>2</sub> )
V20-300	3,00	0,30	0,20	113,22	92,05	18,69	0,12	27,67	9,14	0,92	10,05	20,62	1,82	43,77
V20-350	3,50	0,35	0,24	150,61	121,26	19,49	0,17	37,67	11,87	1,21	13,07	26,80	2,36	56,79
V20-400	4,00	0,40	0,27	193,38	154,66	20,02	0,22	49,28	14,99	1,54	16,53	33,88	2,98	71,50
V20-450	4,50	0,45	0,31	241,55	192,31	20,39	0,28	62,50	18,52	1,91	20,43	41,88	3,66	87,93
V20-500	5,00	0,50	0,34	295,14	234,27	20,63	0,34	77,36	22,47	2,32	24,79	50,81	4,42	106,10
V20-550	5,50	0,55	0,38	354,20	280,61	20,78	0,41	93,88	26,83	2,78	29,61	60,71	5,24	126,03
V20-600	6,00	0,60	0,41	418,74	331,40	20,86	0,49	112,09	31,63	3,28	34,91	71,57	6,15	147,74
V20-650	6,50	0,65	0,45	515,98	386,69	25,06	0,58	131,99	36,88	3,82	40,70	83,44	7,13	171,26
V20-700	7,00	0,70	0,48	595,92	446,56	25,06	0,68	153,62	42,58	4,41	46,99	96,33	8,18	196,60
V20-750	7,50	0,75	0,52	681,75	511,06	25,04	0,78	176,99	48,75	5,04	53,79	110,27	9,31	223,80
V20-800	8,00	0,80	0,56	773,49	580,26	24,98	0,89	202,12	55,40	5,72	61,11	125,28	10,52	252,86
V20-850	8,50	0,85	0,59	871,19	654,23	24,90	1,01	229,03	62,53	6,44	68,97	141,39	11,81	283,81
V20-900	9,00	0,90	0,63	974,86	769,65	21,05	1,14	257,74	88,03	7,21	95,24	195,23	13,18	316,67
V20-950	9,50	0,95	0,67	1084,53	857,68	20,92	1,27	288,27	98,29	8,02	106,31	217,94	14,63	351,47
V20-1000	10,00	1,00	0,71	1200,25	950,94	20,77	1,42	320,65	109,21	8,88	118,09	242,08	16,16	388,21
V20-1050	10,50	1,05	0,75	1322,02	1049,48	20,62	1,57	354,88	120,78	9,79	130,57	267,67	17,77	426,93
V20-1100	11,00	1,10	0,78	1449,89	1153,38	20,45	1,73	390,99	133,04	10,75	143,78	294,75	19,46	467,64
V20-1150	11,50	1,15	0,82	1583,88	1262,71	20,28	1,89	429,00	145,98	11,75	157,73	323,35	21,24	510,36
V20-1200	12,00	1,20	0,86	1724,02	1377,53	20,10	2,07	468,92	159,63	12,81	172,43	353,48	23,10	555,12

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 25 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	EMISSÃO INICIAL (KgCO <sub>2</sub> )	EMISSÃO FINAL (KgCO <sub>2</sub> )	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> )	EMISSÃO CONCRETO (KgCO <sub>2</sub> )	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	EMISSÃO AÇO (KgCO <sub>2</sub> )	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> )	EMISSÃO FORMA (KgCO <sub>2</sub> )
V25-300	3,00	0,30	0,20	114,15	90,93	20,35	0,12	27,20	9,17	1,04	10,21	20,92	1,78	42,81
V25-350	3,50	0,35	0,23	151,88	119,71	21,18	0,16	37,02	11,92	1,36	13,28	27,22	2,31	55,47
V25-400	4,00	0,40	0,26	195,02	152,61	21,75	0,21	48,41	15,06	1,73	16,80	34,42	2,90	69,77
V25-450	4,50	0,45	0,30	243,61	189,68	22,14	0,27	61,39	18,61	2,15	20,76	42,56	3,57	85,72
V25-500	5,00	0,50	0,33	297,68	230,97	22,41	0,33	75,98	22,57	2,62	25,19	51,64	4,30	103,35
V25-550	5,50	0,55	0,36	357,25	276,56	22,58	0,40	92,20	26,96	3,13	30,09	61,68	5,11	122,69
V25-600	6,00	0,60	0,40	422,34	326,51	22,69	0,48	110,06	31,77	3,69	35,47	72,70	5,98	143,74
V25-650	6,50	0,65	0,43	520,19	380,86	26,78	0,56	129,60	37,03	4,30	41,34	84,74	6,93	166,53
V25-700	7,00	0,70	0,47	600,77	439,70	26,81	0,66	150,81	42,75	4,96	47,71	97,80	7,95	191,08
V25-750	7,50	0,75	0,50	687,28	503,07	26,80	0,75	173,73	48,93	5,67	54,60	111,92	9,05	217,42
V25-800	8,00	0,80	0,54	779,75	571,05	26,76	0,86	198,38	55,58	6,43	62,01	127,11	10,22	245,55
V25-850	8,50	0,85	0,57	878,20	643,68	26,70	0,98	224,77	62,72	7,24	69,95	143,41	11,47	275,51
V25-900	9,00	0,90	0,61	982,67	756,41	23,03	1,10	252,93	87,60	8,10	95,70	196,18	12,79	307,30
V25-950	9,50	0,95	0,65	1093,19	842,74	22,91	1,23	282,86	97,78	9,01	106,79	218,93	14,19	340,95
V25-1000	10,00	1,00	0,68	1209,77	934,17	22,78	1,37	314,60	108,60	9,98	118,58	243,10	15,67	376,49
V25-1050	10,50	1,05	0,72	1332,45	1030,77	22,64	1,51	348,15	120,08	11,00	131,07	268,70	17,23	413,92
V25-1100	11,00	1,10	0,76	1461,26	1132,60	22,49	1,67	383,54	132,22	12,07	144,29	295,78	18,86	453,27
V25-1150	11,50	1,15	0,79	1596,22	1239,72	22,33	1,83	420,79	145,03	13,20	158,23	324,37	20,58	494,56
V25-1200	12,00	1,20	0,83	1737,36	1352,19	22,17	2,00	459,91	158,54	14,38	172,92	354,48	22,38	537,80

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 30 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	EMISSÃO INICIAL (KgCO <sub>2</sub> )	EMISSÃO FINAL (KgCO <sub>2</sub> )	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> )	EMISSÃO CONCRETO (KgCO <sub>2</sub> )	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	EMISSÃO AÇO (KgCO <sub>2</sub> )	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> )	EMISSÃO FORMA (KgCO <sub>2</sub> )
V30-300	3,00	0,30	0,19	129,35	99,25	23,26	0,11	35,92	9,26	1,14	10,41	21,33	1,75	42,00
V30-350	3,50	0,35	0,22	172,54	131,02	24,06	0,16	48,90	12,04	1,50	13,54	27,75	2,26	54,37
V30-400	4,00	0,40	0,26	222,00	167,37	24,61	0,20	63,94	15,21	1,91	17,12	35,10	2,84	68,33
V30-450	4,50	0,45	0,29	277,75	208,36	24,98	0,26	81,08	18,79	2,37	21,16	43,38	3,49	83,90
V30-500	5,00	0,50	0,32	339,81	254,06	25,23	0,32	100,34	22,78	2,89	25,67	52,61	4,21	101,09
V30-550	5,50	0,55	0,35	408,20	304,53	25,40	0,39	121,75	27,20	3,45	30,65	62,84	4,99	119,94
V30-600	6,00	0,60	0,39	482,97	359,84	25,49	0,46	145,34	32,06	4,07	36,12	74,06	5,84	140,45
V30-650	6,50	0,65	0,42	591,32	420,06	28,96	0,55	171,12	37,36	4,74	42,09	86,29	6,77	162,65
V30-700	7,00	0,70	0,45	683,24	485,24	28,98	0,64	199,12	43,11	5,46	48,57	99,56	7,76	186,56
V30-750	7,50	0,75	0,49	781,93	555,47	28,96	0,73	229,37	49,32	6,24	55,56	113,90	8,83	212,20
V30-800	8,00	0,80	0,52	887,41	630,80	28,92	0,84	261,89	56,01	7,07	63,09	129,33	9,97	239,58
V30-850	8,50	0,85	0,56	999,71	711,29	28,85	0,95	296,71	63,19	7,96	71,15	145,86	11,18	268,72
V30-900	9,00	0,90	0,59	1118,86	797,03	28,76	1,07	333,86	70,86	8,91	79,77	163,52	12,47	299,65
V30-950	9,50	0,95	0,63	1244,89	926,47	25,58	1,19	373,35	97,77	9,91	107,68	220,73	13,83	332,38
V30-1000	10,00	1,00	0,66	1377,82	1027,17	25,45	1,33	415,21	108,56	10,97	119,53	245,03	15,27	366,93
V30-1050	10,50	1,05	0,70	1517,68	1133,56	25,31	1,47	459,47	120,00	12,08	132,08	270,77	16,78	403,32
V30-1100	11,00	1,10	0,74	1664,50	1245,70	25,16	1,62	506,15	132,10	13,26	145,36	297,98	18,38	441,57
V30-1150	11,50	1,15	0,77	1818,30	1363,66	25,00	1,77	555,27	144,87	14,50	159,36	326,69	20,05	481,70
V30-1200	12,00	1,20	0,81	1979,11	1487,50	24,84	1,94	606,86	158,32	15,79	174,11	356,92	21,79	523,72

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 35 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	EMISSÃO INICIAL (KgCO <sub>2</sub> )	EMISSÃO FINAL (KgCO <sub>2</sub> )	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> )	EMISSÃO CONCRETO (KgCO <sub>2</sub> )	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	EMISSÃO AÇO (KgCO <sub>2</sub> )	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> )	EMISSÃO FORMA (KgCO <sub>2</sub> )
V35-300	3,00	0,30	0,19	131,61	99,32	24,54	0,11	36,24	9,38	1,24	10,62	21,77	1,72	41,31
V35-350	3,50	0,35	0,22	175,62	131,08	25,36	0,15	49,33	12,18	1,63	13,81	28,32	2,22	53,43
V35-400	4,00	0,40	0,25	226,01	167,42	25,92	0,20	64,52	15,39	2,08	17,46	35,80	2,79	67,10
V35-450	4,50	0,45	0,28	282,81	208,39	26,31	0,25	81,81	19,00	2,58	21,58	44,24	3,43	82,34
V35-500	5,00	0,50	0,31	346,05	254,06	26,58	0,31	101,25	23,04	3,13	26,17	53,65	4,13	99,17
V35-550	5,50	0,55	0,34	415,74	304,50	26,76	0,38	122,85	27,50	3,74	31,24	64,05	4,89	117,60
V35-600	6,00	0,60	0,38	491,92	359,76	26,87	0,45	146,64	32,40	4,41	36,81	75,46	5,73	137,66
V35-650	6,50	0,65	0,41	601,81	419,91	30,23	0,53	172,65	37,74	5,13	42,88	87,90	6,63	159,36
V35-700	7,00	0,70	0,44	695,39	485,02	30,25	0,62	200,90	43,55	5,92	49,46	101,40	7,60	182,73
V35-750	7,50	0,75	0,48	795,85	555,15	30,24	0,71	231,41	49,81	6,76	56,57	115,96	8,65	207,77
V35-800	8,00	0,80	0,51	903,23	630,37	30,21	0,82	264,21	56,55	7,66	64,21	131,64	9,76	234,52
V35-850	8,50	0,85	0,54	1017,55	710,74	30,15	0,92	299,33	63,78	8,62	72,40	148,42	10,94	262,98
V35-900	9,00	0,90	0,58	1138,83	796,33	30,07	1,04	336,79	71,51	9,64	81,15	166,36	12,20	293,19
V35-950	9,50	0,95	0,61											

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 50 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	EMISSÃO INICIAL (KgCO <sub>2</sub> )	EMISSÃO FINAL (KgCO <sub>2</sub> )	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> )	EMISSÃO CONCRETO (KgCO <sub>2</sub> )	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	EMISSÃO AÇO (KgCO <sub>2</sub> )	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> )	EMISSÃO FORMA (KgCO <sub>2</sub> )
V50-300	3,00	0,30	0,18	137,90	99,95	27,52	0,11	37,19	9,76	1,50	11,26	23,08	1,65	39,68
V50-350	3,50	0,35	0,20	184,14	131,86	28,39	0,14	50,65	12,65	1,97	14,63	29,98	2,13	51,23
V50-400	4,00	0,40	0,23	237,11	168,35	29,00	0,19	66,25	15,97	2,51	18,47	37,87	2,67	64,23
V50-450	4,50	0,45	0,26	296,83	209,49	29,43	0,24	84,02	19,70	3,11	22,81	46,76	3,28	78,71
V50-500	5,00	0,50	0,29	363,31	255,32	29,72	0,29	103,99	23,86	3,77	27,63	56,65	3,94	94,68
V50-550	5,50	0,55	0,32	436,60	305,93	29,93	0,36	126,19	28,46	4,50	32,97	67,58	4,67	112,16
V50-600	6,00	0,60	0,35	516,71	361,36	30,07	0,43	150,63	33,51	5,30	38,81	79,56	5,46	131,17
V50-650	6,50	0,65	0,39	630,86	421,68	33,16	0,50	177,34	39,01	6,17	45,18	92,61	6,31	151,72
V50-700	7,00	0,70	0,42	729,03	486,95	33,21	0,58	206,36	44,97	7,11	52,08	106,77	7,23	173,83
V50-750	7,50	0,75	0,45	834,43	557,24	33,22	0,67	237,69	51,41	8,12	59,53	122,02	8,22	197,52
V50-800	8,00	0,80	0,48	947,08	632,61	33,20	0,77	271,38	58,33	9,20	67,52	138,42	9,27	222,81
V50-850	8,50	0,85	0,51	1066,99	713,12	33,17	0,87	307,43	65,74	10,35	76,09	155,97	10,39	249,71
V50-900	9,00	0,90	0,54	1194,21	798,83	33,11	0,98	345,89	73,65	11,57	85,22	174,71	11,58	278,23
V50-950	9,50	0,95	0,58	1328,75	889,81	33,03	1,09	386,77	82,08	12,86	94,94	194,63	12,83	308,41
V50-1000	10,00	1,00	0,61	1470,64	1025,25	30,29	1,22	430,10	110,12	14,23	124,35	254,92	14,16	340,25
V50-1050	10,50	1,05	0,64	1619,91	1131,12	30,17	1,35	475,89	121,63	15,68	137,30	281,47	15,55	373,76
V50-1100	11,00	1,10	0,67	1776,59	1242,68	30,05	1,48	524,19	133,79	17,20	150,98	309,52	17,02	408,97
V50-1150	11,50	1,15	0,71	1940,69	1359,97	29,92	1,63	575,00	146,61	18,79	165,40	339,08	18,56	445,90
V50-1200	12,00	1,20	0,74	2112,24	1483,08	29,79	1,78	628,36	160,11	20,46	180,57	370,17	20,16	484,55

## Apêndice D

### Resultados dos dimensionamentos otimizados das vigas para o cenário 3 de estudo proposto

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 20 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	EMISSÃO INICIAL (KgCO <sub>2</sub> )	EMISSÃO FINAL (KgCO <sub>2</sub> )	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> )	EMISSÃO CONCRETO (KgCO <sub>2</sub> )	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	EMISSÃO AÇO (KgCO <sub>2</sub> )	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> )	EMISSÃO FORMA (KgCO <sub>2</sub> )
V20-300	3,00	0,30	0,20	102,39	82,90	19,04	0,12	37,57	9,14	0,92	10,05	21,11	1,82	24,21
V20-350	3,50	0,35	0,24	137,11	110,02	19,76	0,17	51,16	11,87	1,21	13,07	27,45	2,36	31,42
V20-400	4,00	0,40	0,27	176,96	141,16	20,23	0,22	66,91	14,99	1,54	16,53	34,71	2,98	39,54
V20-450	4,50	0,45	0,31	221,97	176,40	20,53	0,28	84,86	18,52	1,91	20,43	42,91	3,66	48,63
V20-500	5,00	0,50	0,34	272,16	215,78	20,72	0,34	105,05	22,47	2,32	24,79	52,06	4,42	58,68
V20-550	5,50	0,55	0,38	327,56	259,37	20,82	0,41	127,48	26,83	2,78	29,61	62,19	5,24	69,70
V20-600	6,00	0,60	0,41	388,20	307,23	20,86	0,49	152,20	31,63	3,28	34,91	73,31	6,15	81,71
V20-650	6,50	0,65	0,45	481,97	359,42	25,43	0,58	179,23	36,88	3,82	40,70	85,47	7,13	94,72
V20-700	7,00	0,70	0,48	557,64	416,01	25,40	0,68	208,60	42,58	4,41	46,99	98,68	8,18	108,73
V20-750	7,50	0,75	0,52	638,95	477,06	25,34	0,78	240,33	48,75	5,04	53,79	112,96	9,31	123,77
V20-800	8,00	0,80	0,56	725,96	542,64	25,25	0,89	274,45	55,40	5,72	61,11	128,33	10,52	139,85
V20-850	8,50	0,85	0,59	818,68	612,80	25,15	1,01	310,99	62,53	6,44	68,97	144,84	11,81	156,96
V20-900	9,00	0,90	0,63	917,15	725,12	20,94	1,14	349,98	88,03	7,21	95,24	199,99	13,18	175,14
V20-950	9,50	0,95	0,67	1021,39	809,08	20,79	1,27	391,44	98,29	8,02	106,31	223,26	14,63	194,38
V20-1000	10,00	1,00	0,71	1131,44	898,09	20,62	1,42	435,40	109,21	8,88	118,09	247,98	16,16	214,70
V20-1050	10,50	1,05	0,75	1247,32	992,21	20,45	1,57	481,89	120,78	9,79	130,57	274,20	17,77	236,12
V20-1100	11,00	1,10	0,78	1369,06	1091,50	20,27	1,73	530,92	133,04	10,75	143,78	301,95	19,46	258,63
V20-1150	11,50	1,15	0,82	1496,70	1196,03	20,09	1,89	582,53	145,98	11,75	157,73	331,24	21,24	282,26
V20-1200	12,00	1,20	0,86	1630,27	1305,87	19,90	2,07	636,75	159,63	12,81	172,43	362,11	23,10	307,02

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 25 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	EMISSÃO INICIAL (KgCO <sub>2</sub> )	EMISSÃO FINAL (KgCO <sub>2</sub> )	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> )	EMISSÃO CONCRETO (KgCO <sub>2</sub> )	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	EMISSÃO AÇO (KgCO <sub>2</sub> )	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> )	EMISSÃO FORMA (KgCO <sub>2</sub> )
V25-300	3,00	0,30	0,20	106,55	83,99	21,17	0,12	38,89	9,17	1,04	10,21	21,43	1,78	23,68
V25-350	3,50	0,35	0,23	142,77	111,50	21,90	0,16	52,93	11,92	1,36	13,28	27,89	2,31	30,68
V25-400	4,00	0,40	0,26	184,34	143,08	22,38	0,21	69,22	15,06	1,73	16,80	35,27	2,90	38,58
V25-450	4,50	0,45	0,30	231,29	178,79	22,70	0,27	87,78	18,61	2,15	20,76	43,60	3,57	47,41
V25-500	5,00	0,50	0,33	283,65	218,70	22,90	0,33	108,64	22,57	2,62	25,19	52,90	4,30	57,16
V25-550	5,50	0,55	0,36	341,44	262,86	23,01	0,37	131,01	26,96	3,13	30,09	63,18	5,11	67,85
V25-600	6,00	0,60	0,40	404,70	311,35	23,07	0,48	157,37	31,77	3,69	35,47	74,47	5,98	79,50
V25-650	6,50	0,65	0,43	501,31	364,21	27,35	0,56	185,30	37,03	4,30	41,34	86,80	6,93	92,10
V25-700	7,00	0,70	0,47	580,03	421,51	27,33	0,66	215,64	42,75	4,96	47,71	100,19	7,95	105,68
V25-750	7,50	0,75	0,50	664,62	483,31	27,28	0,75	248,41	48,93	5,67	54,60	114,65	9,05	120,24
V25-800	8,00	0,80	0,54	755,13	549,67	27,21	0,86	283,65	55,58	6,43	62,01	130,21	10,22	135,80
V25-850	8,50	0,85	0,57	851,56	620,66	27,11	0,98	321,39	62,72	7,24	69,95	146,90	11,47	152,37
V25-900	9,00	0,90	0,61	953,96	732,57	23,21	1,10	361,64	87,60	8,10	95,70	200,97	12,79	169,95
V25-950	9,50	0,95	0,65	1062,35	817,28	23,07	1,23	404,44	97,78	9,01	106,79	224,27	14,19	188,57
V25-1000	10,00	1,00	0,68	1176,75	907,06	22,92	1,37	449,82	108,60	9,98	118,58	249,02	15,67	208,22
V25-1050	10,50	1,05	0,72	1297,21	1001,98	22,76	1,51	497,80	120,08	11,00	131,07	275,25	17,22	228,92
V25-1100	11,00	1,10	0,76	1423,74	1102,09	22,59	1,67	548,40	132,22	12,07	144,29	303,00	18,86	250,68
V25-1150	11,50	1,15	0,79	1556,37	1207,46	22,42	1,83	601,66	145,03	13,20	158,23	332,28	20,58	273,52
V25-1200	12,00	1,20	0,83	1695,14	1318,16	22,24	2,00	657,60	158,54	14,38	172,92	363,13	22,38	297,44

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 30 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	EMISSÃO INICIAL (KgCO <sub>2</sub> )	EMISSÃO FINAL (KgCO <sub>2</sub> )	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> )	EMISSÃO CONCRETO (KgCO <sub>2</sub> )	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	EMISSÃO AÇO (KgCO <sub>2</sub> )	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> )	EMISSÃO FORMA (KgCO <sub>2</sub> )
V30-300	3,00	0,30	0,19	110,40	85,12	22,90	0,11	40,04	9,26	1,14	10,41	21,85	1,75	23,23
V30-350	3,50	0,35	0,22	147,99	113,00	23,64	0,16	54,50	12,04	1,50	13,54	28,44	2,26	30,07
V30-400	4,00	0,40	0,26	191,15	145,01	24,13	0,20	71,27	15,21	1,91	17,12	35,96	2,84	37,79
V30-450	4,50	0,45	0,29	239,89	181,21	24,46	0,26	90,37	18,79	2,37	21,16	44,43	3,49	46,40
V30-500	5,00	0,50	0,32	294,25	221,66	24,67	0,32	111,84	22,78	2,89	25,67	53,90	4,21	55,91
V30-550	5,50	0,55	0,35	354,26	266,41	24,80	0,39	135,71	27,20	3,45	30,65	64,37	4,99	66,33
V30-600	6,00	0,60	0,39	419,93	315,53	24,86	0,46	161,99	32,06	4,07	36,12	75,86	5,84	77,68
V30-650	6,50	0,65	0,42	519,17	369,07	28,91	0,55	190,73	37,36	4,74	42,09	88,40	6,77	89,96
V30-700	7,00	0,70	0,45	600,72	427,11	28,90	0,64	221,94	43,11	5,46	48,57	102,00	7,76	103,18
V30-750	7,50	0,75	0,49	688,35	489,69	28,86	0,73	255,66	49,32	6,24	55,56	116,68	8,83	117,36
V30-800	8,00	0,80	0,52	782,09	556,89	28,79	0,84	291,91	56,01	7,07	63,09	132,48	9,97	132,50
V30-850	8,50	0,85	0,56	881,97	628,75	28,71	0,98	328,71	63,19	7,96	71,15	149,42	11,18	148,62
V30-900	9,00	0,90	0,59	988,01	705,35	28,61	1,07	372,12	70,86	8,91	79,77	167,51	12,47	165,72
V30-950	9,50	0,95	0,63	1100,25	826,08	24,92	1,19	416,14	97,77	9,91	107,68	226,12	13,83	183,83
V30-1000	10,00	1,00	0,66	1218,71	916,74	24,78	1,33	462,80	108,56	10,97	119,53	251,01	15,27	202,94
V30-1050	10,50	1,05	0,70	1343,42	1012,56	24,63	1,47	512,13	120,00	12,08	132,08	277,38	16,78	223,06
V30-1100	11,00	1,10	0,74	1474,40	1113,62	24,47	1,62	564,15	132,10	13,26	145,36	305,25	18,38	244,22
V30-1150	11,50	1,15	0,77	1611,69	1219,97	24,30	1,77	618,90	144,87	14,50	159,36	334,66	20,05	266,41
V30-1200	12,00	1,20	0,81	1755,31	1331,68	24,13	1,94	676,40	158,32	15,79	174,11	365,63	21,79	289,65

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 35 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	EMISSÃO INICIAL (KgCO <sub>2</sub> )	EMISSÃO FINAL (KgCO <sub>2</sub> )	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> )	EMISSÃO CONCRETO (KgCO <sub>2</sub> )	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	EMISSÃO AÇO (KgCO <sub>2</sub> )	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> )	EMISSÃO FORMA (KgCO <sub>2</sub> )
V35-300	3,00	0,30	0,19	116,64	87,87	24,67	0,11	42,72	9,38	1,24	10,62	22,30	0,39	5,14
V35-350	3,50	0,35	0,22	156,48	116,72	25,41	0,15	58,16	12,18	1,63	13,81	29,01	2,22	29,55
V35-400	4,00	0,40	0,25	202,23	149,84	25,90	0,20	76,05	15,39	2,08	17,46	36,67	2,79	37,11
V35-450	4,50	0,45	0,28	253,90	187,30	26,23	0,25	96,44	19,00	2,58	21,58	45,32	3,43	45,54
V35-500	5,00	0,50	0,31	311,53	229,16	26,44	0,31	119,36	23,04	3,13	26,17	54,95	4,13	54,85
V35-550	5,50	0,55	0,34	375,15	275,47	26,57	0,38	144,82	27,50	3,74	31,24	65,61	4,89	65,04
V35-600	6,00	0,60	0,38	444,79	326,30	26,64	0,45	172,87	32,40	4,41	36,81	77,30	5,73	76,13
V35-650	6,50	0,65	0,41	548,32	381,70	30,39	0,53	203,59	37,74	5,13	42,88	90,04	6,63	88,14
V35-700	7,00	0,70	0,44	634,51	441,75	30,38	0,62	236,82	43,55	5,92	49,46	103,87	7,60	101,06
V35-750	7,50	0,75	0,48	727,12	506,50	30,34	0,71	272,79	49,81	6,76	56,57	118,80	8,65	114,91
V35-800	8,00	0,80	0,51	826,18	576,02	30,28	0,82	311,46	56,55	7,66	64,21	134,85	9,76	129,70
V35-850	8,50	0,85	0,54	931,72	650,36	30,20	0,92	352,86	63,78	8,62	72,40	152,04	10,94	145,45
V35-900	9,00	0,90	0,58	1043,76	729,58	30,10	1,04	397,02	71,51	9,64	81,15	170,41	12,20	162,15
V35-950	9,50	0,95	0,											

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 50 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	EMISSÃO INICIAL (KgCO <sub>2</sub> )	EMISSÃO FINAL (KgCO <sub>2</sub> )	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> )	EMISSÃO CONCRETO (KgCO <sub>2</sub> )	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	EMISSÃO AÇO (KgCO <sub>2</sub> )	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> )	EMISSÃO FORMA (KgCO <sub>2</sub> )
V50-300	3,00	0,30	0,18	140,41	99,06	29,45	0,11	53,47	9,76	1,50	11,26	23,65	1,65	21,95
V50-350	3,50	0,35	0,20	188,80	131,87	30,15	0,14	72,83	12,65	1,97	14,63	30,71	2,13	28,33
V50-400	4,00	0,40	0,23	244,40	169,58	30,61	0,19	95,26	15,97	2,51	18,47	38,79	2,67	35,52
V50-450	4,50	0,45	0,26	307,25	212,25	30,92	0,24	120,82	19,70	3,11	22,81	47,89	3,28	43,53
V50-500	5,00	0,50	0,29	377,36	259,93	31,12	0,29	149,54	23,86	3,77	27,63	58,03	3,94	52,36
V50-550	5,50	0,55	0,32	454,77	312,71	31,24	0,36	181,45	28,46	4,50	32,97	69,23	4,67	62,03
V50-600	6,00	0,60	0,35	539,49	370,64	31,30	0,43	216,60	33,51	5,30	38,81	81,50	5,46	72,54
V50-650	6,50	0,65	0,39	659,42	433,79	34,22	0,50	255,01	39,01	6,17	45,18	94,87	6,31	83,91
V50-700	7,00	0,70	0,42	763,32	502,23	34,20	0,58	296,73	44,97	7,11	52,08	109,37	7,23	96,14
V50-750	7,50	0,75	0,45	874,94	576,03	34,16	0,67	341,79	51,41	8,12	59,53	125,00	8,22	109,24
V50-800	8,00	0,80	0,48	994,32	655,25	34,10	0,77	390,22	58,33	9,20	67,52	141,80	9,27	123,23
V50-850	8,50	0,85	0,51	1121,48	739,96	34,02	0,87	442,07	65,74	10,35	76,09	159,78	10,39	138,10
V50-900	9,00	0,90	0,54	1256,45	830,22	33,92	0,98	497,37	73,65	11,57	85,22	178,96	11,58	153,88
V50-950	9,50	0,95	0,58	1399,25	926,10	33,81	1,09	556,15	82,08	12,86	94,94	199,37	12,83	170,57
V50-1000	10,00	1,00	0,61	1549,91	1067,76	31,11	1,22	618,45	110,12	14,23	124,35	261,13	14,16	188,18
V50-1050	10,50	1,05	0,64	1708,45	1179,35	30,97	0,06	30,97	121,63	15,68	137,30	288,33	15,55	206,71
V50-1100	11,00	1,10	0,67	1874,91	1297,00	30,82	1,48	753,75	133,79	17,20	150,98	317,07	17,02	226,19
V50-1150	11,50	1,15	0,71	2049,31	1420,77	30,67	1,63	826,82	146,61	18,79	165,40	347,35	18,56	246,61
V50-1200	12,00	1,20	0,74	2231,68	1550,73	30,51	1,78	903,54	160,11	20,46	180,57	379,21	20,16	267,98



## Apêndice E

### Resultados dos dimensionamentos otimizados das vigas para o cenário 4 de estudo proposto

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 20 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	CUSTO INICIAL (R\$)	CUSTO FINAL (R\$)	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m³)	CUSTO CONCRETO (R\$)	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	CUSTO AÇO (R\$)	ÁREA FORMA (m²)	CUSTO FORMA (R\$)
V20-300	3,00	0,30	0,20	154,66	130,12	15,87	0,12	40,31	9,14	0,92	10,05	38,71	1,82	51,10
V20-350	3,50	0,35	0,24	205,94	171,51	16,72	0,17	54,88	11,87	1,21	13,07	50,33	2,36	66,29
V20-400	4,00	0,40	0,27	264,66	218,89	17,92	0,22	71,79	14,99	1,54	16,53	63,64	2,98	83,46
V20-450	4,50	0,45	0,31	330,87	272,36	17,69	0,28	91,05	18,52	1,91	20,43	78,67	3,66	102,64
V20-500	5,00	0,50	0,34	404,62	332,00	17,95	0,34	112,70	22,47	2,32	24,79	95,46	4,41	123,84
V20-550	5,50	0,55	0,38	485,97	397,91	18,12	0,41	136,77	26,83	2,78	29,61	114,03	5,24	147,11
V20-600	6,00	0,60	0,41	574,96	470,19	18,22	0,49	163,29	31,63	3,28	34,91	134,45	6,15	172,46
V20-650	6,50	0,65	0,45	722,33	548,94	24,00	0,58	192,29	36,88	3,82	40,70	156,75	7,13	199,91
V20-700	7,00	0,70	0,48	834,86	634,25	24,03	0,68	223,79	42,58	4,41	46,99	180,96	8,18	229,50
V20-750	7,50	0,75	0,52	955,80	726,22	24,02	0,78	257,84	48,75	5,04	53,79	207,14	9,31	261,24
V20-800	8,00	0,80	0,56	1085,19	824,95	23,98	0,89	294,45	55,40	5,72	61,11	235,34	10,52	295,16
V20-850	8,50	0,85	0,59	1223,09	930,53	23,92	1,01	333,65	62,53	6,44	68,97	265,59	11,81	331,29
V20-900	9,00	0,90	0,63	1369,56	1111,31	18,86	1,14	375,48	88,03	7,21	95,24	366,18	13,18	369,65
V20-950	9,50	0,95	0,67	1524,64	1238,99	18,74	1,27	419,96	98,29	8,02	106,31	408,76	14,63	410,26
V20-1000	10,00	1,00	0,71	1688,39	1374,30	18,60	1,42	467,12	109,21	8,88	118,09	454,03	16,16	453,16
V20-1050	10,50	1,05	0,75	1860,86	1517,36	18,46	1,57	516,99	120,78	9,79	130,57	502,02	17,77	498,35
V20-1100	11,00	1,10	0,78	2024,11	1668,27	18,31	1,73	569,60	133,04	10,75	143,78	552,80	19,46	545,87
V20-1150	11,50	1,15	0,82	2232,20	1827,13	18,15	1,89	624,98	145,98	11,75	157,73	606,41	21,24	595,74
V20-1200	12,00	1,20	0,86	2431,18	1994,05	17,98	2,07	683,14	159,63	12,81	172,43	662,92	23,10	647,99

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 25 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	CUSTO INICIAL (R\$)	CUSTO FINAL (R\$)	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m³)	CUSTO CONCRETO (R\$)	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	CUSTO AÇO (R\$)	ÁREA FORMA (m²)	CUSTO FORMA (R\$)
V25-300	3,00	0,30	0,20	158,84	130,65	17,75	0,12	41,35	9,17	1,04	10,21	39,32	1,78	49,97
V25-350	3,50	0,35	0,23	211,62	172,22	18,62	0,16	56,29	11,92	1,36	13,28	51,18	2,31	64,75
V25-400	4,00	0,40	0,26	272,05	219,78	19,22	0,21	73,61	15,06	1,73	16,80	64,73	2,90	81,44
V25-450	4,50	0,45	0,30	340,20	273,43	19,63	0,27	93,35	18,61	2,15	20,76	80,01	3,57	100,06
V25-500	5,00	0,50	0,33	416,11	333,26	19,91	0,33	115,54	22,57	2,62	25,19	97,09	4,30	120,64
V25-550	5,50	0,55	0,36	499,83	399,37	20,10	0,40	140,19	26,96	3,13	30,09	115,97	5,11	143,21
V25-600	6,00	0,60	0,40	591,41	471,84	20,22	0,48	167,36	31,77	3,69	35,47	136,69	5,98	167,79
V25-650	6,50	0,65	0,43	741,59	550,77	25,73	0,56	197,06	37,03	4,30	41,34	159,32	6,93	194,39
V25-700	7,00	0,70	0,47	857,14	636,25	25,77	0,66	229,32	42,75	4,96	47,71	183,88	7,95	223,05
V25-750	7,50	0,75	0,50	981,31	728,39	25,77	0,75	264,17	48,93	5,67	54,60	210,42	9,05	253,79
V25-800	8,00	0,80	0,54	1114,14	827,27	25,75	0,86	301,65	55,58	6,43	62,01	238,99	10,22	286,63
V25-850	8,50	0,85	0,57	1255,68	932,98	25,70	0,98	341,78	62,72	7,24	69,95	269,61	11,47	321,60
V25-900	9,00	0,90	0,61	1406,00	1111,54	20,94	1,10	384,59	87,60	8,10	95,70	368,24	12,79	358,71
V25-950	9,50	0,95	0,65	1565,13	1239,02	20,84	1,23	430,10	97,78	9,01	106,79	410,92	14,19	397,99
V25-1000	10,00	1,00	0,68	1733,14	1374,10	20,72	1,37	478,36	108,60	9,98	118,58	456,27	15,67	439,47
V25-1050	10,50	1,05	0,72	1910,07	1516,88	20,59	1,51	529,38	120,08	11,00	131,07	504,33	17,22	483,16
V25-1100	11,00	1,10	0,76	2095,98	1667,45	20,45	1,67	583,19	132,22	12,07	144,29	555,16	18,86	529,10
V25-1150	11,50	1,15	0,79	2290,91	1825,91	20,30	1,83	639,83	145,03	13,20	158,23	608,79	20,58	577,29
V25-1200	12,00	1,20	0,83	2494,92	1992,38	20,14	2,00	699,31	158,54	14,38	172,92	665,29	22,38	627,77

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 30 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	CUSTO INICIAL (R\$)	CUSTO FINAL (R\$)	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m³)	CUSTO CONCRETO (R\$)	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	CUSTO AÇO (R\$)	ÁREA FORMA (m²)	CUSTO FORMA (R\$)
V30-300	3,00	0,30	0,19	161,27	130,48	19,09	0,11	41,33	9,26	1,14	10,41	40,12	1,75	49,03
V30-350	3,50	0,35	0,22	214,89	171,94	19,99	0,16	56,26	12,04	1,50	13,54	52,22	2,26	63,47
V30-400	4,00	0,40	0,26	276,31	219,36	20,61	0,20	73,57	15,21	1,91	17,12	66,04	2,84	79,76
V30-450	4,50	0,45	0,29	345,56	272,84	21,05	0,26	93,29	18,79	2,37	21,16	81,62	3,49	97,93
V30-500	5,00	0,50	0,32	422,70	332,46	21,35	0,32	115,45	22,78	2,89	25,67	99,00	4,21	118,00
V30-550	5,50	0,55	0,35	507,77	398,31	21,56	0,39	140,08	27,20	3,45	30,65	118,22	4,99	140,00
V30-600	6,00	0,60	0,39	600,83	470,49	21,69	0,46	167,21	32,06	4,07	36,12	139,33	5,84	163,95
V30-650	6,50	0,65	0,42	752,60	549,09	27,04	0,55	196,87	37,36	4,74	42,09	162,35	6,77	189,86
V30-700	7,00	0,70	0,45	869,87	634,19	27,09	0,64	229,09	43,11	5,46	48,57	187,33	7,76	217,77
V30-750	7,50	0,75	0,49	995,87	725,89	27,11	0,73	263,90	49,32	6,24	55,56	214,31	8,83	247,69
V30-800	8,00	0,80	0,52	1130,65	824,29	27,10	0,84	301,32	56,01	7,07	63,09	243,33	9,97	279,65
V30-850	8,50	0,85	0,56	1274,27	929,47	27,06	0,95	341,38	63,19	7,96	71,15	274,41	11,18	313,68
V30-900	9,00	0,90	0,59	1426,77	1041,53	27,00	1,07	384,11	70,86	8,91	79,77	307,64	12,47	349,78
V30-950	9,50	0,95	0,63	1588,20	1232,12	22,42	1,19	429,55	97,77	9,91	107,68	414,59	13,83	387,98
V30-1000	10,00	1,00	0,66	1758,62	1366,24	22,31	1,33	477,71	108,56	10,97	119,53	460,21	15,27	428,32
V30-1050	10,50	1,05	0,70	1938,07	1507,98	22,19	1,47	528,63	120,00	12,08	132,08	508,55	16,78	470,80
V30-1100	11,00	1,10	0,74	2126,61	1657,42	22,06	1,62	582,34	132,10	13,26	145,36	559,64	18,38	515,45
V30-1150	11,50	1,15	0,77	2324,28	1814,68	21,93	1,77	638,85	144,87	14,50	159,36	613,55	20,05	562,29
V30-1200	12,00	1,20	0,81	2531,14	1979,85	21,78	1,94	698,20	158,32	15,79	174,11	670,30	21,79	611,34

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 35 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	CUSTO INICIAL (R\$)	CUSTO FINAL (R\$)	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m³)	CUSTO CONCRETO (R\$)	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	CUSTO AÇO (R\$)	ÁREA FORMA (m²)	CUSTO FORMA (R\$)
V35-300	3,00	0,30	0,19	163,69	130,60	20,21	0,11	41,41	9,38	1,24	10,62	40,98	1,72	48,22
V35-350	3,50	0,35	0,22	218,18	172,05	21,14	0,15	56,37	12,18	1,63	13,81	53,30	2,22	62,37
V35-400	4,00	0,40	0,25	280,58	219,44	21,79	0,20	73,72	15,39	2,08	17,46	67,40	2,79	78,33
V35-450	4,50	0,45	0,28	350,94	272,88	22,24	0,25	93,48	19,00	2,58	21,58	83,28	3,43	96,12
V35-500	5,00	0,50	0,31	429,31	332,45	22,56	0,31	115,69	23,04	3,13	26,17	100,10	4,13	115,76
V35-550	5,50	0,55	0,34	515,75	398,22	22,79	0,38	140,37	27,50	3,74	31,24	120,58	4,89	137,27
V35-600	6,00	0,60	0,38	610,29	470,31	22,94	0,45	167,56	32,40	4,41	36,81	142,06	5,73	160,69
V35-650	6,50	0,65	0,41	763,66	548,78	28,14	0,53	197,28	37,74	5,13	42,88	165,48	6,63	186,02
V35-700	7,00	0,70	0,44	882,66	633,74	28,20	0,62	229,55	43,55	5,92	49,46	190,89	7,60	213,30
V35-750	7,50	0,75	0,48	1010,52	725,28	28,23	0,71	264,42	49,81	6,76	56,57	218,33	8,65	242,53
V35-800	8,00	0,80	0,51	1147,28	823,48	28,22	0,82	301,90	56,55	7,66	64,21	247,83	9,76	273,75
V35-850	8,50	0,85	0,54	1292,99	928,43	28,19	0,92	342,03	63,78	8,62	72,40	279,43	10,94	306,98
V35-900	9,00	0,90	0,58	1447,71	1040,23	28,15	1,04	384,83	71,51	9,64	81,15	313,17	12,20	342,23
V35-950	9,50	0,95	0,61	1611,48	1228,72	23,75	1,16	430,33	98,00	10,73	108,72	418,86	13,53	379,53
V35-1000	10,00													

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 40 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	CUSTO INICIAL (R\$)	CUSTO FINAL (R\$)	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m³)	CUSTO CONCRETO (R\$)	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	CUSTO AÇO (R\$)	ÁREA FORMA (m²)	CUSTO FORMA (R\$)
V40-300	3,00	0,30	0,18	167,92	132,01	21,39	0,11	42,66	9,50	1,34	10,84	41,83	1,69	47,51
V40-350	3,50	0,35	0,21	223,91	173,90	22,34	0,15	58,09	12,34	1,75	14,09	54,40	2,19	61,41
V40-400	4,00	0,40	0,24	288,04	221,80	22,99	0,19	75,97	15,58	2,23	17,81	68,76	2,75	77,08
V40-450	4,50	0,45	0,27	360,36	275,81	23,46	0,25	96,34	19,23	2,76	22,00	84,94	3,37	94,53
V40-500	5,00	0,50	0,31	440,92	336,01	23,79	0,31	119,23	23,31	3,36	26,67	102,97	4,06	113,80
V40-550	5,50	0,55	0,34	529,76	402,47	24,03	0,37	144,66	27,82	4,01	31,83	122,91	4,81	134,90
V40-600	6,00	0,60	0,37	626,94	475,31	24,19	0,44	172,68	32,76	4,73	37,49	144,77	5,63	157,86
V40-650	6,50	0,65	0,40	783,17	554,59	29,19	0,52	203,30	38,16	5,50	43,66	168,60	6,51	182,69
V40-700	7,00	0,70	0,43	905,26	640,42	29,26	0,61	236,56	44,01	6,34	50,35	194,44	7,47	209,41
V40-750	7,50	0,75	0,47	1036,42	732,87	29,29	0,70	272,49	50,34	7,24	57,58	222,33	8,49	238,05
V40-800	8,00	0,80	0,50	1176,72	832,05	29,29	0,80	311,11	57,14	8,21	65,34	252,31	9,58	268,64
V40-850	8,50	0,85	0,53	1326,19	938,04	29,27	0,90	352,45	64,42	9,23	73,66	284,41	10,74	301,18
V40-900	9,00	0,90	0,56	1484,88	1050,93	29,22	1,02	396,55	72,21	10,33	82,53	318,69	11,97	335,70
V40-950	9,50	0,95	0,60	1652,85	1170,82	29,16	1,14	443,42	80,50	11,49	91,99	355,18	13,27	372,22
V40-1000	10,00	1,00	0,63	1830,14	1373,61	24,95	1,26	493,11	109,16	12,71	121,87	469,74	14,64	410,76
V40-1050	10,50	1,05	0,67	2016,80	1515,82	24,84	1,40	545,64	120,61	14,00	134,61	518,84	16,09	451,34
V40-1100	11,00	1,10	0,70	2212,89	1665,74	24,73	1,54	601,03	132,72	15,36	148,08	570,72	17,61	493,99
V40-1150	11,50	1,15	0,74	2418,44	1823,45	24,60	1,69	659,31	145,49	16,79	162,28	625,43	19,21	538,71
V40-1200	12,00	1,20	0,77	2633,52	1989,06	24,47	1,85	720,52	158,93	18,29	177,22	683,00	20,87	585,54

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 45 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	CUSTO INICIAL (R\$)	CUSTO FINAL (R\$)	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m³)	CUSTO CONCRETO (R\$)	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	CUSTO AÇO (R\$)	ÁREA FORMA (m²)	CUSTO FORMA (R\$)
V45-300	3,00	0,30	0,18	170,33	132,42	22,26	0,11	42,86	9,63	1,42	11,05	42,68	1,67	46,88
V45-350	3,50	0,35	0,21	227,17	174,40	23,23	0,15	58,36	12,50	1,87	14,36	55,47	2,16	60,56
V45-400	4,00	0,40	0,24	292,28	222,40	23,91	0,19	76,33	15,77	2,37	18,14	70,09	2,71	75,97
V45-450	4,50	0,45	0,27	365,70	276,51	24,39	0,24	96,81	19,47	2,94	22,41	86,56	3,32	93,13
V45-500	5,00	0,50	0,30	447,49	336,80	24,74	0,30	119,81	23,59	3,57	27,16	104,92	4,00	112,07
V45-550	5,50	0,55	0,33	537,69	403,38	24,98	0,36	145,38	28,14	4,27	32,41	125,19	4,73	132,80
V45-600	6,00	0,60	0,36	636,36	476,31	25,15	0,43	173,54	33,14	5,02	38,16	147,43	5,54	155,35
V45-650	6,50	0,65	0,39	794,20	555,70	30,03	0,51	204,31	38,58	5,85	44,43	171,66	6,41	179,74
V45-700	7,00	0,70	0,42	918,02	641,63	30,11	0,59	237,73	44,49	6,74	51,23	197,92	7,34	205,98
V45-750	7,50	0,75	0,46	1051,04	734,19	30,15	0,68	273,84	50,87	7,69	58,57	226,25	8,35	234,10
V45-800	8,00	0,80	0,49	1193,32	833,47	30,16	0,78	312,64	57,73	8,72	66,45	256,70	9,42	264,12
V45-850	8,50	0,85	0,52	1344,89	939,55	30,14	0,89	354,19	65,08	9,81	74,89	289,31	10,55	296,06
V45-900	9,00	0,90	0,55	1505,82	1052,53	30,10	1,00	398,50	72,93	10,97	83,90	324,10	11,76	329,93
V45-950	9,50	0,95	0,59	1676,14	1172,49	30,05	1,11	445,60	81,29	12,20	93,48	361,13	13,04	365,77
V45-1000	10,00	1,00	0,62	1855,90	1373,83	25,98	1,24	495,52	109,61	13,50	123,11	474,72	14,39	403,58
V45-1050	10,50	1,05	0,65	2045,16	1515,94	25,88	1,37	548,29	121,09	14,87	135,96	524,26	15,81	443,39
V45-1100	11,00	1,10	0,69	2243,97	1665,73	25,77	1,51	603,94	133,22	16,31	149,53	576,57	17,30	485,22
V45-1150	11,50	1,15	0,72	2452,36	1823,31	25,65	1,66	662,49	146,02	17,82	163,83	631,73	18,86	529,09
V45-1200	12,00	1,20	0,75	2670,40	1988,75	25,53	1,81	723,98	159,48	19,41	178,89	689,76	20,50	575,01

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS DAS VIGAS - Fck 50 MPa														
NOME	VÃO (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	CUSTO INICIAL (R\$)	CUSTO FINAL (R\$)	REDUÇÃO (%)	VOLUME CONCRETO (m³)	CUSTO CONCRETO (R\$)	PESO AÇO LONGITUDINAL (Kg)	PESO AÇO TRANSVERSAL (Kg)	PESO TOTAL AÇO (Kg)	CUSTO AÇO (R\$)	ÁREA FORMA (m²)	CUSTO FORMA (R\$)
V50-300	3,00	0,30	0,18	174,53	133,98	23,23	0,11	44,16	9,76	1,50	11,26	43,50	1,65	46,32
V50-350	3,50	0,35	0,20	232,87	176,46	24,22	0,14	60,14	12,65	1,97	14,63	56,53	2,13	59,80
V50-400	4,00	0,40	0,23	299,70	225,04	24,91	0,19	78,66	15,97	2,51	18,47	71,39	2,67	74,98
V50-450	4,50	0,45	0,26	375,08	279,79	25,40	0,24	99,77	19,70	3,11	22,81	88,14	3,28	91,88
V50-500	5,00	0,50	0,29	459,04	340,80	25,76	0,29	123,48	23,86	3,77	27,63	106,80	3,94	110,52
V50-550	5,50	0,55	0,32	551,65	408,17	26,01	0,36	149,83	28,46	4,50	32,97	127,41	4,67	130,92
V50-600	6,00	0,60	0,35	652,94	481,97	26,18	0,43	178,85	33,51	5,30	38,81	150,00	5,46	153,11
V50-650	6,50	0,65	0,39	813,64	562,29	30,89	0,50	210,57	39,01	6,17	45,18	174,62	6,31	177,10
V50-700	7,00	0,70	0,42	940,54	649,23	30,97	0,58	245,02	44,97	7,11	52,08	201,30	7,23	202,91
V50-750	7,50	0,75	0,45	1076,86	742,86	31,02	0,67	282,23	51,41	8,12	59,53	230,06	8,22	230,56
V50-800	8,00	0,80	0,48	1222,67	843,28	31,03	0,77	322,23	58,33	9,20	67,52	260,98	9,27	260,08
V50-850	8,50	0,85	0,51	1378,00	950,58	31,02	0,87	365,04	65,74	10,35	76,09	294,06	10,39	291,48
V50-900	9,00	0,90	0,54	1542,90	1064,85	30,98	0,98	410,70	73,65	11,57	85,22	329,36	11,58	324,78
V50-950	9,50	0,95	0,58	1717,42	1186,17	30,93	1,09	459,24	82,08	12,86	94,94	366,93	12,83	360,00
V50-1000	10,00	1,00	0,61	1901,61	1387,56	27,03	1,22	510,69	110,12	14,23	124,35	479,71	14,16	397,17
V50-1050	10,50	1,05	0,64	2095,51	1531,02	26,94	1,35	565,07	121,63	15,68	137,30	529,67	15,55	436,29
V50-1100	11,00	1,10	0,67	2299,19	1682,23	26,83	1,48	622,41	133,79	17,20	150,98	582,43	17,02	477,39
V50-1150	11,50	1,15	0,71	2512,67	1841,28	26,72	1,63	682,74	146,61	18,79	165,40	638,05	18,56	520,49
V50-1200	12,00	1,20	0,74	2736,02	2008,25	26,60	1,78	746,10	160,11	20,46	180,57	696,55	20,16	565,61

## Apêndice F

Resultados dos dimensionamentos otimizados dos pilares para o cenário 1 de estudo proposto

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS - P1									
Fck	SEÇÃO (X <sub>1</sub> ) (m)	SEÇÃO (X <sub>2</sub> ) (m)	EMISSÃO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> /m pilar)	EMISSÃO CONCRETO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	PESO AÇO (kg/m pilar)	EMISSÃO AÇO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> /m pilar)	EMISSÃO FORMA (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)
20 MPa	0,19	0,37	17,34	0,07	9,85	5,24	5,50	1,12	1,99
25 MPa	0,19	0,33	16,55	0,06	9,36	5,09	5,34	1,04	1,85
30 MPa	0,19	0,33	16,03	0,06	9,88	4,09	4,29	1,04	1,85
35 MPa	0,19	0,31	16,04	0,06	10,12	3,95	4,14	1,00	1,78
40 MPa	0,19	0,30	16,24	0,06	10,38	3,92	4,11	0,98	1,74
45 MPa	0,19	0,29	16,47	0,06	10,73	3,84	4,03	0,96	1,71
50 MPa	0,19	0,28	17,69	0,05	12,01	3,81	4,01	0,94	1,67

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS - P2									
Fck	SEÇÃO (X <sub>1</sub> ) (m)	SEÇÃO (X <sub>2</sub> ) (m)	EMISSÃO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> /m pilar)	EMISSÃO CONCRETO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	PESO AÇO (kg/m pilar)	EMISSÃO AÇO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> /m pilar)	EMISSÃO FORMA (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)
20 MPa	0,21	0,98	45,63	0,21	28,82	11,97	12,57	2,38	4,24
25 MPa	0,20	0,90	41,06	0,18	26,87	9,79	10,28	2,20	3,92
30 MPa	0,19	0,80	38,13	0,15	23,96	10,14	10,64	1,98	3,52
35 MPa	0,19	0,74	37,37	0,14	24,15	9,44	9,91	1,86	3,31
40 MPa	0,19	0,68	35,98	0,13	23,53	8,91	9,35	1,74	3,10
45 MPa	0,19	0,63	35,37	0,12	23,31	8,71	9,15	1,64	2,92
50 MPa	0,20	0,57	37,06	0,11	25,74	8,17	8,58	1,54	2,74

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS - P3									
Fck	SEÇÃO (X <sub>1</sub> ) (m)	SEÇÃO (X <sub>2</sub> ) (m)	EMISSÃO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> /m pilar)	EMISSÃO CONCRETO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	PESO AÇO (kg/m pilar)	EMISSÃO AÇO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> /m pilar)	EMISSÃO FORMA (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)
20 MPa	0,42	1,10	89,71	0,46	64,70	18,66	19,60	3,04	5,41
25 MPa	0,36	1,05	79,25	0,38	56,42	16,96	17,81	2,82	5,02
30 MPa	0,30	1,05	72,29	0,32	49,66	16,98	17,82	2,70	4,81
35 MPa	0,26	1,04	68,85	0,27	46,44	16,94	17,78	2,60	4,63
40 MPa	0,22	1,07	65,35	0,24	42,88	17,03	17,88	2,58	4,59
45 MPa	0,21	1,01	63,31	0,21	41,30	16,83	17,67	2,44	4,34
50 MPa	0,20	0,97	65,50	0,19	43,80	16,70	17,53	2,34	4,17

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS - P4									
Fck	SEÇÃO (X <sub>1</sub> ) (m)	SEÇÃO (X <sub>2</sub> ) (m)	EMISSÃO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> /m pilar)	EMISSÃO CONCRETO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	PESO AÇO (kg/m pilar)	EMISSÃO AÇO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> /m pilar)	EMISSÃO FORMA (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)
20 MPa	0,60	1,12	126,20	0,67	94,11	24,73	25,96	3,44	6,12
25 MPa	0,46	1,17	111,46	0,54	80,33	24,12	25,33	3,26	5,80
30 MPa	0,42	1,08	101,18	0,45	71,51	23,17	24,33	3,00	5,34
35 MPa	0,34	1,14	96,42	0,39	66,57	23,41	24,58	2,96	5,27
40 MPa	0,28	1,20	91,33	0,34	61,20	23,68	24,86	2,96	5,27
45 MPa	0,27	1,12	88,49	0,30	58,88	23,49	24,66	2,78	4,95
50 MPa	0,24	1,13	90,65	0,27	61,23	23,37	24,54	2,74	4,88

## Apêndice G

Resultados dos dimensionamentos otimizados dos pilares para o cenário 2 de estudo proposto

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS - P1									
Fck	SEÇÃO (X <sub>1</sub> ) (m)	SEÇÃO (X <sub>2</sub> ) (m)	EMISSÃO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> /m pilar)	EMISSÃO CONCRETO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	PESO AÇO (kg/m pilar)	EMISSÃO AÇO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> /m pilar)	EMISSÃO FORMA (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)
20 MPa	0,19	0,37	53,60	0,07	15,92	5,25	10,76	1,12	26,91
25 MPa	0,19	0,33	49,85	0,06	14,43	5,09	10,43	1,04	24,99
30 MPa	0,19	0,31	52,77	0,06	18,43	5,03	10,31	1,00	24,03
35 MPa	0,19	0,29	50,99	0,06	17,84	4,92	10,08	0,96	23,07
50 MPa	0,19	0,26	48,96	0,05	17,47	4,81	9,86	0,90	21,63

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS - P2									
Fck	SEÇÃO (X <sub>1</sub> ) (m)	SEÇÃO (X <sub>2</sub> ) (m)	EMISSÃO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> /m pilar)	EMISSÃO CONCRETO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	PESO AÇO (kg/m pilar)	EMISSÃO AÇO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> /m pilar)	EMISSÃO FORMA (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)
20 MPa	0,29	0,79	124,59	0,23	51,90	10,14	20,79	2,16	51,90
25 MPa	0,25	0,75	111,74	0,19	43,16	10,01	20,52	2,00	48,06
30 MPa	0,22	0,74	115,91	0,16	50,94	9,18	18,83	1,92	46,14
35 MPa	0,19	0,72	108,34	0,14	44,30	9,90	20,30	1,82	43,73
50 MPa	0,19	0,59	94,74	0,11	39,65	8,58	17,60	1,56	37,49

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS - P3									
Fck	SEÇÃO (X <sub>1</sub> ) (m)	SEÇÃO (X <sub>2</sub> ) (m)	EMISSÃO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> /m pilar)	EMISSÃO CONCRETO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	PESO AÇO (kg/m pilar)	EMISSÃO AÇO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> /m pilar)	EMISSÃO FORMA (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)
20 MPa	0,44	1,06	215,27	0,47	105,65	18,31	37,53	3,00	72,09
25 MPa	0,41	0,95	189,56	0,39	89,66	16,85	34,54	2,72	65,36
30 MPa	0,30	1,05	198,68	0,32	98,56	17,19	35,23	2,70	64,88
35 MPa	0,28	0,98	184,16	0,27	88,85	16,95	34,75	2,52	60,56
50 MPa	0,24	0,85	158,09	0,20	72,16	16,36	33,55	2,18	52,39

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS - P4									
Fck	SEÇÃO (X <sub>1</sub> ) (m)	SEÇÃO (X <sub>2</sub> ) (m)	EMISSÃO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> /m pilar)	EMISSÃO CONCRETO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	PESO AÇO (kg/m pilar)	EMISSÃO AÇO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> /m pilar)	EMISSÃO FORMA (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)
20 MPa	0,63	1,07	285,58	0,67	152,70	24,97	51,18	3,40	81,70
25 MPa	0,52	1,05	248,52	0,55	125,68	23,12	47,39	3,14	75,45
30 MPa	0,45	1,02	261,47	0,46	143,62	23,02	47,20	2,94	70,65
35 MPa	0,38	1,03	241,93	0,39	126,74	23,14	47,43	2,82	67,76
50 MPa	0,27	1,02	206,73	0,28	97,41	23,08	47,32	2,58	62,00

## Apêndice H

Resultados dos dimensionamentos otimizados dos pilares para o cenário 3 de estudo proposto

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS - P1									
Fck	SEÇÃO (X <sub>1</sub> ) (m)	SEÇÃO (X <sub>2</sub> ) (m)	EMISSÃO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> /m pilar)	EMISSÃO CONCRETO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	PESO AÇO (kg/m pilar)	EMISSÃO AÇO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> /m pilar)	EMISSÃO FORMA (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)
20 MPa	0,19	0,37	47,53	0,07	21,62	5,24	11,01	1,12	14,90
25 MPa	0,19	0,33	45,14	0,06	20,64	5,08	10,67	1,04	13,83
30 MPa	0,19	0,33	44,27	0,06	21,87	4,08	8,57	1,04	13,83
35 MPa	0,19	0,31	44,09	0,06	22,48	3,95	8,31	1,00	13,30
50 MPa	0,19	0,26	47,19	0,05	25,13	4,81	10,09	0,90	11,97

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS - P2									
Fck	SEÇÃO (X <sub>1</sub> ) (m)	SEÇÃO (X <sub>2</sub> ) (m)	EMISSÃO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> /m pilar)	EMISSÃO CONCRETO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	PESO AÇO (kg/m pilar)	EMISSÃO AÇO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> /m pilar)	EMISSÃO FORMA (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)
20 MPa	0,27	0,83	119,75	0,22	68,93	10,27	21,56	2,20	29,26
25 MPa	0,22	0,82	108,53	0,18	59,37	10,23	21,49	2,08	27,66
30 MPa	0,19	0,80	100,70	0,15	53,01	10,17	21,36	1,98	26,33
35 MPa	0,19	0,72	97,21	0,14	52,22	9,90	20,78	1,82	24,21
50 MPa	0,19	0,59	95,78	0,11	57,02	8,58	18,01	1,56	20,75

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS - P3									
Fck	SEÇÃO (X <sub>1</sub> ) (m)	SEÇÃO (X <sub>2</sub> ) (m)	EMISSÃO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> /m pilar)	EMISSÃO CONCRETO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	PESO AÇO (kg/m pilar)	EMISSÃO AÇO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> /m pilar)	EMISSÃO FORMA (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)
20 MPa	0,43	1,08	221,88	0,46	142,84	18,51	38,87	3,02	40,17
25 MPa	0,36	1,05	197,67	0,38	124,41	17,03	35,75	2,82	37,51
30 MPa	0,29	1,08	181,96	0,31	109,23	17,28	36,28	2,74	36,44
35 MPa	0,26	1,04	173,49	0,27	103,22	17,00	35,69	2,60	34,58
50 MPa	0,20	0,97	164,99	0,19	98,67	16,76	35,20	2,34	31,12

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS - P4									
Fck	SEÇÃO (X <sub>1</sub> ) (m)	SEÇÃO (X <sub>2</sub> ) (m)	EMISSÃO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	VOLUME CONCRETO (m <sup>3</sup> /m pilar)	EMISSÃO CONCRETO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	PESO AÇO (kg/m pilar)	EMISSÃO AÇO (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)	ÁREA FORMA (m <sup>2</sup> /m pilar)	EMISSÃO FORMA (kgCO <sub>2</sub> /m pilar)
20 MPa	0,59	1,13	304,77	0,67	205,07	25,69	53,95	3,44	45,75
25 MPa	0,46	1,17	270,35	0,54	177,13	23,74	49,86	3,26	43,36
30 MPa	0,43	1,06	247,18	0,46	158,96	23,13	48,58	2,98	39,63
35 MPa	0,36	1,08	235,78	0,39	148,41	23,36	49,06	2,88	38,30
50 MPa	0,26	1,05	222,22	0,27	138,86	23,10	48,52	2,62	34,85

## Apêndice I

Resultados dos dimensionamentos otimizados dos pilares para o cenário 4 de estudo proposto

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS - P1									
Fck	SEÇÃO (X <sub>1</sub> )	SEÇÃO (X <sub>2</sub> )	CUSTO	VOLUME	CUSTO	PESO	CUSTO	ÁREA	CUSTO
	(m)	(m)	(R\$/m pilar)	CONCRETO	CONCRETO	AÇO	AÇO	FORMA	FORMA
				(m <sup>3</sup> /m pilar)	(R\$/m pilar)	(kg/m pilar)	(R\$/m pilar)	(m <sup>2</sup> /m pilar)	(R\$/m pilar)
20 MPa	0,19	0,37	74,64	0,07	23,20	5,24	20,03	1,12	31,42
25 MPa	0,19	0,33	70,53	0,06	21,95	5,08	19,41	1,04	29,17
30 MPa	0,19	0,33	67,32	0,06	22,57	4,08	15,58	1,04	29,17
35 MPa	0,19	0,31	64,97	0,06	21,79	3,96	15,13	1,00	28,05
40 MPa	0,19	0,30	64,67	0,06	22,23	3,91	14,95	0,98	27,49
45 MPa	0,19	0,29	63,69	0,06	22,04	3,85	14,72	0,96	26,93
50 MPa	0,19	0,28	63,27	0,05	22,34	3,81	14,56	0,94	26,37

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS - P2									
Fck	SEÇÃO (X <sub>1</sub> )	SEÇÃO (X <sub>2</sub> )	CUSTO	VOLUME	CUSTO	PESO	CUSTO	ÁREA	CUSTO
	(m)	(m)	(R\$/m pilar)	CONCRETO	CONCRETO	AÇO	AÇO	FORMA	FORMA
				(m <sup>3</sup> /m pilar)	(R\$/m pilar)	(kg/m pilar)	(R\$/m pilar)	(m <sup>2</sup> /m pilar)	(R\$/m pilar)
20 MPa	0,27	0,83	174,92	0,22	73,95	10,28	39,26	2,20	61,71
25 MPa	0,25	0,75	159,95	0,19	65,63	10,01	38,23	2,00	56,10
30 MPa	0,22	0,74	147,55	0,16	58,61	9,18	35,09	1,92	53,86
35 MPa	0,23	0,65	138,39	0,15	55,32	8,82	33,71	1,76	49,37
40 MPa	0,23	0,60	133,33	0,14	53,82	8,62	32,95	1,66	46,56
45 MPa	0,21	0,59	127,23	0,12	49,56	8,58	32,79	1,60	44,88
50 MPa	0,20	0,57	123,56	0,11	47,88	8,50	32,48	1,54	43,20

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS - P3									
Fck	SEÇÃO (X <sub>1</sub> )	SEÇÃO (X <sub>2</sub> )	CUSTO	VOLUME	CUSTO	PESO	CUSTO	ÁREA	CUSTO
	(m)	(m)	(R\$/m pilar)	CONCRETO	CONCRETO	AÇO	AÇO	FORMA	FORMA
				(m <sup>3</sup> /m pilar)	(R\$/m pilar)	(kg/m pilar)	(R\$/m pilar)	(m <sup>2</sup> /m pilar)	(R\$/m pilar)
20 MPa	0,44	1,06	308,00	0,47	153,91	18,31	69,94	3,00	84,15
25 MPa	0,36	1,05	276,49	0,38	132,30	17,04	65,09	2,82	79,10
30 MPa	0,31	1,02	253,57	0,32	113,83	17,05	65,13	2,66	74,61
35 MPa	0,29	0,96	237,05	0,28	103,01	16,73	63,92	2,50	70,13
40 MPa	0,28	0,89	226,41	0,25	97,19	16,65	63,59	2,34	65,64
45 MPa	0,27	0,84	215,36	0,23	90,72	16,33	62,37	2,22	62,27
50 MPa	0,24	0,85	209,91	0,20	85,68	16,51	63,08	2,18	61,15

RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS OTIMIZADOS - P4									
Fck	SEÇÃO (X <sub>1</sub> )	SEÇÃO (X <sub>2</sub> )	CUSTO	VOLUME	CUSTO	PESO	CUSTO	ÁREA	CUSTO
	(m)	(m)	(R\$/m pilar)	CONCRETO	CONCRETO	AÇO	AÇO	FORMA	FORMA
				(m <sup>3</sup> /m pilar)	(R\$/m pilar)	(kg/m pilar)	(R\$/m pilar)	(m <sup>2</sup> /m pilar)	(R\$/m pilar)
20 MPa	0,58	1,15	413,51	0,67	220,11	25,22	96,35	3,46	97,05
25 MPa	0,52	1,05	368,38	0,55	191,10	23,35	89,20	3,14	88,08
30 MPa	0,45	1,02	335,87	0,46	165,24	23,08	88,16	2,94	82,47
35 MPa	0,38	1,03	313,03	0,39	144,82	23,33	89,11	2,82	79,10
40 MPa	0,33	1,04	299,48	0,34	133,85	23,24	88,78	2,74	76,86
45 MPa	0,33	0,95	284,35	0,31	125,40	22,81	87,14	2,56	71,81
50 MPa	0,27	1,02	276,20	0,28	115,67	23,08	88,16	2,58	72,37



**UPF**  
UNIVERSIDADE  
DE PASSO FUNDO

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