

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS
POR ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO NA
CIDADE DE CHAPECÓ - SC

Jeferson Junior Alievi

Passo Fundo

2022



CIP – Catalogação na Publicação

A398a Alievi, Jeferson Junior
Avaliação de impactos ambientais gerados por estruturas de concreto armado na cidade de Chapecó – SC [recurso eletrônico] /Jeferson Junior Alievi. – 2022.
2.4 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Moacir Kripka.
Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo, 2022.

1. Concreto armado – Aspectos ambientais. 2. Dióxido de carbono. 3. Sustentabilidade. 3. I. Kripka, Moacir, orientador. II. Título.

CDU: 691.328

Catálogo: Bibliotecária Juliana Langaro Silveira - CRB 10/2427

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma maneira contribuíram para que este sonho fosse realizado.

A Deus, que sempre está presente em minha jornada, pela força e sabedoria concedida.

A minha esposa Marli, a filha Helena, pelo o apoio e incentivo necessário para que eu chegasse até aqui.

Ao professor e orientador Dr. Moacir Kripka, por ter me aceito como orientando, por todo o auxílio dado em todas as etapas deste estudo.

Aos professores componentes das bancas examinadoras, pelas contribuições.

RESUMO

O concreto armado é o sistema estrutural mais utilizado no Brasil e no mundo. Para a sua produção são necessárias enormes quantidades de matéria-prima, de água e energia. Além disso, há considerável emissão de dióxido de carbono (CO₂) desde a extração do cimento até o destino final. A elevada utilização das estruturas de concreto armado é devido à facilidade de execução, à disposição de moldar as mais diferentes formas, bem como o baixo custo com relação a outros sistemas estruturais. Os fatores que geram os impactos ambientais nas estruturas de concreto armado são diversos, podendo ser citados a produção/beneficiamento do cimento e aço, o transporte das matérias-primas e do concreto já industrializado, logo, parte-se da hipótese que para tornar a estrutura de concreto armado mais sustentável, um dos meios de redução das emissões, é a diminuição do volume de concreto utilizado na estrutura através da análise da concepção estrutural e da otimização da estrutura. No presente estudo, avaliam-se as emissões de CO₂ do concreto armado com resistência característica a compressão de 20 MPa e 35 MPa para a região de Chapecó – SC. Os parâmetros calculados foram com base em dados da extração, produção e beneficiamento obtidos de empresas fornecedoras de matéria-prima e com a concreteira selecionada para a pesquisa, e também calculados através do *Software* SimaPro 9.2.0.1, com sua base de dados ajustada para a região em estudo. Posteriormente, de posse dos dados de emissões de CO₂, foi realizado o dimensionamento otimizado de elementos estruturais (pilares e vigas) com o objetivo de minimizar os impactos ambientais, observando que, para os concretos de resistências a compressão maiores, há maior emissão de CO₂. Em seguida, foi calculado a carbonatação dos elementos estruturais (pilares e vigas) utilizando a metodologia descrita por Felix e Possan (2018) e avaliada sua influência ao longo do ciclo de vida das estruturas de concreto armado. Os resultados apontam que concretos de menor resistência a compressão apresentam melhores taxas de absorção de CO₂. Por fim, os resultados obtidos foram comparados aos da literatura, evidenciando que fatores como condições locais podem influenciar nos impactos ambientais.

Palavras-chave: Emissões de CO₂; Concreto armado; Otimização; Carbonatação; Avaliação do Ciclo de Vida; Sustentabilidade;

ABSTRACT

Reinforced concrete is the most used structural system in Brazil and worldwide. Its production requires huge amounts of raw material, water and energy. In addition, there is considerable emission of carbon dioxide (CO₂) from the extraction of cement to the final destination. The high use of reinforced concrete structures is due to the ease of execution, the willingness to mold the most different shapes, as well as the low cost in relation to other structural systems. The factors that generate the environmental impacts on reinforced concrete structures are diverse, including the production/processing of cement and steel, the transport of raw materials and already industrialized concrete, so it is assumed that to make the More sustainable reinforced concrete structure, one of the means of reducing emissions, is the reduction of the volume of concrete used in the structure through the analysis of the structural design and the optimization of the structure. In the present study, CO₂ emissions from reinforced concrete with a characteristic compressive strength of 20 MPa and 35 MPa are evaluated for the region of Chapecó – SC. The calculated parameters were based on extraction, production and processing data obtained from raw material supply companies and with the concrete producer selected for the research, and also calculated using the SimaPro Software 9.2.0.1, with its database adjusted for the region under study. Subsequently, in possession of the CO₂ emissions data, the optimized design of structural elements (columns and beams) was carried out with the objective of minimizing environmental impacts, noting that, for concretes with higher compressive strengths, there is greater CO₂ emission. Then, the carbonation of the structural elements (columns and beams) was calculated using the methodology described by Felix and Possan (2018) and its influence over the life cycle of reinforced concrete structures was evaluated. The results indicate that concretes with lower compressive strength have better CO₂ absorption rates. Finally, the results obtained were compared to the literature, showing that factors such as local conditions can influence environmental impacts.

Keywords: CO₂ emissions; Reinforced concrete; Optimization; carbonation; Life Cycle Assessment; Sustainability;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases de uma ACV.....	14
Figura 2 – Exemplo de um sistema de produto para ACV.....	15
Figura 3 – Exemplo de um conjunto de processos elementares dentro de um sistema de produto	15
Figura 4 – Procedimentos simplificados para análise de inventário.....	17
Figura 5 – Elementos da fase de AICV.....	18
Figura 6 – Relacionamento dos elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV.....	20
Figura 7 – Metodologia de cálculo de carbonatação das estruturas de concreto armado.....	29
Figura 8 – Fluxograma das etapas para o desenvolvimento da pesquisa.....	34
Figura 9 – Localização geográfica das matérias-primas.....	35
Figura 10 – Fluxograma com dados ajustados para o aço.....	41
Figura 11 – Fluxograma com dados ajustados para formas de madeira.....	41
Figura 12 – Fluxograma com dados ajustados para concreto de 20 MPa.....	42
Figura 13 – Fluxograma com dados ajustados para concreto de 35 MPa.....	43
Figura 14 – Índice das emissões de CO ₂ nas fases de extração/produção e transporte da matéria-prima.....	50
Figura 15 – Contribuições percentuais das emissões de CO ₂ nas fases de extração/produção e transporte.....	50
Figura 16 – Contribuições percentuais das emissões de CO ₂ das matérias-primas para um metro cúbico de concreto de 20 MPa.....	51
Figura 17 – Porcentagem das matérias-primas para um metro cúbico de concreto de 20 MPa.....	52
Figura 18 – Emissões de CO ₂ x Volume para a produção de um metro cúbico de concreto de 20 MPa.....	52
Figura 19 – Contribuições percentuais das emissões de CO ₂ das matérias-primas para um metro cúbico de concreto de 35 MPa.....	53
Figura 20 – Porcentagem das matérias-primas para um metro cúbico de concreto de 35 MPa.....	54
Figura 21 – Emissões de CO ₂ x Volume para a produção de um metro cúbico de concreto de 35 MPa.....	54
Figura 22 – Emissões de CO ₂ nas fases de extração/produção e transporte do concreto.....	55
Figura 23 – Emissões de CO ₂ das matérias-primas por metro cúbico de concreto.....	55
Figura 24 – Emissões simuladas de CO ₂	56
Figura 25 – Emissões CO ₂ estudo x emissões CO ₂ simuladas.....	57
Figura 26 – Emissões CO ₂ no processo de produção e transporte do concreto.....	58
Figura 27 – Emissões CO ₂ no processo de produção e transporte do concreto.....	58
Figura 28 – Comparativo das emissões de CO ₂ na extração/produção das matérias-primas componentes do concreto.....	60
Figura 29 – Comparativo das emissões de CO ₂ no transporte das matérias-primas componentes do concreto.....	61
Figura 30 – Comparativo das emissões de CO ₂ na extração/produção e transporte das matérias-primas componentes do concreto.....	62
Figura 31 – Comparativo das emissões de CO ₂ (em %) na extração/produção e transporte das matérias-primas componentes do concreto.....	63
Figura 32 – Emissões de CO ₂ para a produção de um metro cúbico de concreto de 20 MPa.....	63
Figura 33 – Contribuições percentuais para a produção de um metro cúbico de concreto de 20 MPa.....	64
Figura 34 – Emissões de CO ₂ para a produção de um metro cúbico de concreto de 35 MPa.....	65
Figura 35 – Contribuições percentuais para a produção de um metro cúbico de concreto de 35 MPa.....	65
Figura 36 – Emissões de CO ₂ para a produção e transporte do concreto.....	66
Figura 37 – Contribuições percentuais das emissões de CO ₂ para a produção e transporte do concreto.....	67
Figura 38 – Emissões de CO ₂ extraídos do software SimaPro.....	67

Figura 39 – Comparativo das emissões de CO ₂ para a região de Passo Fundo–RS e Chapecó–SC.	68
Figura 40 – Variáveis de projeto da otimização de pilar.	70
Figura 41 – Emissões de CO ₂ do dimensionamento otimizado dos pilares em concreto armado.	73
Figura 42 – Contribuições percentuais das emissões de CO ₂ dos materiais para os pilares otimizados (%/m).	74
Figura 43 – Comparativo das seções otimizadas do pilar P1 em relação as emissões de CO ₂	75
Figura 44 – Custos dos pilares otimizados para o concreto de 20 MPa e 35 MPa.	76
Figura 45 – Contribuições percentuais dos materiais no custo dos pilares.	77
Figura 46 – Comparativo dos resultados do dimensionamento otimizado de pilares com ênfase nas emissões de CO ₂	78
Figura 47 – Comparativo dos resultados do dimensionamento otimizado de pilares com ênfase no custo.	79
Figura 48 – Comparativo das seções otimizadas do pilar P1 em relação ao custo.	79
Figura 49 – Modelo de viga biapoiada para o estudo.	80
Figura 50 – Emissões de CO ₂ das vigas biapoiadas em concreto armado.	81
Figura 51 – Comparativo das emissões de CO ₂ para vigas biapoiadas em concreto armado com resistências de 20 MPa e 35 MPa.	81
Figura 52 – Custos das vigas bi apoiadas em concreto armado.	83
Figura 53 – Comparativo dos custos das vigas bi apoiadas em concreto armado de 20 MPa e 35 MPa.	83
Figura 54 – Comparativo do dimensionamento otimizado de vigas com ênfase nas emissões de CO ₂	84
Figura 55 – Comparativo do dimensionamento otimizado de vigas com ênfase no custo.	85
Figura 56 – Captura de CO ₂ durante a vida útil dos pilares dimensionados com concreto de 20 MPa e 35 MPa.	86
Figura 57 – Captura de CO ₂ durante a vida útil das vigas dimensionados com concreto de 20 MPa.	87
Figura 58 – Captura de CO ₂ durante a vida útil das vigas dimensionados com concreto de 35 MPa.	87
Figura 59 – Carbonatação da viga em concreto armado para vida útil de 10 a 100 anos.	88
Figura 60 – Carbonatação da viga em concreto armado para vida útil de 10 a 100 anos.	89
Figura 61 – Comparativo da carbonatação da viga com vão de 6,50 m para vida útil variando de 10 a 100 anos, dimensionada em concreto de 20 MPa e 35 MPa.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de entrada para o cálculo da profundidade de carbonatação do concreto.....	31
Tabela 2–Características do concreto e condições ambientais.	31
Tabela 3 – Condições de exposição da estrutura.	32
Tabela 4 – Emissões de CO ₂ na extração e produção do agregado graúdo (brita 00, brita 01) e agregado miúdo (areia industrial).....	46
Tabela 5 – Emissões de CO ₂ no transporte do agregado graúdo (brita 00, brita 01) e agregado miúdo (areia industrial).....	47
Tabela 6 – Emissões de CO ₂ na extração e produção do agregado miúdo natural.	47
Tabela 7 – Emissões de CO ₂ no transporte do agregado miúdo natural.....	47
Tabela 8 – Emissões de CO ₂ no transporte do aglomerante (cimento) até a central dosadora de concreto.	48
Tabela 9 – Emissões de CO ₂ no transporte do aço até a obra.....	48
Tabela 10 – Emissões de CO ₂ na produção e beneficiamento da madeira.	48
Tabela 11 – Emissões de CO ₂ no transporte da madeira até a obra.	48
Tabela 12 – Emissões de CO ₂ nas fases de extração/produção e transporte da matéria-prima.	49
Tabela 13 – Emissões de CO ₂ para um metro cúbico de concreto de 20 MPa.....	51
Tabela 14 – Emissões de CO ₂ para um metro cúbico de concreto de 35 MPa.....	53
Tabela 15 – Emissões de CO ₂ para a produção e transporte do concreto da central dosadora até a obra.	57
Tabela 16 – Emissões de CO ₂ calculados pelo Software SimaPro.	59
Tabela 17 – Contribuições percentuais dos materiais em relação ao transporte.....	60
Tabela 18 – Valores dos esforços atuantes nas seções dos pilares.	73
Tabela 19 – Emissões de CO ₂ dos pilares em concreto armado otimizados (kgCO ₂ /m de pilar).....	73
Tabela 20 – Contribuições percentuais das emissões de CO ₂ dos materiais para os pilares otimizados (%/m).	74
Tabela 21 – Custo unitário dos materiais.	76
Tabela 22 – Custo unitário dos pilares (R\$/m de pilar).	76
Tabela 23 – Contribuições percentuais dos materiais no custo dos pilares otimizados.	77
Tabela 24 – Seções das vigas para os concretos de 20 MPa e 35 MPa.....	82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
1.2	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	8
1.2	JUSTIFICATIVA.....	9
1.3	OBJETIVOS.....	11
1.3.1	Objetivo Geral.....	11
1.3.2	Objetivos específicos.....	11
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	12
2.1	Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	12
2.1.1	Definição do objetivo e escopo.....	15
2.1.2	Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV).....	16
2.1.3	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV).....	18
2.1.4	Interpretação do ciclo de vida.....	19
2.2	Avaliação do Ciclo de Vida na construção civil.....	21
2.2.1	Cimento	22
2.2.2	Aço	23
2.2.3	Agregados miúdo e graúdo.....	25
2.2.4	Forma de madeira.....	25
2.3	Otimização de elementos estruturais em concreto armado	26
2.4	Carbonatação das estruturas de concreto armado	28
3	METODOLOGIA.....	33
3.1	Etapa 3: Inventário nas etapas de extração, fabricação/beneficiamento e transporte do agregado miúdo (areia industrial) e agregado graúdo (brita 00 e brita 01).....	365
3.2	Etapa 3: Inventário nas etapas de extração, classificação, armazenamento e transporte do agregado miúdo (areia natural).....	36
3.3	Etapa 3: Inventário nas etapas de beneficiamento da matéria-prima e transporte do cimento.....	37
3.4	Etapa 3: Inventário nas etapas de beneficiamento da matéria-prima e transporte do aço	38
3.5	Etapa 3: Inventário de formas de madeira.....	39
3.6	Etapa 4: Inventário na produção e transporte do concreto da central dosadora até a obra	39
3.7	Etapa 5: Inventário do concreto de 20 MPa e 35 MPa a partir da utilização do software SimaPro, com implementação dos dados de extração/produção das matérias-primas da região em estudo.....	40
3.8	Etapa 6: Otimização de elementos estruturais em concreto armado com ênfase na sustentabilidade ambiental e no custo.....	44
3.9	Etapa 7: Comparativo dos resultados obtidos neste estudo, com resultados de Santoro (2021).....	44
3.10	Etapa 8: Carbonatação da estrutura de concreto armado ao longo do ciclo de vida.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
4.1	Cálculo das emissões de CO ₂	46
4.1.1	Emissões de CO ₂ das matérias-primas componentes do concreto.....	46
4.1.2	Emissões de CO ₂ para a produção de um metro cúbico de concreto.....	50
4.1.3	Emissões de CO ₂ na produção do concreto e no transporte do concreto da central dosadora até a obra.....	57
4.1.4	Cálculo das emissões de CO ₂ do concreto a partir da utilização do software SimaPro.....	59
4.2	Comparativo dos resultados obtidos com os resultados do estudo de Santoro (2021)	60
4.3	Dimensionamento otimizado de elementos estruturais	69
4.3.1	Dimensionamento otimizado de pilares isolados de concreto armado.....	69

4.3.2	Otimização de vigas em concreto armado com ênfase na minimização dos impactos ambientais e dos custos	80
4.4	Cálculo da carbonatação dos elementos estruturais	85
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

1 INTRODUÇÃO

1.2 Considerações Iniciais

A produção, o consumo e o estilo de vida da população mundial são fortemente impactados pelo desenvolvimento econômico, crescimento populacional, urbanização e revolução tecnológica.

O setor da construção civil é o maior contribuinte para as emissões de CO₂, sendo responsável por cerca de 30% de todas as emissões de gases do efeito estufa do planeta. Além disso é encarregado por cerca de 40% do uso global dos recursos, incluindo 12% de toda a água doce. O concreto é um dos materiais de construção mais importantes do mundo e o segundo mais utilizado no planeta, depois da água. Assim, considerando o volume de concreto produzido e os impactos ambientais associados, o projeto otimizado de estruturas, se torna uma alternativa que pode contribuir para o desenvolvimento sustentável. As emissões de CO₂ da queima de combustíveis, produção de cimento e outros processos industriais, representam cerca de 70% do total das emissões globais de gases do efeito estufa (ROHDEN e GARCEZ, 2018).

A utilização de ferramentas de avaliação que levam em consideração a integração dos aspectos ambientais e econômicos para a seleção dos materiais e componentes, torna-se um meio importante para a maior sustentabilidade da execução das construções (SANTORO, 2015).

Para avaliar o impacto ambiental na construção civil, pode ser usada uma ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Vários impactos ambientais podem ser mensurados pela ACV: aquecimento global, destruição da camada de ozônio, eutrofização, esgotamento de recursos naturais, consumo de energia, uso do solo e água, entre outros. A metodologia da ACV é dividida em quatro principais etapas: objetivo e escopo, análise do inventário, avaliação, análise e melhorias (CABELLO *et al.*, 2017).

Nos últimos anos, o tema sustentabilidade e impacto ambiental na construção civil, vêm sendo estudado com maior intensidade, sendo o objetivo em comum das investigações para a diminuição das emissões de poluentes na atmosfera. As estruturas de concreto armado são os principais enfoques das pesquisas para a redução das emissões de CO₂ e o consumo de energia. Como exemplos de trabalhos nesta área pode-se citar Santoro (2015), Bento (2016), Rohden e Garcez (2018), Li *et al.* (2019), Al-Tamimi *et al.* (2014), Cabello *et al.* (2017), Stoiber *et al.* (2020), Yeo e Gabbai (2011) e Possan *et al.*, (2017).

Os potenciais impactos ambientais podem ser determinados de forma imprecisa com dados globais, podendo ter variações relacionadas a fatores, como localização e diferenças da matriz energética. Com isso, o presente estudo visa estudar o impacto ambiental (emissões de CO₂) ao longo do seu ciclo de vida na região de Chapecó – SC, causado pelo concreto armado, desde a extração das matérias-primas componentes do concreto, industrialização, transporte e destino final.

Os cálculos das emissões de CO₂ utilizam dados provenientes da literatura e de dados coletados em campo, nas indústrias pertencentes a cadeia produtiva do concreto. No decorrer do trabalho, foram feitas bem como descritas, comparações entre os resultados obtidos e resultados alcançados pelo trabalho de Santoro (2021) para a região de Passo Fundo – RS. Também, foram utilizados os dados de impacto ambiental, para dimensionamento de elementos estruturais otimizados, dando ênfase nas questões ambientais.

Por fim, considerando que a carbonatação do concreto pode ser benéfica por absorver CO₂ da atmosfera, serão apresentados resultados das análises com a consideração desse efeito.

1.2 Justificativa

As mudanças climáticas provocadas pela emissão de CO₂ geram preocupações da comunidade científica e da sociedade em geral, pela busca em conter o aumento gradativo dessas emissões. Um dos principais emissores de CO₂ no mundo é o concreto armado, e busca-se cada vez mais tornar as estruturas deste, resilientes aos aspectos climáticos e ambientais para abrandar os impactos ambientais, e encontrar soluções de construções sustentáveis, bem como o uso mais eficiente dos materiais de construção.

O conhecimento do ciclo de vida dos materiais utilizados na construção civil, desde sua extração, processamento, transporte e destino final, torna-se fundamental para que os projetistas realizem escolhas adequadas em relação ao impacto ambiental. Visando diminuir o consumo dos materiais, o uso da energia e o impacto ambiental, existem ferramentas disponíveis para o dimensionamento das estruturas de concreto armado, como a otimização geométrica dos elementos estruturais, considerando a propriedade dos materiais utilizados, através da qual se busca a melhor solução possível.

Estudos vem sendo desenvolvidos nos últimos anos com o intuito de avaliar e quantificar a carbonatação do concreto, sendo um importante sumidouro de dióxido de carbono, que não é considerado nos inventários de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Para Ekolu

(2020), a carbonatação do concreto é um processo natural reconhecido como aquele em que uma massa substancial de dióxido de carbono é consumida. Ao considerar importante a carbonatação nas estruturas de concreto armado, é necessário fazer a análise da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para estimar a durabilidade destas estruturas.

As emissões de CO₂ para a produção de concreto são variáveis de acordo com cada região, pois são inúmeros os fatores a serem considerados para quantificar as emissões de CO₂ do concreto armado, desde a extração da matéria-prima, a industrialização, as quais utilizam diferentes métodos, e também do transporte, que tem impacto a distância percorrida e o tipo de veículo utilizado. Este fator é essencial para a ACV de edificações em diferentes regiões, devendo ser considerado os dados de inventários regionais (SANTORO, 2015).

A presente dissertação dá continuidade aos estudos desenvolvidos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Passo Fundo, relativos à avaliação e minimização do impacto ambiental de estruturas em concreto armado, como o de Bordignon (2010), Medeiros (2012), Santoro (2015) e Santoro (2021).

No estudo de Bordignon (2010) é apresentado o desenvolvimento e implantação de uma formulação matemática para obtenção de seções ótimas de pilares em concreto armado, submetidos à flexocompressão reta, baseada na verificação da capacidade resistente conforme recomendações da NBR 6118, sendo considerada como variáveis discretas mediante as dimensões da seção de concreto, e a quantidade e o diâmetro das armaduras.

Em Medeiros (2012) é otimizado os custos monetários e ambientais das seções de pilares retangulares de concreto armado, submetidos à flexocompressão reta, utilizando o método de otimização da Busca Harmônica, além da consideração dos custos de aquisição dos materiais no processo de otimização estrutural. Foram efetuadas análises levando-se em consideração os custos ambientais de cada insumo, estimados a partir da Análise do Ciclo de Vida.

No estudo de Santoro (2015), é quantificado bem como avaliado as emissões de dióxido de carbono (CO₂), o consumo de energia elétrica, os impactos ambientais gerados quando advindos da extração e produção dos materiais (aglomerante, agregados graúdos, agregados miúdos e aço) que são utilizados na região norte do estado do Rio Grande do Sul, na produção de concreto armado. Em seguida foram medidos os mesmos impactos ambientais gerados no transporte destes materiais até o local de sua utilização a central dosadora de concreto, e na produção e transporte do concreto até a obra. Também foi realizado o dimensionamento

otimizado de vigas em concreto armado, considerando levando o custo e os impactos ambientais.

O estudo de Santoro (2021) é baseado no estudo de Santoro (2015) e visa a minimização de impactos ambientais e econômicos, para estruturas de concreto armado. São propostos quatro cenários de estudo onde considera-se a fronteira do estudo de berço ao portão, sendo três de emissões de CO₂ e um de custos. Através dos dados obtidos nos diferentes cenários, é realizado o dimensionamento otimizado das seções de pilares e vigas, para obtenção do melhor resultado para estas estruturas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar o impacto ambiental do concreto armado na cidade de Chapecó–SC, desde a extração do material até o destino final do concreto, fornecendo subsídios aos projetistas para minimizar tais impactos, através da análise otimizada de elementos estruturais.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Calcular as emissões de dióxido de carbono (CO₂) nas etapas de extração, produção e transporte dos materiais componentes do concreto;
- b) Calcular as emissões de dióxido de carbono (CO₂) na produção do concreto (usina de concreto) e o transporte do concreto até a obra (destino final);
- c) Otimizar elementos estruturais em concreto armado (pilares e vigas), com base nos dados obtidos, respeitando os limites mínimos das normas técnicas brasileiras com ênfase na viabilidade econômica e ambiental;
- d) Fazer a análise comparativa dos resultados deste estudo, com os dados do estudo de Santoro (2021);
- e) Avaliar a influência da carbonatação da estrutura de concreto armado ao longo do seu ciclo de vida, com relação aos impactos gerados.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Nas seções seguintes, serão apresentados os resultados da pesquisa da literatura que nortearam essa dissertação, com referencial para todos os assuntos abordados.

2.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta empregada para identificar os impactos ambientais de um produto, serviço ou processo, ao longo do seu ciclo de vida. O conjunto de normas ABNT NBR ISO 14040 apresentam uma estrutura metodológica para a análise e avaliação dos efeitos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto.

Vários tipos de impactos ambientais podem ser estimados pela ACV: o aquecimento global, a destruição da camada de ozônio, a eutrofização, a acidificação, a toxicidade para humanos e ecossistemas, o esgotamento de recursos naturais, o consumo de energia, o uso do solo e água, entre outros. O desempenho da ACV, depende das informações a serem utilizadas e da qualidade dessas informações, bem como, do conhecimento da tecnologia empregadas, dados locais, e possíveis simplificações ou abordagens semelhantes (CABELLO, *et al.*, 2017).

Para Ventura (2012), uma das particularidades da ACV como um campo de pesquisa, é a forte relação entre revisões, normas e regulamentações. Isso deve-se devido a história do método, antes de se tornar um domínio de investigação completa, o qual foi introduzido pela primeira vez e utilizado por indústrias. Assim, o método foi então padronizado em cooperação com pesquisadores e as normas, fornecendo princípios básicos, o que tem levado aos muitos novos desenvolvimentos da investigação. Isto é, de fato, realmente original em muitos outros domínios científicos e as normas são muitas vezes posteriores aos avanços científicos. Outra particularidade da ACV é sua característica de interdisciplinaridade.

Segundo Guinée (2016), os primeiros estudos dos impactos ambientais de produtos de consumo, datados do final dos anos 1966, e com início nos anos 1970, especialmente em um contexto comparativo (“o produto A é melhor que o produto B”), gerando assim debates longos e acirrados. Um período em que questões ambientais com eficiência de recursos e energia, controle de poluição e resíduos sólidos se tornaram questões de grande interesse público.

Ainda Guinée (2016) relata que um dos primeiros estudos quantificando os requisitos de recursos, cargas de emissões e fluxo de resíduos de diferentes recipientes de bebidas, foi conduzido por Midwest Research Institute (MRI) para a Coca Cola Company em 1969. Um

acompanhamento deste estudo, foi conduzido pelo mesmo instituto da agência de proteção ambiental dos Estados Unidos em 1974, e um estudo semelhante conduzido por Basler e Hofman, neste mesmo ano, na Suíça marcou, o início do desenvolvimento da ACV, como é conhecido atualmente.

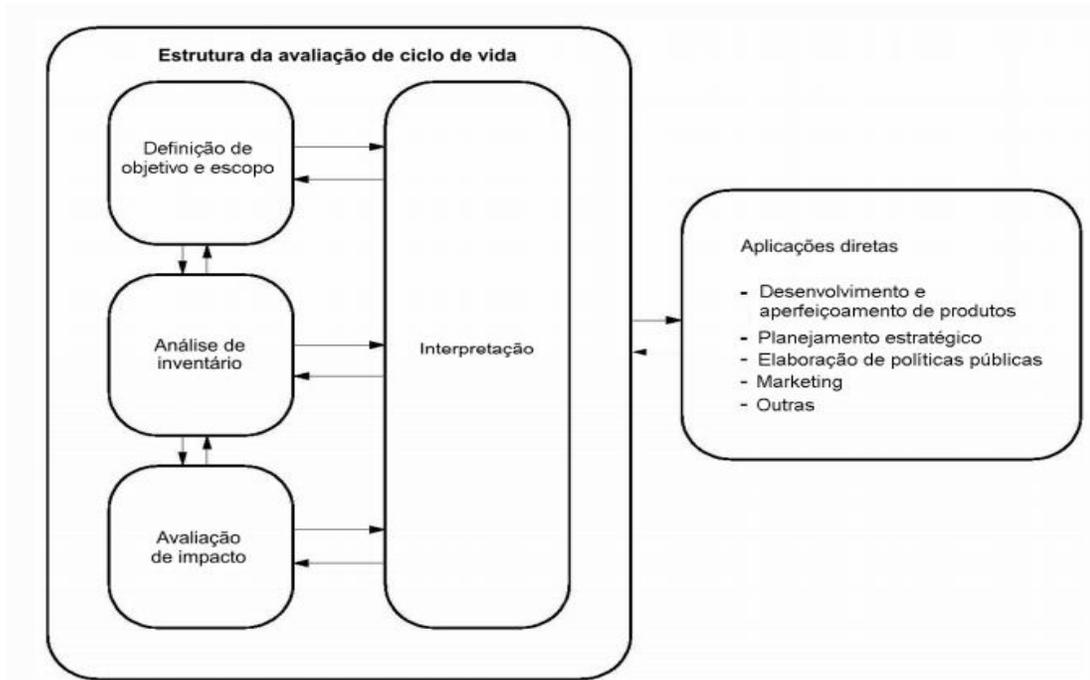
Com o início da concepção do termo da ACV, surgiram abordagens, terminologias e resultados divergentes, pois não se encontrava uma plataforma específica científica, portanto, as análises iniciais foram realizadas considerando técnicas diferentes sem um referencial comum. Os resultados obtidos diferenciavam-se, mesmo quando os objetivos do estudo eram os mesmos (GUINÉE, 2016).

A ACV é normalizada por um conjunto de normas da série ISO 14040. No Brasil, a ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2014) Avaliação do Ciclo de Vida e estabelece os princípios e estrutura, a ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2014) - A Avaliação do Ciclo de Vida determina os requisitos e orientações. No plano internacional, as normas citadas, são acrescentadas a ISO/TR 14047 (ISO/T,2002) que consideram o formato de apresentação de dados, e finalmente a ISO/TR 14049 (ISO/TR, 2000), que fornece exemplos de aplicação, especialmente mediante a definição de objetivos.

A ABNT NBR ISO 14040 (2014) lista algumas características chave da metodologia da ACV, sendo importante que os estudos da ACV abordem sistematicamente e adequadamente os aspectos ambientais de sistemas de produto, desde a aquisição da matéria-prima até a disposição final. Dependendo da definição do escopo e o grau de detalhe, o período de tempo pode variar em larga escala. Convém que o escopo, as suposições, a discussão de qualidade dos dados, as metodologias e a saída de estudos de ACV, sejam de fato transparentes, e que os estudos da ACV discutam e documentem as fontes de dados e que seja clara, permitindo assim, novas tecnologias e melhorias no estado-da-arte da tecnologia, não existindo um único método para conduzir estudos da ACV, e é necessário que as organizações tenham flexibilidade para implementar a ACV com base na aplicação específica e nos requisitos dos usuários.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) inclui a definição do objeto e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados (ABNT NBR ISO 14040, 2014), conforme ilustrado na figura 1.

Figura 1 – Fases de uma ACV

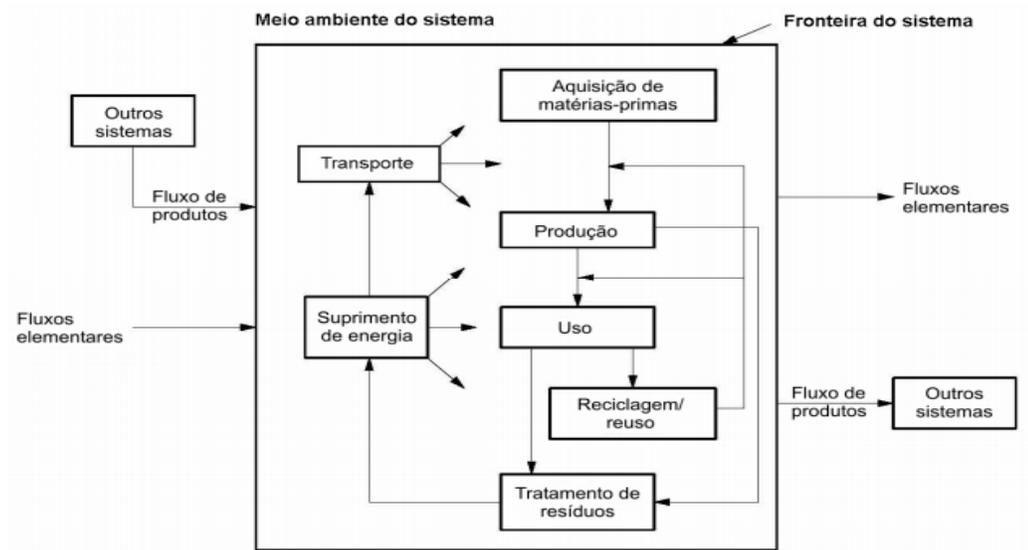


Fonte: ABNT NBR ISO 14040, 2014

A ACV modela o ciclo de vida de um objeto por meio do seu sistema de produto desempenhando uma ou mais funções definidas. A propriedade essencial de um sistema de produto é caracterizada pela sua função, e não necessariamente precisa ser definida em termos de produtos finais, conforme ilustrado na figura 2.

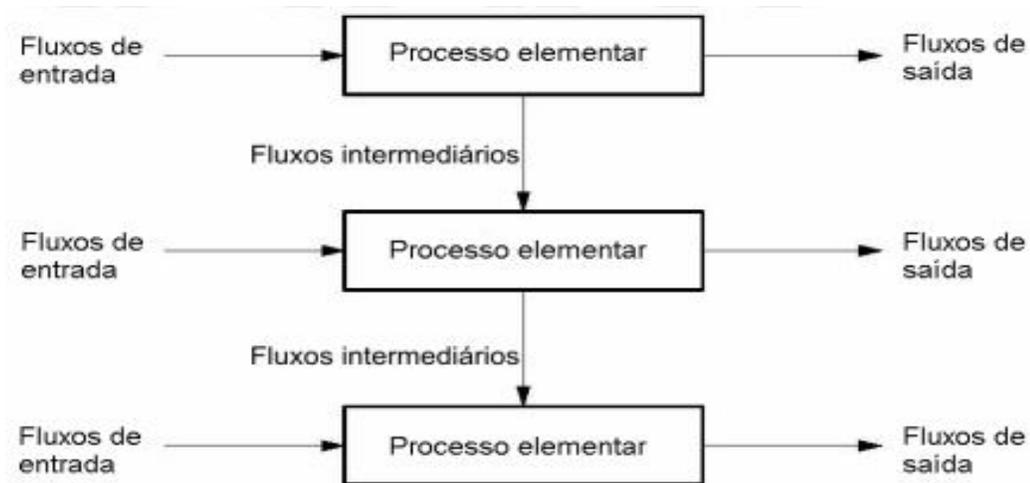
Sistemas de produtos também podem ser compostos por processos elementares, no geral estão ligados uns aos outros, por fluxos de produtos e ao meio ambiente, por fluxos elementares conforme mostra a figura 3. A subdivisão de um sistema de produto nos processos elementares que o compõem, facilita a identificação das entradas e saídas do sistema do produto (ABNT NBR ISO 14040, 2014).

Figura 2 – Exemplo de um sistema de produto para ACV.



Fonte: ABNT NBR ISO 14040, 2014

Figura 3 – Exemplo de um conjunto de processos elementares dentro de um sistema de produto



Fonte: ABNT NBR ISO 14040, 2014

2.1.1 Definição do objetivo e escopo

A definição dos objetivos e escopo, é o momento em que é determinada a fronteira do estudo (temporal e geográfica) e a quem destinam-se os resultados, os critérios de qualidade dos dados, as regras de corte, e as categorias de impacto a serem consideradas. A definição do

objetivo é a primeira fase de uma AC, e na fase de definição do escopo, o objetivo da ACV deve ser identificado e definido em detalhes.

Para Bento (2016) a definição do escopo é uma etapa importante na ACV e serve para especificar quais unidades de processos serão avaliados bem como qual será a unidade funcional. A função e a unidade funcional, são elementos centrais de uma ACV, sem eles o significado e a validade de comparação, especialmente de produtos não é possível.

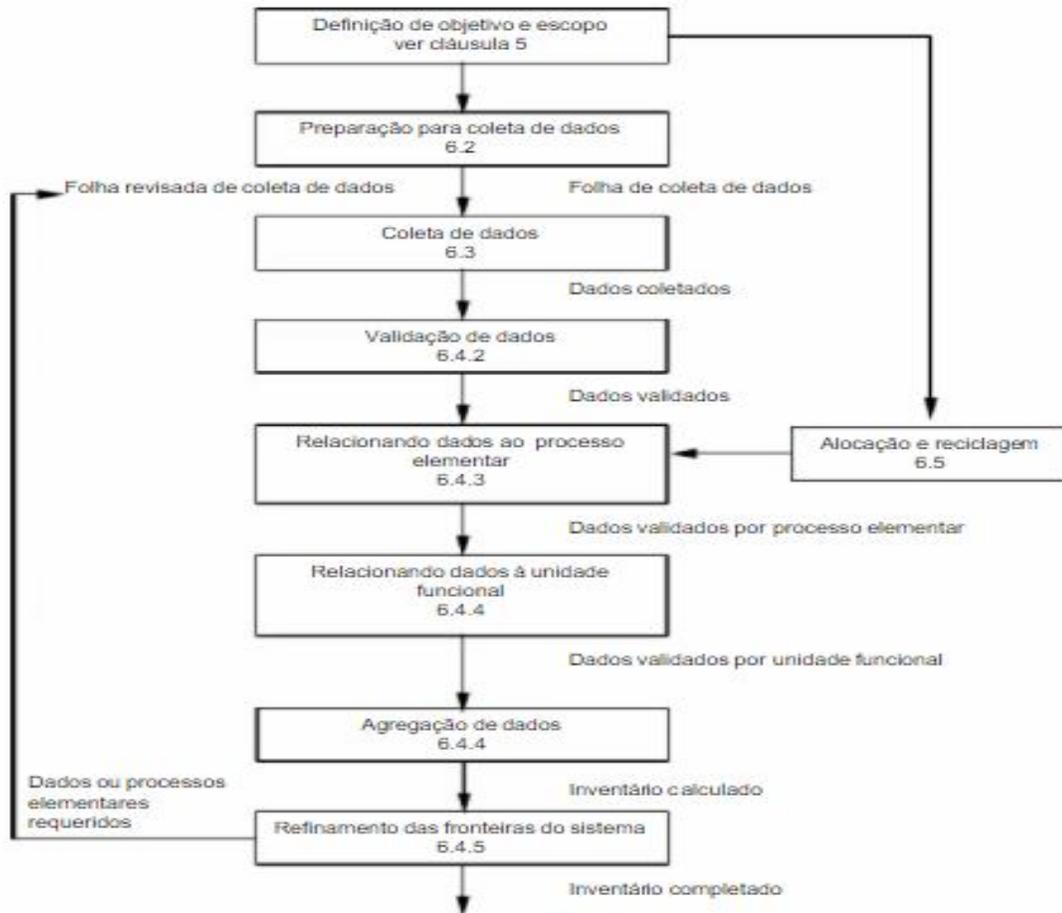
Uma ACV é embasada em uma precisa descrição quantitativa da função fornecida do sistema analisado. Isto é geralmente feito com o uso de uma unidade funcional que nomeia e quantifica os aspectos qualitativos e quantitativos da função. Logo, na definição do escopo, uma significação importante deve ser tomada quanto aos princípios de modelagem e métodos de aproximação de uma ACV: um modelo atribucional ou consequencial e a alocação ou expansão do sistema/aproximação de substituição. Isto terá implicações em muitas das outras escolhas posteriores, incluindo quais dados de inventário deverão ser coletados ou obtidos (BENTO, 2016).

2.1.2 Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

A análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculos para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto. A condução de uma análise de ICV, é um processo iterativo, à medida que dados são coletados e se amplia o conhecimento sobre o sistema, novos requisitos ou limitações dos dados podem ser identificadas, requerendo mudanças nos procedimentos de coleta de dados, de modo que, os objetivos do estudo possam ainda ser satisfeitos. Muitas vezes, podem ser identificadas condições que requeiram revisões do objetivo ou do escopo do estudo. (ABNT NBR ISO 14040, 2014).

Para a criação do ICV é recomendado a realização das etapas operacionais, conforme a figura 4.

Figura 4 – Procedimentos simplificados para análise de inventário.



Fonte: ABNT NBR ISO 14041, 2004

Para Passuello *et al.* (2014), a etapa de coleta de dados demanda diversos recursos, necessitando que aplicações de restrições, sejam consideradas no escopo e também documentadas no relatório de estudo. Já na etapa de cálculo, é preciso incluir os procedimentos de validação dos dados reunidos, a correlação dos dados aos processos elementares e a correlação dos dados aos fluxos de referências e a unidade funcional.

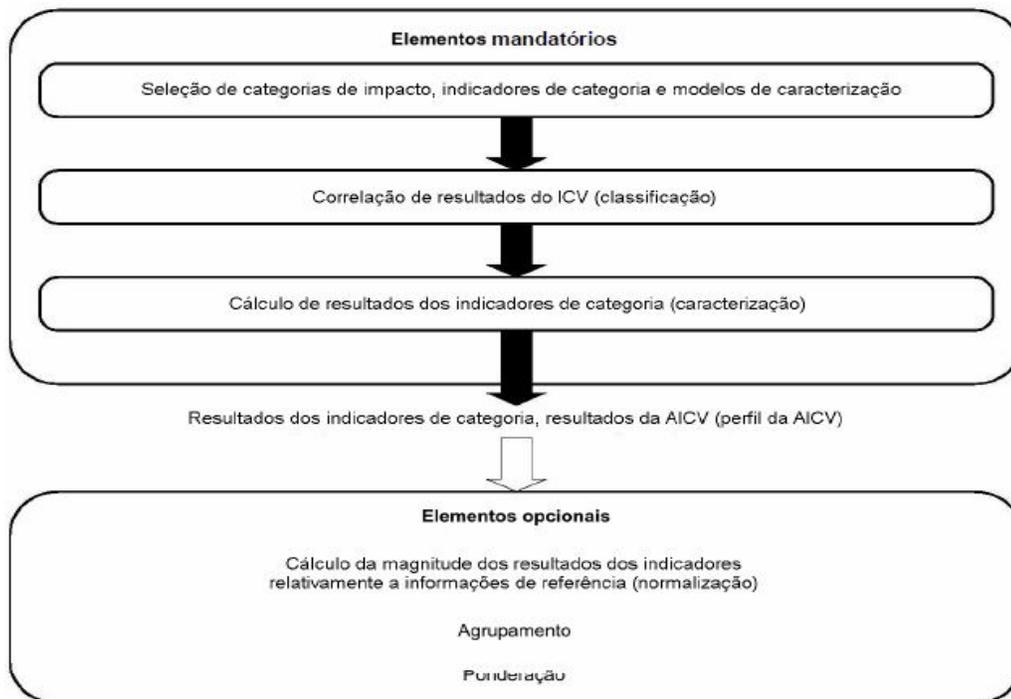
O resultado dessa etapa, é a quantificação de todos os recursos utilizados e das emissões associadas à produção de determinada quantidade (unidade funcional) do produto em estudo. A qualidade dos componentes interage em um caminho multiplicativo e que, tipicamente, a qualidade mais pobre dos componentes afeta a qualidade dos dados seguintes (BENTO, 2016).

2.1.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A fase de avaliação de impacto da ACV tem como objetivo estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, utilizando os resultados do ICV. Esse processo envolve associar dados de inventário com categorias de impacto específicas e indicadores de categoria, tentando entender mais impactos. A AICV inclui o processo iterativo de análise crítica do objetivo e escopo do estudo de ACV, para determinar se os objetivos do estudo foram atingidos, ou para modificar o objetivo e escopo, se caso a avaliação indicar que eles não podem ser alcançados. Questões como escolha, modelagem e avaliação de categorias de impacto, podem introduzir subjetividades na fase de AICV (ABNT NBR ISO 14040, 2014).

A AICV é constituída de três etapas obrigatórias, conforme apresentado na figura 5: 1) Seleção das categorias de impacto, indicadores e modelos de caracterização; 2) Correlação dos resultados do ICV às categorias de impacto (classificação); 3) Cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização).

Figura 5 – Elementos da fase de AICV.



Fonte: ABNT NBR ISO 14040, 2014

A primeira etapa da AICV, consiste na seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização, devendo ser justificada, e consiste com o objetivo do estudo. Não obstante, a seleção das categorias de impacto deve refletir um conjunto abrangente da problemática ambiental, tanto o mecanismo ambiental quanto os modelos de caracterização devem ser descritos (PAVAN, 2019).

Estes modelos descrevem a relação entre os resultados ICV, e os indicadores de categoria, sendo através deles, calculados os fatores de caracterização. Na fase de classificação é feita a correlação dos resultados do ICV às categorias selecionadas, devendo ser considerada a identificação dos resultados do ICV, que se correlacionam a mais de uma categoria de impacto, incluindo distinção entre mecanismos paralelos, correlação a mecanismos seriais, a fim de não haver dupla contagem (PAVAN, 2019).

Na terceira etapa (etapa de caracterização), Pavan (2019) descreve que o cálculo dos resultados dos indicadores dá-se pela conversão dos resultados em unidades comuns e agregação em uma mesma categoria de impacto. Este processo de conversão, faz uso de fatores de caracterização e seu resultado é um valor numérico do indicador. As duas principais abordagens de modelagem de impacto são a *midpoint* e a *endpoint*.

Na abordagem *midpoint* a caracterização usa indicadores localizados ao longo do mecanismo ambiental (pontos intermediários) com resultados em geral mais precisos comparados com a modelagem *endpoint*, na qual a caracterização considera todo o mecanismo ambiental até seu ponto final. A abordagem *endpoint* refere-se a um dano específico, relacionado com uma área mais ampla de produção que pode ser saúde humana, ambiente natural ou recursos naturais.

A ABNT NBR ISO 14044 (2014) descreve que as técnicas e informações adicionais, podem ser necessárias para compreender melhor a significância, incerteza e sensibilidade dos resultados da AICV, de modo a ajudar a distinguir as diferenças expressivas a modo de estar ou não presentes, identificando os resultados não significativos do ICV e/ou orientar o processo iterativo da AICV.

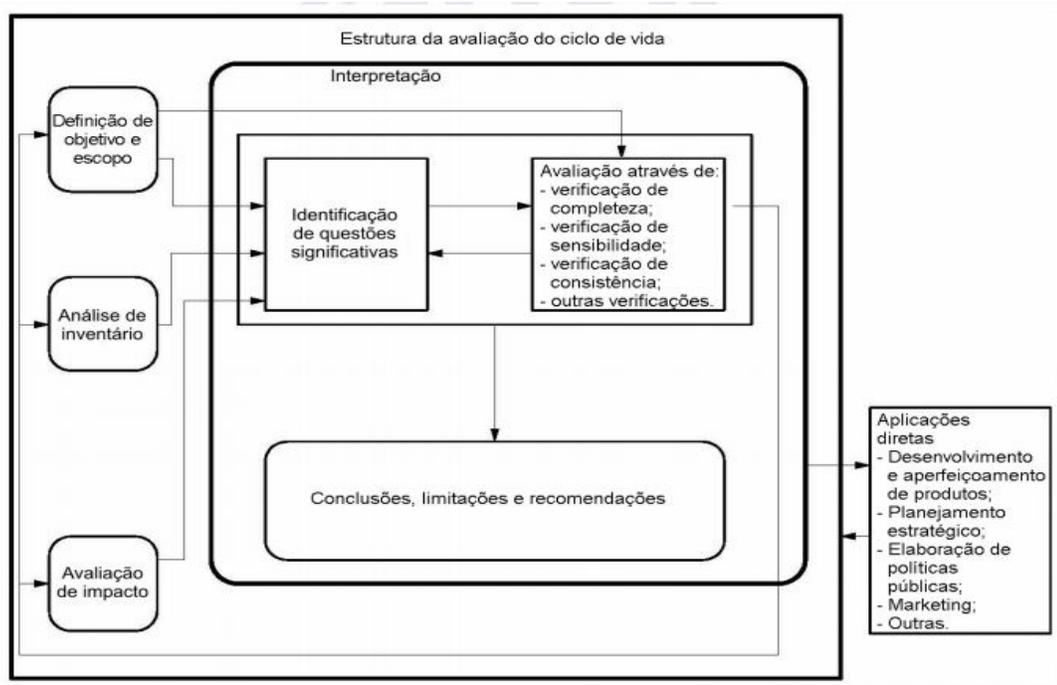
2.1.4 Interpretação do ciclo de vida

A interpretação é a fase da ACV em que as constatações da análise de inventário e da avaliação de impacto, são consideradas em conjunto, sendo nos estudos de ICV avaliadas somente as conclusões da análise de inventário. Convém que a fase de interpretação da ACV

forneça resultados que sejam consistentes com o objetivo e escopo, definidos e que levem conclusões, expliquem limitações e provejam recomendações. Também convém que, a interpretação reflita o fato de que, os resultados de AICV são baseados em uma abordagem relativa, que indica efeitos ambientais potenciais e que não preveem impactos reais sobre os pontos finais de categoria, a extrapolação de limites, margens de segurança ou riscos (ABNT NBR ISO 14040, 2014).

A fase de interpretação do ciclo de vida de um estudo de ACV e o relacionamento desta com outras fases da ACV, estão representados na figura 6.

Figura 6 – Relacionamento dos elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV.



Fonte: ABNT NBR ISO 14040, 2014

A ABNT NBR ISO 14044 (2014) recomenda que a interpretação deve incluir uma avaliação e uma verificação de sensibilidade em relação as entradas, saídas e escolhas metodológicas significativas, visando ao entendimento das incertezas dos resultados.

2.2 Avaliação do Ciclo de Vida na construção civil

A crise climática vem gerando mudanças rápidas e substanciais em muitos setores. O ambiente construído se destaca, pois contribui com aproximadamente 40% das emissões globais de gases de efeito estufa, possuindo grande capacidade de melhoria (Roberts *et al.*, 2020).

Cada vez mais, atenção tem sido dada, aos impactos ambientais atribuídos ao ambiente construído nos anos, e isto ocorre tanto da forma da pesquisa acadêmica, quanto da iniciativa da indústria da construção civil. Em ambientes acadêmicos, os pesquisadores Zeng e Chini (2017) destacam que o número anual de publicações focadas em edifícios sustentáveis aumentou de 4, em 2005 para 76, em 2015.

Para Hasik *et al.* (2019), as Avaliações do Ciclo de Vida dos edifícios, revelam que o potencial de aquecimento global associado a energia usada para operar um edifício, é responsável pela maioria dos impactos ambientais totais.

A ACV é considerada uma metodologia confiável para a avaliação do desempenho ambiental das edificações, pois devido à complexidade dos edifícios como sistemas compostos de vários componentes que interagem, os métodos de simplificação e adaptação da ACV para o setor da construção civil, poderiam sofrer melhoramentos como, por exemplo, com o uso de valores padronizados, a descrição simplificada do edifício, a unidade funcional, os limites do sistema e as regras de corte (CHEVALIER e PEUPORTIER, 2012).

Navarro e Yepes (2019) destacam a importância dos impactos ambientais que serão considerados na análise do ciclo de vida das edificações, e estes, sejam definidos nas etapas iniciais de projeto, além de definir também, como esses impactos serão avaliados. Para a análise do impacto ambiental, considera-se a metodologia padronizada ISO para permitir uma avaliação rigorosa de diferentes alternativas. Embora esse padrão ISO ainda não exista para o ramo econômico, o custo do ciclo de vida é um campo bastante desenvolvido. No entanto, a avaliação da dimensão social da sustentabilidade, ainda está em desenvolvimento.

Ainda há dúvidas sobre a elaboração de inventários de ciclo de vida e, particularmente, a lista mínima de substâncias necessárias para avaliação de impactos adequados, no que diz respeito às emissões em ambientes internos, a qualidade dos dados disponíveis e o uso de dados Europeus, nacionais ou locais (BENTO, 2016).

Nos últimos anos, vários estudos foram desenvolvidos com ênfase na Avaliação do Ciclo de Vida das edificações, contemplando desde os processos de extrações das matérias-primas

até o descarte final da demolição da edificação. Os estudos visam pela busca por materiais alternativos, e de menor geração de poluentes para a construção de edifícios sustentáveis ambientalmente.

Como exemplos, a busca por soluções viáveis econômicas, técnicas e ambientais para a fabricação de concreto, estão o estudo desenvolvido por Rajan *et al.* (2020), que investiga a adição de resíduos de borracha de pneus tratados por natureza para a substituição parcial do agregado fino. O estudo de Verma *et al.* (2020) busca soluções eficientes na utilização da sílica ativa e pó de pedra em substituição parcial ao cimento e ao agregado fino, o estudo de Joanna *et al.* (2020), que utiliza cinzas volantes para substituir o cimento na fabricação do concreto, e o estudo de Majhi e Nayak (2019) que utiliza escória de alto-forno de alto volume agregado e reciclado com ativador de cal, em substituição parcial ou total do agregado natural.

2.2.1 Cimento

O cimento é um dos materiais de construção mais importantes comercializados a nível mundial, sendo essencial na construção e manutenção de edifícios e infraestruturas. O cimento é um produto intensivo em energia, carbono e materiais, sendo responsável por 5% a 7% das emissões globais de CO₂ e por 12% a 15% do total de energia consumida na indústria em todo o mundo. Além disso, a produção de cimento, está projetada para aumentar anualmente em 0,8% a 1,2%. Emissões de CO₂, o principal ator das mudanças climáticas, é um dos principais fios da atualidade (GUTIERREZ *et al.*, 2017).

As mudanças climáticas e o aquecimento global, aumentaram a consciência pública sobre o impacto ambiental da indústria do cimento, e levaram a introdução de legislações e incentivos para regular e reduzir as emissões de gases do efeito estufa. Além disso, a produção de cimento causa outros impactos ambientais, as demais emissões de gases de efeito estufa (por exemplo, emissões gasosas impactando o potencial de acidificação ou toxicidade humana, entre outros). Duas abordagens gerais podem ser identificadas para reduzir o impacto ambiental dos cimentos: 1) ao nível de fábrica (fase de produção), para reduzir as emissões específicas da produção do cimento; 2) nos canteiros de obras (fase de consumo), para reduzir o consumo. O cimento Portland é responsável por 74% a 81% das emissões de CO₂ da produção de concreto e contribui para a maioria dos impactos ambientais (GUTIERREZ *et al.*, 2017).

No ciclo de vida do cimento, 95% do total de CO₂ emitido advém da etapa de produção, sendo que quase toda a emissão na indústria cimenteira se concentra na produção de clínquer.

Durante o processo de produção do cimento, metade do CO₂ emitido refere-se à calcinação da rocha calcária (descarbonatação), enquanto que a parte restante, é decorrente da queima de combustíveis para a geração de energia, no processo de clinquerização (FELIX e POSSAN, 2018).

Comprometida com as necessidades ambientais, a indústria cimenteira brasileira, tem investido na redução das emissões de gases de efeito estufa, principalmente em CO₂, e no desempenho energético do processo produtivo. A indústria cimenteira, gera para cada tonelada de cimento produzida, entre 0,7 e 1,0 tonelada de CO₂. Porém, a produção de cimento com adição de materiais, como escória de alto-forno, cinza volante, materiais pozolâmicos e calcário, corrobora com a redução das emissões de CO₂ (CARVALHO *et al.*, 2018).

A produção anual de concreto no mundo é elevada, e estima-se que, a produção média de concreto por humano a cada ano, seja em torno de uma tonelada. O cimento é um dos principais componentes do concreto e cerca de 10% a 12% do volume de concreto é composto por cimento. O aumento da demanda por cimento nos últimos anos tem levado ao aumento da produção, sendo uma tendência de elevação observada diariamente. A produção global anual de cimento, é superior a 4 milhões de toneladas métricas. A China vem a ser a maior produtora de cimento do mundo, com produção superior a 50% da produção global, e em segundo lugar está a Índia com 6,5% da produção global de cimento (NIDHEESH e KUMAR, 2019).

Os principais impactos ambientais da produção de cimento são relacionados as seguintes categorias (KARSTENSEN, 2016).

- a) Emissões de material particulado de chaminés e poeiras fugitivas;
- b) Emissões atmosféricas dos gases NO_x, SO₂, CO₂, compostos orgânicos voláteis (VOCs) e outros;
- c) Outras emissões como ruído e vibrações, odores, água de processo, geração de resíduos, etc;
- d) Consumo de recursos naturais como energia e matéria-prima.

2.2.2 Aço

Para Vogele *et al.*, (2020), o setor de ferro e aço são relevantes para a economia global no que diz respeito ao emprego e ao crescimento econômico, pois em todo o mundo, mais de 6 milhões de empregos estão direta ou indiretamente ligados ao setor de siderúrgico. Com uma participação de 17% no consumo de energia do setor industrial, “siderurgia” pertence aos

setores com maior relevância, no que diz respeito às medidas de redução de consumo de energia.

Visto que, principalmente o carvão, é usado como portador de energia, este setor contribui com cerca de 27% para as emissões industriais globais de CO₂. O futuro da indústria siderúrgica é moldado por desenvolvimento nos níveis tecnológicos, econômico, ambiental e social. A União Europeia é o segundo maior produtor de aço do mundo, depois da China, responsável por quase 11% da produção mundial de aço (VOGELE *et al.*, 2020).

Emissões de gases e consumos de energia são as principais preocupações ambientais com a produção. A emissão de dióxido de carbono (CO₂) da indústria siderúrgica é de 997 Kg por tonelada de aço, e é responsável por 4 a 5% das emissões globais de dióxido de carbono. Mais de 60% da emissão total de dióxido de carbono da indústria siderúrgica, ocorre principalmente antes da fabricação do aço, sendo que a emissão de dióxido de carbono durante a produção do aço depende dos processos, e já a segregação para a sucata de aço, tem emissão mínima de dióxido de carbono em comparação com outros processos produtivos. Mas essa rota é limitada devido a menor disponibilidade de sucata de aço. Assim a produção de ferro em alto-forno é responsável pela maior parte das emissões de dióxido de carbono na indústria siderúrgica, Brasil, Japão, Coreia, Índia, Rússia, Índia, União Europeia, Ucrânia e os Estados Unidos, são responsáveis por mais de 90% das emissões de dióxido de carbono relacionados a indústria siderúrgica (NIDHEESH e KUMAR, 2019).

A aplicação de novos tipos de aços, como aços avançados de alta resistência e aços ultra alta resistência, auxiliam na capacidade de redução do consumo na construção civil. A aplicação de aço de alta resistência, em vez de aço convencional, reduz a emissão de CO₂ durante o ciclo de vida do aço em 156 milhões de toneladas (NIDHEESH e KUMAR, 2019).

Os impactos ambientais causados por todo o processo de industrialização e consumo do aço, vão desde a extração do minério de ferro, causando destruição de florestas e erosões, modificação do ambiente ao entorno da mina, até a grande quantidade de energia consumida e as emissões para a atmosfera.

2.2.3 Agregados miúdo e graúdo

Os agregados (agregado miúdo e agregado graúdo) utilizados na construção civil, são os minerais mais consumidos do mundo. Os agregados ainda apresentam custos relativamente baixos e são em geral inertes, não entram em reação química com a água, como acontece com o cimento, por exemplo. Estes, representam em média 2% do custo global de uma construção, e 60% do seu volume. O consumo per capita de agregados para a construção civil (areia e brita) no Brasil, se mantém estável, em torno de 2 (duas) toneladas per capita ao ano. O volume ainda é reduzido se comparado com os países Europeus mais desenvolvidos, e com os Estados Unidos (ALMEIDA e LUZ, 2012)

O concreto convencional contém tipicamente ao redor de 80% de agregados em massa. Globalmente, para a confecção de concreto, são consumidos areia e brita à taxa de 10 a 11 bilhões de toneladas a cada ano. A extração, o processamento e as operações de transporte envolvendo grandes quantidades de agregados, consomem consideráveis quantidades de efeitos desfavoráveis ao ambiente de áreas florestais e assim, leitos de rios, são uma consequência imediata (MEHTA, 2001 APUD BENTO, 2016).

Os impactos ambientais causados pela extração mineral de agregados, são as alterações da paisagem, supressão da vegetação (principalmente da mata ciliar), alteração na calha dos cursos de água, instabilidade de margens e taludes, turbidez da água, lançamentos de efluentes, consumo de energia e emissão de dióxido de carbono (CO₂), principalmente no transporte dos agregados (OLIVEIRA, 2007).

2.2.4 Forma de madeira

A forma de madeira é o molde provisório, a qual, serve para dar a geometria e a textura desejada ao concreto fresco. As formas de madeira necessitam de cimbramento, que é o conjunto de todos os elementos que servem para sustentar o concreto fresco, até que o mesmo, atinja a resistência suficiente aos esforços que lhe são submetidos.

No Brasil, as formas de madeira são normatizadas pela NBR 15696 (ABNT, 2009) Formas e Escoramentos para Estruturas de Concreto – Projeto, Dimensionamento e Procedimentos Executivos, e essa, define as formas como sendo estruturas provisórias, que servem para moldar o concreto fresco, resistindo a todas as ações provenientes das cargas

variáveis resultantes das pressões de lançamento do concreto fresco, até que o mesmo se torne autoportante.

O processo produtivo da madeira é constituído por quatro etapas: extração das árvores, transporte entre floresta e serraria, processamento das toras em produtos serrados e transporte da madeira serrada ao mercado consumidor. Quanto à fabricação da madeira compensada, utilizada em formas, primeiramente, as toras são descartadas e condicionadas em tanques contendo vapor ou água quente para amolecimento, em seguida, são obtidas as lâminas por meio de um torno rotativo (MACIEL, 2016).

A análise da procedência de produtos de madeira, é fundamental para as avaliações de sustentabilidade ambiental. No Brasil, visto que não é verificada a disponibilidade de madeira certificada para a construção civil, considera-se que não existe uma fonte de dados segura em relação a extração/produção destas para forma e cimbramento. O único fator disponível que pode ser levado em consideração quanto a magnitude dos impactos da utilização, é o transporte da madeira até o local da confecção das formas, e também, o impacto que este causa ao meio ambiente (OLIVEIRA, 2007).

Peso, distância, tipo de veículo e fator de emissão de CO₂, determinam a intensidade do impacto no transporte da madeira, porém apresentam incertezas com impactos significativos no total das emissões (CAMPOS, 2012).

Os principais impactos ambientais causados pelas extrações da madeira são a destruição de florestas nativas e suas áreas verdes, as quais contribuem para o aumento da poluição atmosférica e assim acabam estimulando problemas futuros para a sociedade, como alagamentos e enchentes, poluição do ar, etc.

2.3 Otimização de elementos estruturais em concreto armado

A otimização pode ser definida como encontrar a solução do problema em que é necessário maximizar ou minimizar uma função real, dentro de um domínio que contenha os valores aceitáveis de variáveis, enquanto algumas restrições devem ser satisfeitas (TOGAN, 2012).

Para Santoro (2021) as aplicações dos métodos de otimização, exemplificam-se na busca de redução de peso ou custo de uma estrutura, no aumento da eficiência de elementos estruturais, na redução de perdas no processo, na determinação da melhor rota para o transporte de passageiros ou cargas, na determinação da melhor mistura de componentes, sempre

buscando melhor custo ou maior eficiência, no aumento da produtividade em processos de fabricação e no aumento da eficiência na alocação de recursos.

Um problema de otimização, de forma genérica pode ser expresso da seguinte forma:

$$\text{Minimizar} \quad f(x_i) \quad i = 1 \dots n \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a} \quad g_j(x_i) \leq 0 \quad j = 1 \dots m \quad (2)$$

$$h_{kl}(x_i) = 0 \quad k = 1 \dots l \quad (3)$$

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

Onde f é a função objetivo e $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ é o vetor das variáveis de projeto, sendo as demais funções as de restrições do problema matemático. As restrições do problema matemático podem ser de desigualdade, igualdade, laterais ou canalizadas. A função objetiva e a função de restrição podem ser lineares ou não lineares, e todas as funções do problema matemático podem ser desenvolvidas analiticamente ou numericamente, e também podem conter variáveis de projeto de forma explícita ou não explícita.

A utilização de estratégias de otimização no desenvolvimento de projetos estruturais, além de ganhos econômicos, pode reduzir o consumo de materiais, cuja extração, fabricação e transporte, causam grandes danos ambientais, como ocorre com insumos de concreto armado. Na otimização de elementos estruturais, podem ser considerados como variáveis, as dimensões da seção do concreto, a área de aço e a resistência do concreto, sempre respeitando os limites últimos e de serviço da Norma Brasileira ABNT NBR 6118: 2014 (MEDEIROS e KRIPKA, 2014).

Para Penadés-Plà *et al.* (2019) o método de otimização depende do tipo de algoritmo utilizado, o qual estipula critérios a serem seguidos para a solução de problemas operacionais. Os algoritmos podem ser classificados em determinísticos e heurísticos, sendo que a diferença é que os determinísticos chegam ao resultado ótimo, usando técnicas de programação matemática, e os métodos heurísticos foram desenvolvidos para resolver problemas complexos de otimização estrutural de variáveis contínuas e discretas. Esses algoritmos heurísticos tradicionais, conseguem bons resultados mesmo sem garantir o ótimo global. Já os algoritmos metaheurísticos, possuem ferramentas para evitar ótimos locais, tendo por finalidade encontrar uma solução melhor.

Ainda sobre os métodos de otimização, Medeiros e Kripka (2012) destacam que os métodos clássicos de programação matemática possuem um desempenho satisfatório frente a

exemplos clássicos e triviais de otimização em estruturas, entretanto, a utilização dos mesmos em situações reais e de maior complexidade, devido ao grande número de variáveis envolvidas, e ao próprio comportamento das funções, torna-se ineficiente.

Para atender estas lacunas, as técnicas heurísticas de otimização que, a partir de fenômenos naturais, propõe modelos probabilísticos para encontrar a solução ótima de uma função. Esses métodos não fornecem garantias de que a solução obtida é a melhor possível entre as existentes, porém, convergem rapidamente para uma solução muito próxima ao ótimo global. Na área da otimização estrutural, utilizam-se diversos métodos de otimização, dentre os quais destacam-se: Método do Recozimento Simulado, Busca Tabu, Algoritmos Genéricos, Colônia de Formigas, Colônia de Abelhas, Enxame de Partículas e Busca Harmônica (MEDEIROS e KRIPKA, 2012).

2.4 Carbonatação das estruturas de concreto armado

A carbonatação do concreto ocorre devido ao ingresso de CO₂ atmosférico no concreto, sendo os principais fatores que influenciam o processo de carbonatação, a umidade relativa, tipo de cimento, quantidade de cimento do traço de concreto, cura, concentração de CO₂, temperatura, qualidade e tipo de concreto, abrigo e chuva (EKOLU, 2016).

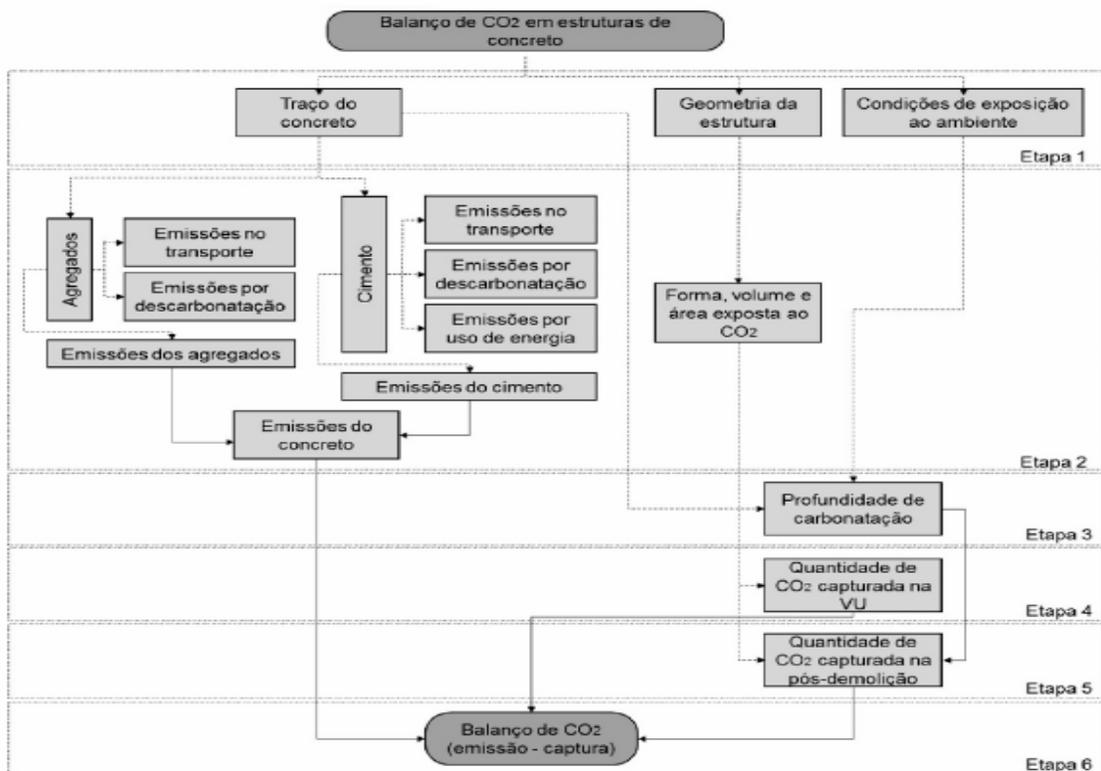
Segundo Possan *et al.* (2017) o concreto tem a propriedade de absorver CO₂ do meio ambiente por meio da carbonatação, fazendo uma espécie de compensação por meio da captura do gás. Quase todos os materiais à base de cimento sofrem uma certa medida de reação de carbonatação durante sua vida útil, e isso acontece devido a presença de dióxido de carbono na atmosfera terrestre. Esse processo começa na construção, passando pelo ciclo de vida da estrutura e continua durante o processo de demolição.

Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas para estimar a quantidade de gás carbônico reabsorvida pelo concreto, cujas respostas apontam para resultados diversos. Na Noruega a pesquisa realizada por Jacobsen e Jahren (2002) estima-se que 11% das emissões de CO₂ na produção de concreto são reabsorvidas pelo concreto, devido a carbonatação durante seu ciclo de vida. Já a pesquisa de Gajda (2000), relata 7,6%. Na Dinamarca, em estudo desenvolvido por Pade e Guimarães (2007), estima-se para 100 anos de perspectiva, considerando a demolição de uma estrutura, a absorção do concreto carbonatado que corresponde a 57% das emissões de CO₂ na produção de concreto, se a demolição da estrutura não for considerada, esse valor é reduzido para 24%. Em um estudo semelhante realizada nos Estados Unidos,

Haselbach e Thomas (2014), citam a captura de 28,2 % de CO₂ durante a vida útil. Para Possan et al., (2017) essas diferenças registradas na literatura são devidas à influência de diversos fatores na carbonatação do concreto (como resistência, ambiente de exposição, teor e tipo de cimento, tempo de uma estrutura, etc.) e dependem de qual tipo de metodologia foi empregada.

De modo geral, o processo de captura de CO₂ devido a carbonatação do concreto, pode ser esquematizado conforme figura 7 (FELIX e POSSAN, 2018).

Figura 7 – Metodologia de cálculo de carbonatação das estruturas de concreto armado.



Fonte: FELIX e POSSAN (2018)

Tendo em vista a carbonatação de estruturas de concreto armado, são poucos os trabalhos na literatura que descrevem detalhadamente a metodologia para cálculo das absorções de CO₂, pelas estruturas de concreto armado. Neste sentido Felix e Possan (2018) descrevem na equação 5, o modelo matemático para o cálculo da profundidade de carbonatação, ao longo do tempo.

$$y = k_c \cdot \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \cdot \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[\left(\frac{k_{ad} \cdot a_d^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c} \right) + \left(\frac{k_{co_2} \cdot co_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c} \right) - \left(\frac{k_{ur} \cdot (UR - 0,58)^2}{100 + f_c} \right) \right] \cdot k_{ce} \quad (5)$$

Onde:

y – Profundidade de carbonatação média do concreto (mm);

f_c – Resistência característica à compressão axial do concreto (MPa);

k_c – Fator variável referente ao tipo de cimento empregado;

k_{fc} – Fator variável referente à resistência à compressão axial do concreto, em função do tipo de cimento utilizado;

t – Idade do concreto (anos);

a_d – Teor de adição pozolânica no concreto (em % em relação à massa de cimento);

k_{ad} – Fator variável referente às adições pozolânicas do concreto – sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz, em função do tipo de cimento;

UR – Umidade relativa média (%/100);

k_{ur} – Fator variável referente à umidade relativa, em função do tipo de cimento utilizado;

co_2 – Teor de CO₂ da atmosfera (%);

k_{co_2} – Fator variável referente ao teor de CO₂ do ambiente, em função do tipo de cimento utilizado;

k_{ce} – Fator variável referente à exposição à chuva, em função das condições de exposição da estrutura.

Ainda, Felix e Possan (2018) descrevem a equação 6 para o cálculo da quantidade de CO₂ (em kgCO₂) capturado durante a vida útil (carbonatação) das estruturas de concreto armado (concreto aparente e sem pinturas).

$$CO_2 = y \cdot c \cdot CaO \cdot r \cdot A \cdot M \quad (6)$$

Onde:

y – É a profundidade de carbonatação do concreto (metros);

c – É a quantidade de cimento empregada para produzir um m³ de concreto (kg/m³);

CaO – É a quantidade de óxido de cálcio contido no cimento (%);

r – É a proporção de CaO totalmente carbonatada (%);

A – É a área superficial do concreto exposta à ação do CO_2 (m^2);

M – É a fração molar do CO_2/CaO .

Para viabilizar o cálculo da carbonatação através das equações 5 e 6, são apresentados os dados de entrada, e os coeficientes nas tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 1 – Dados de entrada para o cálculo da profundidade de carbonatação do concreto.

Variáveis de análise	Concretos					
	CP II E	CP II Z	CP II F	CP III	CP IV	CP V ARI
Tipo de cimento	CP II E	CP II Z	CP II F	CP III	CP IV	CP V ARI
Resistência à compressão axial do concreto (MPa)	Variável	Variável	Variável	Variável	Variável	Variável
Teor de adição (%)	6 - 34.	6 - 14.	0 - 10	35 - 70	15 - 50	0 - 5
Tipo de adição	Escória	Pozolana	Fíler	Escória	Pozolana	Fíler
Ambiente de exposição	EP	EP	EP	EP	EP	EP
Umidade relativa (%)	70	70	70	70	70	70
Teor de CO_2 (%)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Tempo (anos)	1 - 100	1 - 100	1 - 100	1 - 100	1 - 100	1 - 100

Fonte: Felix e Posan (2018)

Tabela 2–Características do concreto e condições ambientais.

Tipo de cimento	Características do concreto			Condições ambientais	
	Cimento	f_c	Adição	CO_2	UR
	K_c	K_{fc}	K_{ad}	K_{co2}	K_{ur}
CP I	19,80	1,70	0,24	18,00	1300
CP II E	22,48	1,50	0,32	15,50	1300
CP II F	21,68	1,50	0,24	18,00	1100
CP II Z	23,66	1,50	0,32	15,50	1300
CP III	30,50	1,70	0,32	15,50	1300
CP IV	33,27	1,70	0,32	15,50	1000
CP V ARI	19,80	1,70	0,24	18,00	1300

Fonte: Felix e Posan (2018)

Tabela 3 – Condições de exposição da estrutura.

Condições de exposição da estrutura	
Proteção à chuva	Kce
Ambiente interno protegido da chuva	1,30
Ambiente externo protegido da chuva	1,00
Ambiente externo desprotegido da chuva	0,65

Fonte: Felix e Posan (2018)

3 METODOLOGIA

Para atender o objetivo geral desta pesquisa, o levantamento dos dados foi realizado na cidade Chapecó – SC, sendo dividido em oito etapas, conforme figura 8.

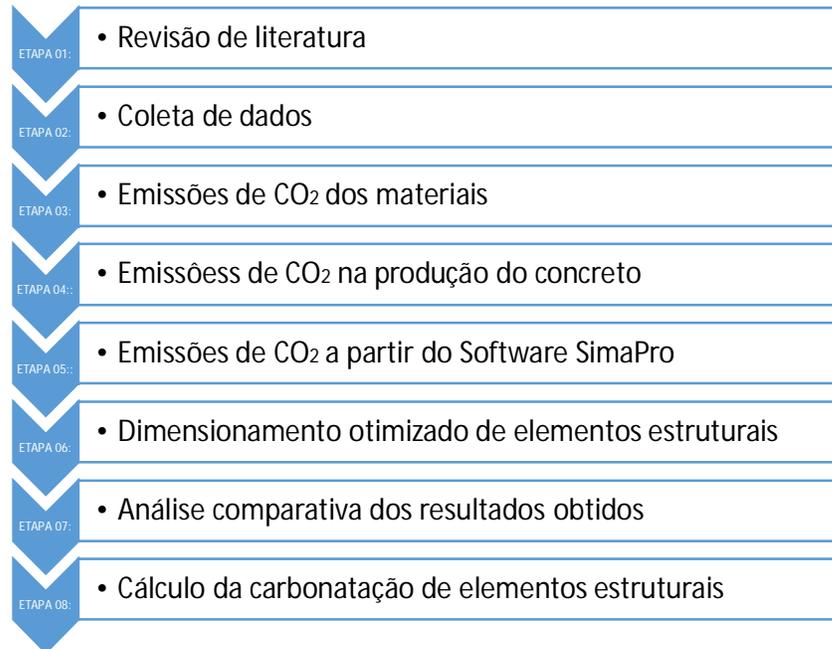
A primeira etapa da pesquisa, consiste em desenvolver a revisão de literatura, através da pesquisa bibliográfica. A segunda etapa, constitui-se da escolha de uma concreteira que fornecesse os dados de produção do concreto e a lista de fornecedores dos materiais utilizados para a fabricação do concreto. Na terceira etapa, são calculadas as emissões de CO₂ nos processos de extração, fabricação e transporte até a concreteira, dos materiais componentes do concreto (agregado graúdo, agregado miúdo, aço e cimento).

A quarta etapa, é constituída pelo cálculo das emissões de CO₂ na produção do concreto (central dosadora de concreto) e no transporte do concreto da usina de concreto até a obra (destino final). Para a quinta etapa, utilizou-se o *Software* SimaPro versão 9.2.0.1, com a base de dados ajustada à realidade da região de Chapecó-SC para o cálculo das emissões de CO₂ do concreto com resistência a compressão de 20 MPa e 35 MPa, aço e formas de madeira.

De posse dos dados da etapa cinco, foi realizado o dimensionamento otimizado de elementos estruturais (pilares e vigas), com ênfase em aspectos ambientais e econômicos, visando conclusões sobre qual o traço de concreto tem o menor impacto ambiental (etapa 6). A etapa sete consiste em comparar os dados obtidos neste estudo com dados do estudo de Santoro (2021), realizado na cidade de Passo Fundo – RS.

Já a oitava e última etapa, foi realizada a pesquisa de literatura e o cálculo da carbonatação, sendo feita a análise diante da influência da carbonatação no ciclo de vida das estruturas de concreto armado, e o quanto as mesmas absorvem de CO₂, nos elementos estruturais otimizados.

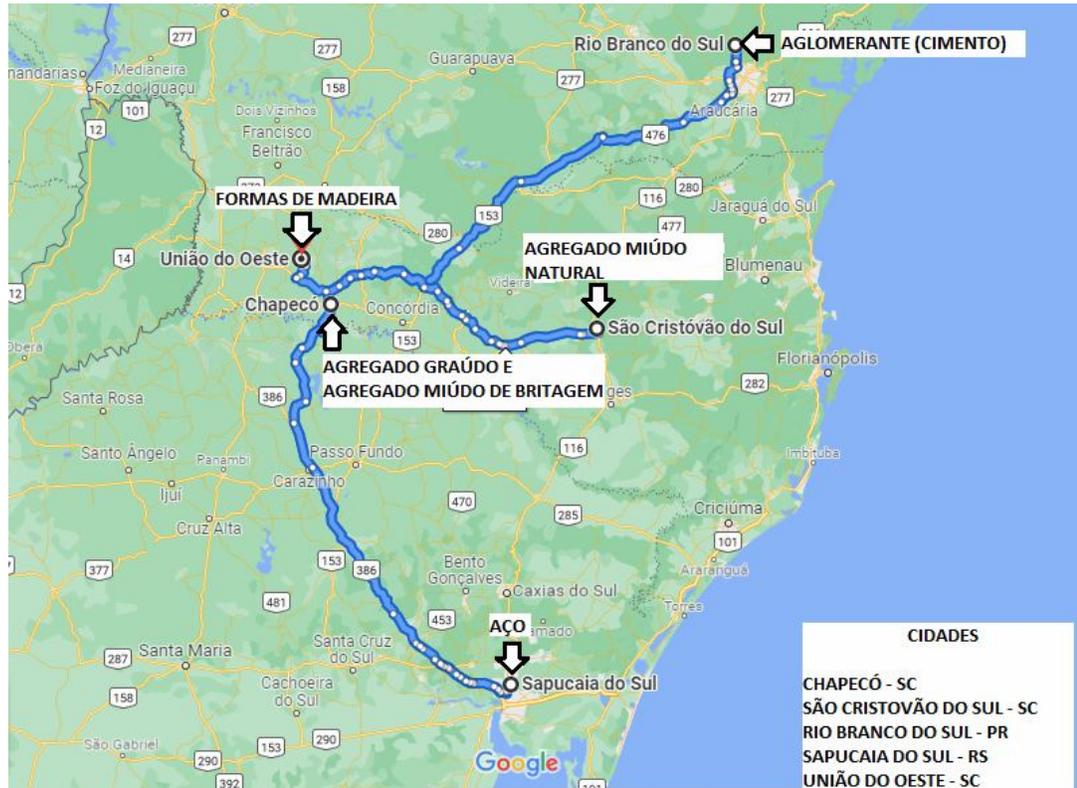
Figura 8 – Fluxograma das etapas para o desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: O Autor

O concreto analisado neste estudo, é de 20 MPa e 35 MPa, sendo os traços fornecidos pela concreteira localizada na cidade de Chapecó – SC. A concreteira também, forneceu a lista de seus fornecedores de materiais para a produção do concreto, onde o agregado graúdo (brita 00 e brita 01) e o agregado miúdo (areia industrial) são produzidos na cidade de Chapecó–SC, distante 4 Km da usina de concreto; o agregado miúdo (areia natural) é produzido na cidade de São Cristóvão do Sul – SC a 294 km de distância. O cimento é produzido na cidade de Rio Branco do Sul – PR a 505 km de distância, o aço é produzido na cidade de Sapucaia do Sul – RS, a 446 km de distância e a madeira utilizada para a confecção das formas é produzida na cidade de União do Oeste – SC a 60 km de distância, conforme ilustrado na figura 9.

Figura 9 – Localização geográfica das matérias-primas.



Fonte: Google Maps (2022)

Para obter os índices de CO₂, foi considerada a emissão de CO₂ pela combustão do diesel, pois em todas as etapas de extração, produção e transporte dos materiais são utilizados máquinas ou equipamentos movidos à diesel. Os dados de emissões de CO₂ no processo de combustão do diesel foram retirados do 2º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (2014), no qual apresenta o valor de 2,61kg CO₂ / litro de diesel consumido. Nos próximos itens serão descritos os processos de extração, produção e transporte de cada material componente do concreto armado, com seus respectivos dados para o cálculo dos índices de emissões de CO₂ e também serão atingidos os objetivos específicos desta pesquisa.

3.1 Etapa 3: Inventário nas etapas de extração, fabricação/beneficiamento e transporte do agregado miúdo (areia industrial) e agregado graúdo (brita 00 e brita 01)

Este item visa avaliar a emissão de dióxido de carbono (CO₂) nas etapas de extração, fabricação/beneficiamento e transporte do agregado graúdo e do agregado miúdo até a central

dosadora de concreto. A britagem analisada para este estudo, é de médio porte e está localizada a aproximadamente 4 km de distância da central dosadora de concreto.

O ciclo do processo de industrialização da matéria-prima (rocha basalto) até o armazenamento do produto na usina dosadora de concreto, inicia-se pela limpeza do terreno com máquinas (escavadeiras hidráulicas) e caminhões, com a finalidade de remover os materiais impróprios para a britagem. Posteriormente, é feito o desmonte das rochas através de explosivos, onde é executada perfurações na rocha.

Realizados o carregamento de explosivos e a detonação, o material detonado é transportado com carregadeira hidráulica em caminhões basculantes, para o transporte até a britagem primária. Nesta etapa o material é descarregado na baia de alimentação e lançado para dentro do britador de mandíbulas para a trituração, e o material gerado na britagem primária é conduzido para a britagem secundária, sendo lançado para dentro do britador hydrocone e triturado para reduzir suas dimensões. A última etapa define-se como britagem terciária, onde o material da etapa anterior é lançado no britador de impacto vertical, este, para correção do formato dos agregados, com o término do processo de britagem, realizando-se assim o peneiramento, classificação e lavagem dos agregados, resultando na brita 00, brita 01 e areia industrial, que são armazenados a céu aberto e em local apropriado e de fácil carregamento.

O carregamento e o transporte do agregado até a central dosadora de concreto são feitos por pá carregadeira e caminhão basculante com capacidade de carga de 10 toneladas.

Mensalmente, a britagem estudada produz 5.400 m³ de agregado, consome 4.000 litros de óleo diesel na extração e produção e 2.500 litros de óleo diesel no transporte dos agregados, até a central dosadora de concreto. De posse dos dados de produção e consumo, é possível calcular a emissão de CO₂ na extração e beneficiamento dos agregados graúdo e miúdo e, no transporte do agregado da britagem, até a usina dosadora de concreto.

3.2 Etapa 3: Inventário nas etapas de extração, classificação, armazenamento e transporte do agregado miúdo (areia natural)

Para a obtenção os valores de emissão de CO₂ na extração, classificação, armazenamento e transporte do agregado miúdo, primeiramente é necessário entender o processo de extração da areia natural. A mineradora fornecedora de areia natural para a usina dosadora de concreto, está localizada no município de São Cristóvão do Sul – SC distante 294 km da cidade de Chapecó – SC.

O método utilizado pela mineradora para extração da areia natural, é o de cava e seca a céu aberto. A primeira etapa reduz o excesso de umidade do terreno e retira a capa de solo e argila, para permitir a extração da areia natural com escavadeiras hidráulicas. Concluída a extração, o material é transportado por caminhões basculantes até o setor de peneiramento (classificação) e lavagem, e o armazenamento é realizado a céu aberto para a secagem e posterior carregamento até o consumidor final. A mineradora forneceu os dados de produção e de consumo de diesel, para o cálculo das emissões de CO₂ do presente estudo.

Produção média mensal de agregado miúdo = 22.000 m³

Consumo médio mensal de diesel da mineradora = 14.000 litros

3.3 Etapa 3: Inventário nas etapas de beneficiamento da matéria-prima e transporte do cimento

O cimento é essencial para a fabricação do concreto, sendo o mais utilizado do mundo, sua fabricação consiste nas etapas de extração das matérias-primas (calcário, argila e gipsita), britagem do calcário, moagem do cru (matéria prima crua – calcário e argila), dosagem da farinha do calcário e argila, clínquerização (produção do clínquer no forno rotativo a 1400 °C com arrefecimento rápido), adição final, moagem final do clínquer, da gipsita e outras substâncias, e finalizando o processo com o ensacamento ou estocagem a granel do cimento pronto para comercialização.

O clínquer é responsável pelas emissões de CO₂ durante a produção do cimento, sua composição é óxido de cálcio (de 60 a 70%), sílica (de 20 a 25%), alumina (de 2 a 9%), óxido de ferro III (de 1 a 6%) e óxido de magnésio (de 0 a 2%) e constitui a fabricação em quatro diferentes processos, via úmida, via semiúmida, via semisseca e via seca (a mais utilizada no mundo) (TRINTA, 2019).

Neste trabalho foram utilizados os valores de emissões de CO₂ na industrialização do cimento do IV Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais – produtos minerais, produção de cimento, publicado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia, elaborado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC e Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP no ano de 2017.

Os dados coletados do inventário descrito, são para o ano de 2015 e apresentam a produção anual de cimento de 64.400.000 toneladas e a emissão de 23.767.000 toneladas de

CO₂, sendo o índice de emissão de CO₂ de 0,3691 toneladas de CO₂ / tonelada de cimento produzido.

Em relação a emissão de CO₂ no transporte do cimento da fábrica, até a central dosadora de concreto, será considerada a distância entre a cidade de Rio Branco do Sul – PR e Chapecó – SC, de aproximadamente de 505 km e transporte a granel do produto em caminhão com capacidade de carga de 41,5 toneladas e consumo de 404 litros de diesel por viagem.

3.4 Etapa 3: Inventário nas etapas de beneficiamento da matéria-prima e transporte do aço

Para o aço, material componente do concreto armado calculam-se as emissões de dióxido de carbono (CO₂) na fabricação/beneficiamento e no transporte do produto da usina siderúrgica até a obra (consumidor final). Para a extração dos índices de emissões de CO₂ apresenta-se a seguir, o processo de fabricação do aço.

As usinas siderúrgicas são classificadas de acordo com seu processo de produção, sendo usinas integradas, onde são separadas por três fases básicas: redução, refino e laminação. E participando de todo o processo produtivo e produzindo aço após a fabricação do ferro-gusa, e usinas semi-integradas, estas podem operar em duas etapas: refino e laminação, e o processo de fabricação parte do ferro-gusa, ferro esponja ou sucatas metálicas. A principal matéria-prima componente do aço é o minério de ferro, com representação de 35 %, também compõem o aço o carvão vegetal ou coque de carvão mineral, calcário, dolomita, sílica e o quartzito (PEDROSO, 2020).

Os dados de emissões de CO₂ na industrialização do aço (usinas siderúrgicas), foram extraídos do 4º Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases do Efeito Estufa – emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais – produção de metais, ferro e aço, publicado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia e elaborado pelo Instituto Aço Brasil e suas associadas para o ano de 2017.

Os dados de emissões de CO₂ apresentados no inventário descrito, correspondem ao ano de 2015, onde a produção de aço e ferro-gusa foi de 33.258.000 toneladas e a emissão de CO₂ resultantes do beneficiamento foi de 48.710.000 toneladas, resultando no índice de CO₂ de 1,4646 toneladas de CO₂ / toneladas de aço produzido.

O cálculo das emissões de CO₂ no transporte do aço da usina siderúrgica situada na cidade de Sapucaia do Sul – RS até a obra (consumidor final), localizada na cidade de Chapecó – SC

com distância entre os locais de 446 km, será feito, considerando o consumo de diesel. O transporte do aço, é realizado através de um caminhão com capacidade de carga de 25 toneladas e que consome 356 litros de diesel por viagem.

3.5 Etapa 3: Inventário de formas de madeira

Este item, visa avaliar a emissão de dióxido de carbono (CO₂) para formas de madeira. O presente estudo, contempla a emissão de CO₂ no processo de extração de toras da floresta, beneficiamento e transporte até a obra. Para quantificar as emissões de CO₂, foram empregados dados de uma empresa de manejo florestal, localizada no município de União do Oeste – SC distante 60 km de Chapecó – SC.

O processo de extração da madeira, consiste na abertura da vegetação para criação de trilhas e áreas de estoque das toras, arraste das toras, e transporte das toras para beneficiamento. Estas atividades são realizadas com motosserras, tratores e caminhões. O beneficiamento da madeira, consiste no desdobro das toras em equipamentos chamados de serra fita, onde recebem as toras e realizam os primeiros cortes, preparando a madeira para na etapa seguinte receber os cortes, de acordo com as dimensões comerciais. Após o processamento da madeira, é encaminhada para a etapa de secagem ao ar livre. O transporte da madeira beneficiada até a obra, é realizado por caminhões com capacidade de carga de 6 m³.

A empresa de manejo ambiental analisada, produz mensalmente 250 m³ de madeira, consumindo 2.300 litros de diesel e 410 litros de gasolina em todo o processo de extração e beneficiamento.

3.6 Etapa 4: Inventário na produção e transporte do concreto da central dosadora até a obra

A central dosadora de concreto que fará parte deste estudo, está situada na cidade de Chapecó – SC, e atende clientes instalados em um raio de 100 km ao entorno da usina de concreto. O processo de produção do concreto, consiste em abastecer a central dosadora com os materiais (agregado graúdo e agregado miúdo), através de uma pá carregadeira, que se encontram estocados no pátio da usina, e o abastecimento do cimento é feito pelo silo (onde

está estocado). Após concluir o processo de pesagem e medição na central dosadora, é feito o carregamento do caminhão betoneira, e adicionado água e aditivo conforme o traço do concreto.

Para este estudo foi considerado o transporte do concreto a uma distância de 13 km, que é a distância média de transporte do concreto até as obras atendidas pela usina. Os dados de produção e transporte estão especificados abaixo, conforme informações fornecidas pela central dosadora de concreto:

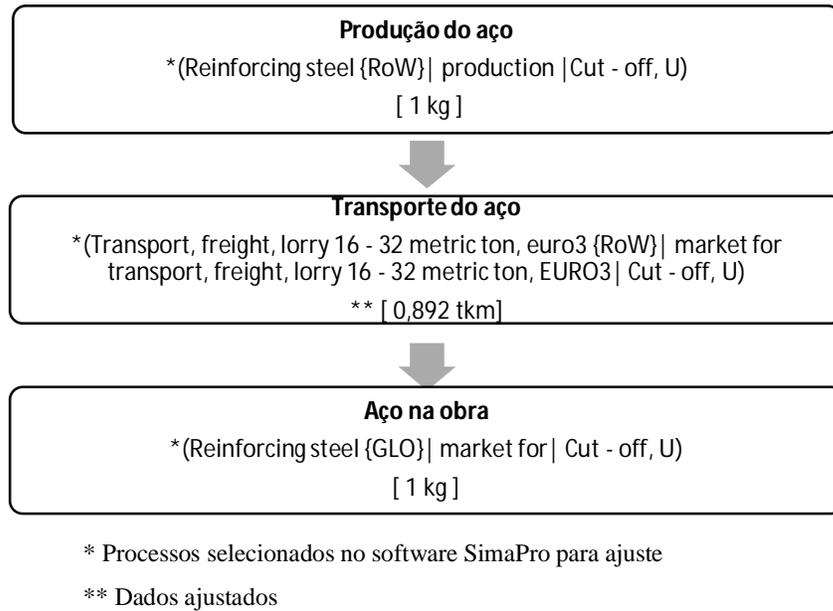
- Produção mensal = 4.500 m³ de concreto;
- Consumo médio de diesel na movimentação interna do agregado = 0,25 litro de diesel / m³ de concreto;
- Consumo de diesel caminhão betoneira = 1,30 litro de diesel / m³ de concreto;
- Consumo de diesel transporte vertical do concreto = 0,56 litro de diesel / m³ de concreto.

3.7 Etapa 5: Inventário do concreto de 20 MPa e 35 MPa a partir da utilização do software SimaPro, com implementação dos dados de extração/produção das matérias-primas da região em estudo

Para esta etapa do estudo utilizou-se o *Software* SimaPro, versão 9.2.0.1 Faculty UPF 003, a base de dados Econinvest 3.7.1 de 2021, e de categoria de impacto, foi selecionado o método ReCiPe 2016 Midpoint (H) versão 1.05 Hierárquica, método padrão com fatores de caracterização para a escala global.

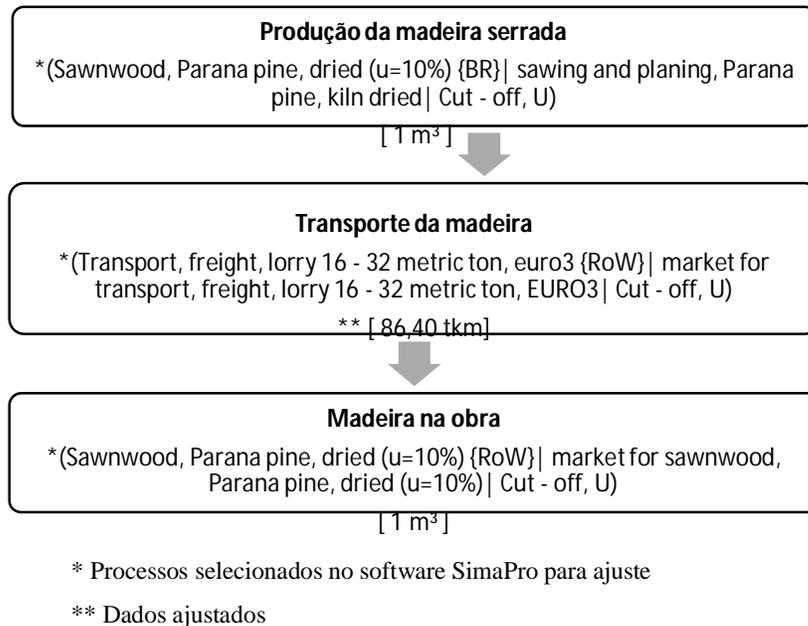
A base de dados do *Software* SimaPro, foi ajustada à realidade da região em estudo, para o cálculo das emissões de CO₂ do concreto de 20 MPa, 35 MPa, aço e formas de madeira, conforme figuras 10, 11, 12 e 13. O cálculo das emissões de CO₂ foi feito para um metro cúbico de concreto, um quilo de aço e um metro cúbico de madeira para forma.

Figura 10 – Fluxograma com dados ajustados para o aço.



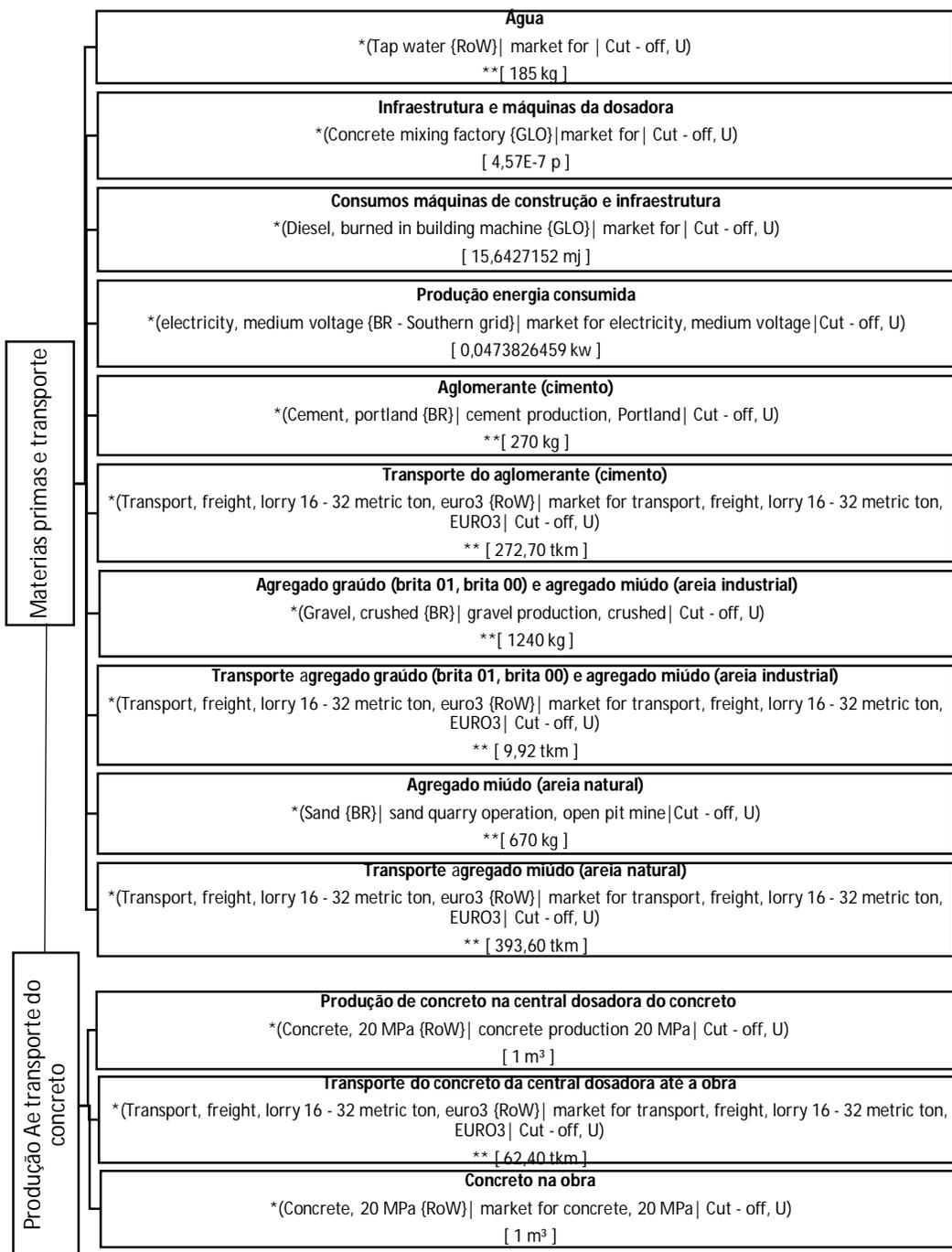
Fonte: O Autor

Figura 11 – Fluxograma com dados ajustados para formas de madeira.



Fonte: O Autor

Figura 12 – Fluxograma com dados ajustados para concreto de 20 MPa.

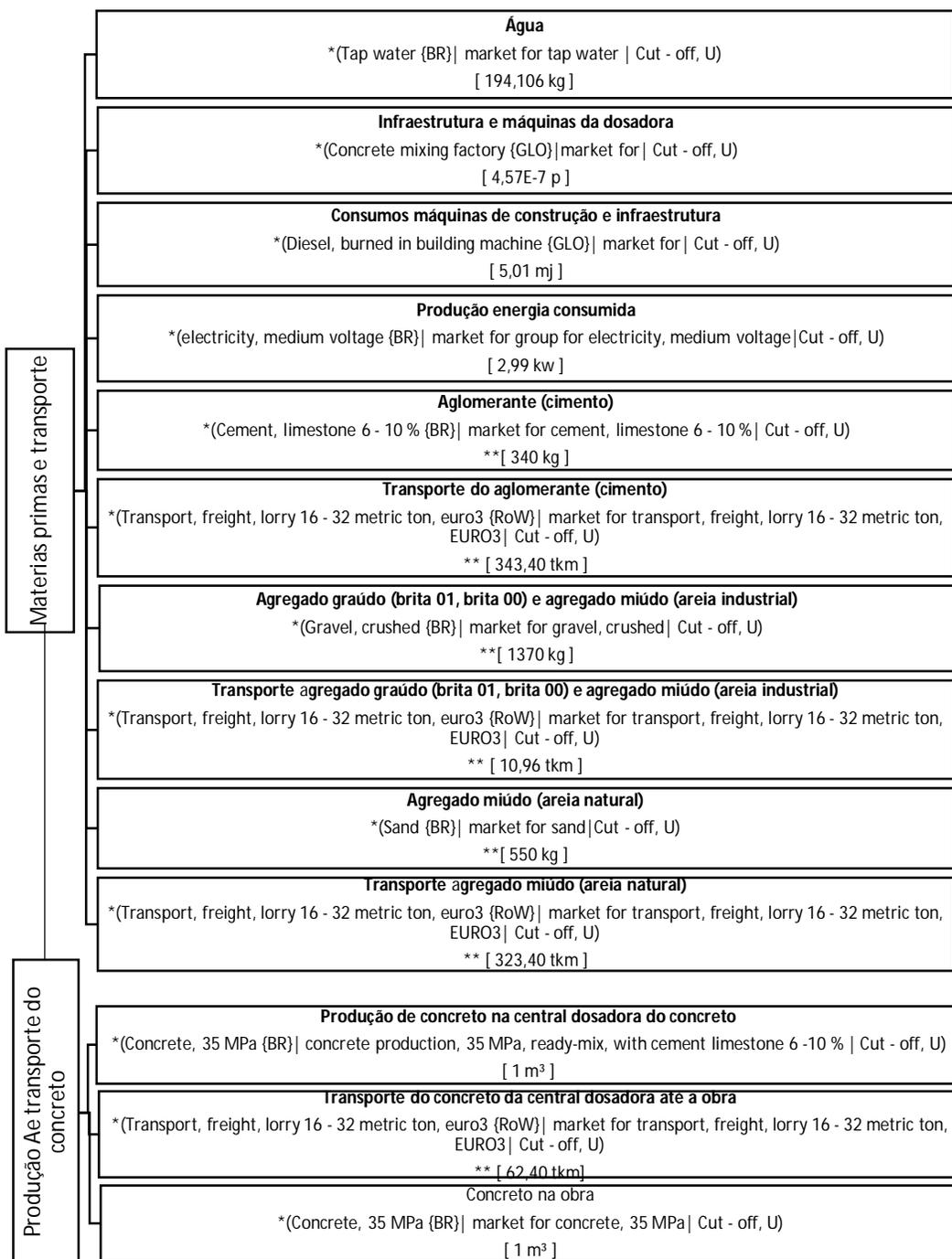


* Processos selecionados no software SimaPro para ajuste

** Dados ajustados

Fonte: O Autor

Figura 13 – Fluxograma com dados ajustados para concreto de 35 MPa.



* Processos seleccionados no software SimaPro para ajuste

** Dados ajustados

Fonte: O Autor

3.8 Etapa 6: Otimização de elementos estruturais em concreto armado com ênfase na sustentabilidade ambiental e no custo

De posse dos dados de emissão de CO₂ obtidos na quinta fase deste estudo, foi realizado o dimensionamento otimizado de elementos estruturais (pilares e vigas) em concreto armado, buscando o melhor resultado para minimizar o impacto ambiental e o custo do concreto armado na construção civil. Para o dimensionamento e otimização dos elementos estruturais em concreto armado, foi utilizado um programa computacional desenvolvido por Junior e Kripka (2021), para a otimização de vigas, e o de Bordignon e Kripka (2012) para a otimização de seções de pilares.

3.9 Etapa 7: Comparativo dos resultados obtidos neste estudo, com resultados de Santoro (2021)

Calculados os dados de emissões de CO₂, foi realizado a análise comparativa com os dados de emissão de CO₂ do estudo realizado por Santoro (2021), este que destaca as emissões de CO₂ na extração, produção e transporte do concreto para a região de Passo Fundo–RS. Através da análise comparativa entre os estudos, foi possível ter conclusões sobre a variação dos resultados para região, em todas as etapas da produção do concreto.

3.10 Etapa 8: Carbonatação da estrutura de concreto armado ao longo do ciclo de vida

O cálculo da carbonatação das estruturas de concreto armado ao longo do seu ciclo de vida, foi feito através da metodologia descrita por Felix e Possan (2018). Neste trabalho não será desenvolvido o cálculo da carbonatação das estruturas de concreto armado no pós-demolição. Os elementos estruturais (vigas e pilares) serão considerados em concreto armado aparente e sem pintura, as dimensões dos elementos estruturais serão definidas na etapa de dimensionamento otimizado das estruturas de concreto armado, do presente trabalho. Será avaliada, dentre outras, a influência da carbonatação nas emissões finais dos elementos otimizados.

A metodologia adotada é composta por 4 etapas, sendo, 1) a descrição do cenário da estrutura; 2) estimativas das emissões de CO₂ dos materiais componentes do concreto; 3)

realização do cálculo da profundidade da carbonatação do concreto ao longo da sua vida útil;
4) estimado a carbonatação do concreto ao longo do seu ciclo de vida.

Foram utilizados para a estimativa da carbonatação as equações 5 e 6, citadas no item 2.3 deste trabalho. As estruturas de concreto armado foram consideradas em ambientes externos protegidos da chuva, cujo o coeficiente das condições de exposição da estrutura (K_{ce}) é 1,00, considerando que os traços do concreto, são para as resistências características a compressão de 20 MPa e 35 MPa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Cálculo das emissões de CO₂

Nesta seção, são apresentados os cálculos das emissões de CO₂ para cada matéria-prima, utilizada para a produção do concreto armado e no processo de produção e transporte do concreto da central dosadora, até a obra. Através dos gráficos, é feito o comparativo das emissões de CO₂ para cada matéria prima na extração/produção, e no transporte.

4.1.1 Emissões de CO₂ das matérias-primas componentes do concreto

Na sequência é apresentado as emissões de CO₂ para as diferentes matérias-primas componentes do concreto armado, bem como os valores correspondentes a partir do consumo de diesel e gasolina dos processos, os dados foram considerados nos processos de extração, fabricação e transporte de cada matéria-prima, conforme descritos no item 3.

Na tabela 4, são apresentados os valores de emissões de CO₂ na extração e produção do agregado graúdo (brita 00 e brita 01) e do agregado miúdo (areia industrial) e, na tabela 5, os valores de emissões de CO₂ no transporte.

Tabela 4 – Emissões de CO₂ na extração e produção do agregado graúdo (brita 00, brita 01) e agregado miúdo (areia industrial).

Matéria-prima	Produção	Consumo Diesel	Consumo Diesel	Emissão CO₂ Diesel	Emissão CO₂ TOTAL
Agregado Graúdo e Agregado Miúdo (areia industrial)	8.100.000 kg/mês	4.000 L/mês	0,001289 L/kg	2,61 kgCO ₂ /L	0,001289 kgCO ₂ /kg

Fonte: O Autor

Tabela 5 – Emissões de CO₂ no transporte do agregado graúdo (brita 00, brita 01) e agregado miúdo (areia industrial)

Matéria-prima	Carga Transportada	Consumo Diesel	Consumo Diesel	Emissão CO₂ Diesel	Emissão CO₂
Agregado Graúdo e Agregado Miúdo (areia industrial)	10.000 kg/viagem	3 L/viagem	0,0003 L/kg	2,61 kgCO ₂ /L	0,000783 kgCO ₂ /kg

Fonte: O Autor

Nas tabelas 6 e 7 são apresentados os valores de emissão de CO₂ do agregado miúdo natural, nas etapas de extração, fabricação e transporte até a central dosadora de concreto.

Tabela 6 – Emissões de CO₂ na extração e produção do agregado miúdo natural.

Matéria-prima	Produção	Consumo Diesel	Consumo Diesel	Emissão CO₂ Diesel	Emissão CO₂ TOTAL
Agregado Miúdo (Areia Natural)	28.600.000 kg/mês	14.000 L/mês	0,0004895 L/mês	2,61 kgCO ₂ /L	0,001277 kgCO ₂ /kg

Fonte: O Autor

Tabela 7 – Emissões de CO₂ no transporte do agregado miúdo natural.

Matéria-prima	Carga Transportada	Consumo Diesel	Consumo Diesel	Emissão CO₂ Diesel	Emissão CO₂
Agregado Miúdo (Areia Natural)	57.000 kg/viagem	235 L/viagem	0,00412 L/kg	2,61 kgCO ₂ /L	0,01076 kgCO ₂ /kg

Fonte: O Autor

Com relação às emissões de CO₂ da etapa de produção do aglomerante (cimento), são utilizados dados da literatura, conforme descrito no item 3. As emissões de CO₂ no transporte do aglomerante (cimento) até a central dosadora de concreto, é apresentado na tabela 8.

Tabela 8 – Emissões de CO₂ no transporte do aglomerante (cimento) até a central dosadora de concreto.

Matéria-prima	Carga Transportada	Consumo Diesel	Consumo Diesel	Emissão CO₂ Diesel	Emissão CO₂
Aglomerante (cimento)	41.500 kg/viagem	404 L/viagem	0,0097 L/kg	2,61 kgCO ₂ /L	0,0025 kgCO ₂ /kg

Fonte: O Autor

O valor das emissões de CO₂ na etapa de produção do aço foi obtido da literatura, conforme descrito no item 3. As emissões de CO₂ no transporte do aço até a obra, na cidade de Chapecó – SC, são descritos na tabela 9.

Tabela 9 – Emissões de CO₂ no transporte do aço até a obra.

Matéria-prima	Carga Transportada	Consumo Diesel	Consumo Diesel	Emissão CO₂ Diesel	Emissão CO₂
Aço	25.000 kg/viagem	356 L/viagem	0,01424 L/kg	2,61 kgCO ₂ /L	0,03717 kgCO ₂ /kg

Fonte: O Autor

Após a coleta dos dados para extração, beneficiamento e transporte da madeira, as emissões de CO₂ são apresentadas nas tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Emissões de CO₂ na produção e beneficiamento da madeira.

Matéria-prima	Produção	Consumo Diesel	Consumo Gasolina	Emissão CO₂ Diesel	Emissão CO₂ Gasolina	Emissão CO₂ TOTAL
Madeira	250 m ³ /mês	2300 L/mês	410 L/mês	24,012 kgCO ₂ /m ³	3,7228 kgCO ₂ /m ³	27,7348 kgCO ₂ /m ³

Fonte: O Autor

Tabela 11 – Emissões de CO₂ no transporte da madeira até a obra.

Matéria-prima	Carga Transportada	Consumo Diesel	Consumo Diesel	Emissão CO₂ Diesel	Emissão CO₂
Madeira	6 m ³ /viagem	24 L/viagem	4 L/m ³	2,61 kgCO ₂ /L	10,44 kgCO ₂ /m ³

Fonte: O Autor

A tabela 12, apresenta os resultados dos cálculos das emissões de CO₂ das matérias-primas componentes do concreto armado. Através da análise verifica-se que as maiores emissões de CO₂ são provenientes da fase de extração/produção das matérias-primas componentes do concreto, exceto para o agregado miúdo (areia natural) que a maior emissão de CO₂, é proveniente da fase de transporte. O aço é responsável pela maior emissão de CO₂ na fase de extração/produção.

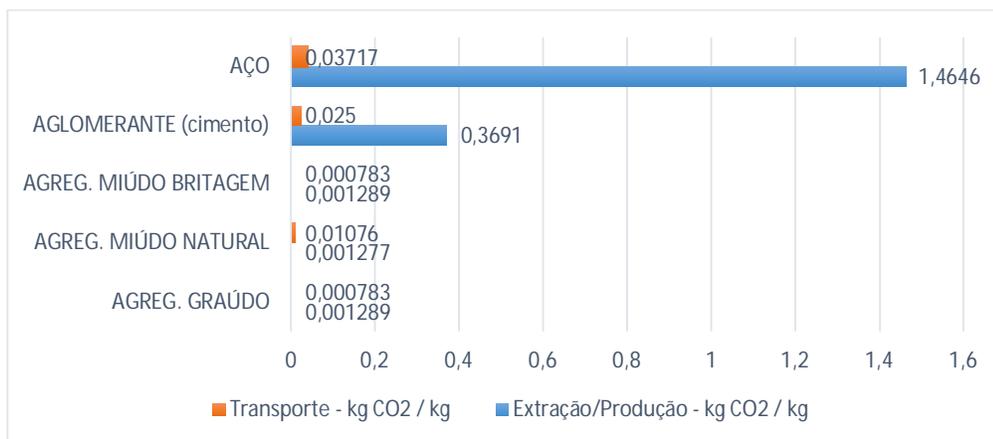
Tabela 12 – Emissões de CO₂ nas fases de extração/produção e transporte da matéria-prima.

	EMISSIONES DE CO ₂				
	Extração/Produção kg CO ₂ /kg	Transporte kg CO ₂ /kg	Total kg CO ₂ /kg	Extração/Produção %	Transporte %
AGREG. GRAÚDO	0,001289	0,000783	0,002072	62,21	37,79
AGREG. MIÚDO NATURAL	0,001277	0,01076	0,012037	10,61	89,39
AGREG. MIÚDO BRITAGEM	0,001289	0,000783	0,002072	62,21	37,79
AGLOMERANTE (cimento)	0,3691	0,025	0,3941	93,66	6,34
AÇO	1,4646	0,03717	1,50177	97,52	2,48

Fonte: O Autor

Na figura 14, apresentam-se os índices de emissões de CO₂ para cada matéria-prima componente do concreto armado em kgCO₂/kg. A apreciação comparativa permite analisar que os índices mais relevantes se encontram na extração/produção do aço e na extração produção do aglomerante (cimento), e os menores índices de emissões de CO₂ é no transporte do agregado graúdo e agregado miúdo de britagem (areia industrial).

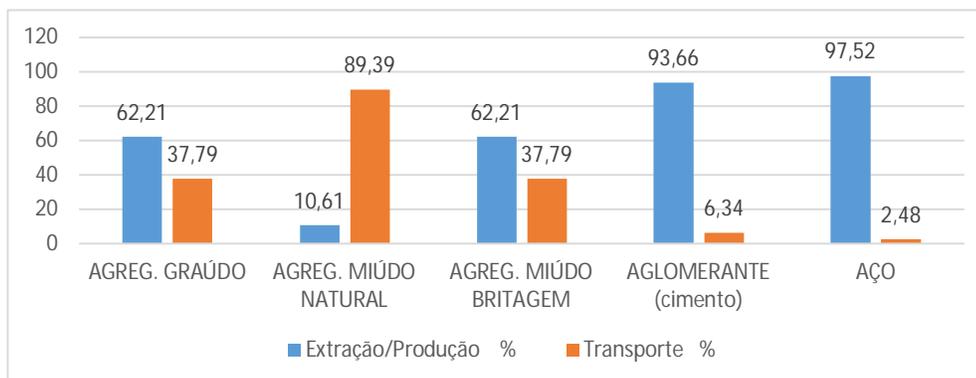
Figura 14 – Índice das emissões de CO₂ nas fases de extração/produção e transporte da matéria-prima.



Fonte: O Autor

A figura 15, apresenta o comparativo das emissões de CO₂ na extração/produção e transporte para cada matéria-prima componente do concreto em porcentagem. Os resultados apontam que para o agregado miúdo natural, a maior emissão de CO₂ é no transporte e para o aço e aglomerante (cimento), a maior emissão de CO₂ dá-se na extração/produção.

Figura 15 – Contribuições percentuais das emissões de CO₂ nas fases de extração/produção e transporte.



Fonte: O Autor

4.1.2 Emissões de CO₂ para a produção de um metro cúbico de concreto

De posse dos dados obtidos das fases anteriores desta pesquisa, calculam-se as emissões de CO₂ para a produção de um metro cúbico de concreto, para os traços de resistência característica de 20 MPa e 35 MPa.

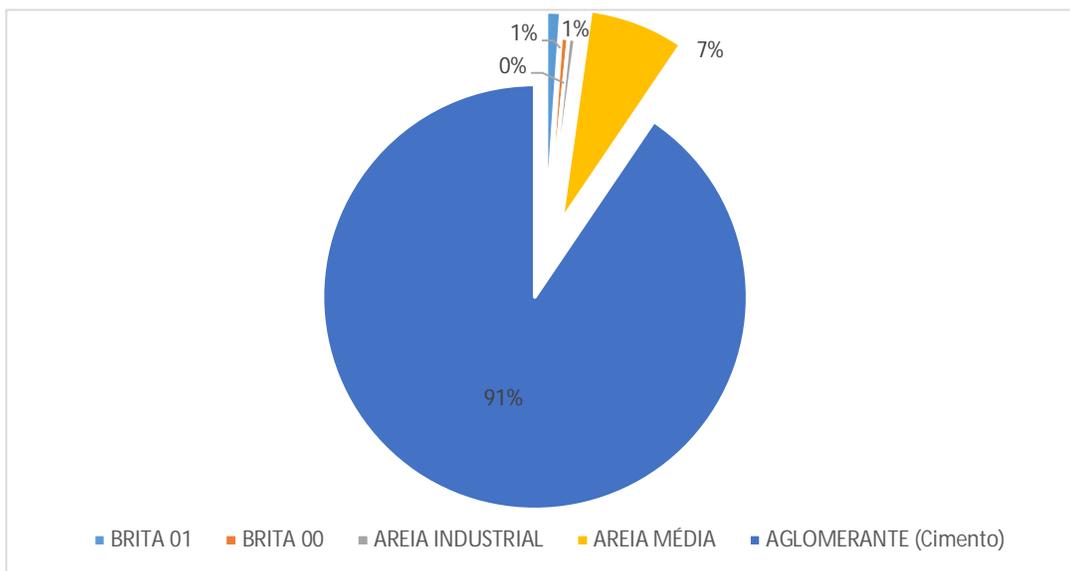
A tabela 13, apresenta o resultado dos cálculos das emissões de CO₂ para a produção de um metro cúbico de concreto para o traço de 20 MPa, sendo o menor emissor de CO₂ a Brita 00 (0,65268 kgCO₂/m³) e a areia industrial (0,6216 kgCO₂/m³). O aglomerante (cimento) é o maior emissor de CO₂, sendo responsável por 91 % das emissões para a produção de um metro cúbico de concreto, conforme figura 16.

Tabela 13 – Emissões de CO₂ para um metro cúbico de concreto de 20 MPa.

	Quantidade kg/m ³	Emissões Ext/Prod kgCO ₂ /kg	Emissões Transporte kgCO ₂ /kg	Emissões Totais kgCO ₂ /m ³
BRITA 01	625	0,001289	0,000783	1,295
BRITA 00	315	0,001289	0,000783	0,65268
AREIA INDUSTRIAL	300	0,001289	0,000783	0,6216
AREIA MÉDIA	670	0,001277	0,01076	8,065
AGLOMERANTE (Cimento)	270	0,3691	0,025	106,407
Emissão Total (Traço 20 MPa) = 117,04128 kg CO ₂ / m ³ concreto				

Fonte: O Autor

Figura 16 – Contribuições percentuais das emissões de CO₂ das matérias-primas para um metro cúbico de concreto de 20 MPa.

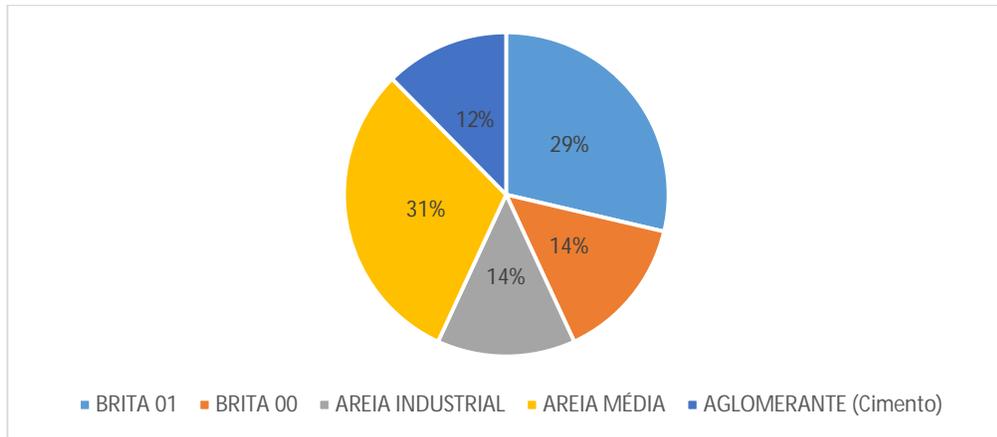


Fonte: O Autor

Na figura 17, apresentam-se a porcentagem de contribuição em volume de cada matéria-prima para a produção de um metro cúbico de concreto. Fazendo a apreciação comparativa

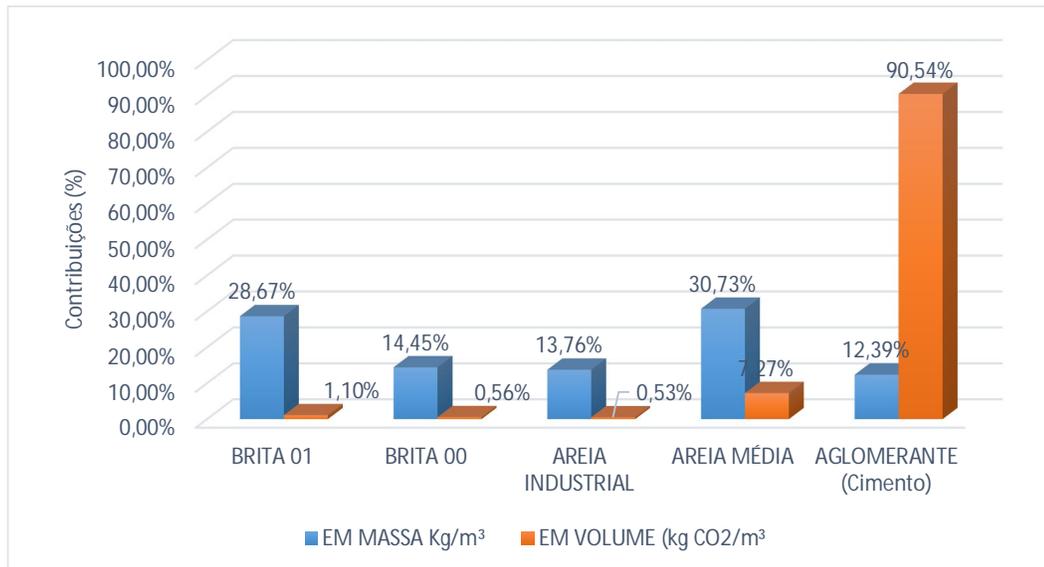
entre a figura 16 e a figura 17, apresenta-se o resultado na figura 18, nota-se que o aglomerante (cimento), vem a ser a matéria-prima que possui menor participação em volume para a produção de um metro cúbico de concreto (12%), entretanto, é o maior responsável pelas emissões de CO₂ (91%). A brita 01, brita 00 e areia industrial representam 57% do volume de matéria-prima para a produção do concreto, e emitem menos de 3% de CO₂.

Figura 17 – Porcentagem das matérias-primas para um metro cúbico de concreto de 20 MPa.



Fonte: O Autor

Figura 18 – Emissões de CO₂ x Volume para a produção de um metro cúbico de concreto de 20 MPa.



Fonte: O Autor

A tabela 14, apresenta o resultado do cálculo das emissões de CO₂ das matérias-primas componentes do concreto para a classe de resistência do concreto de 35 MPa. Por meio da

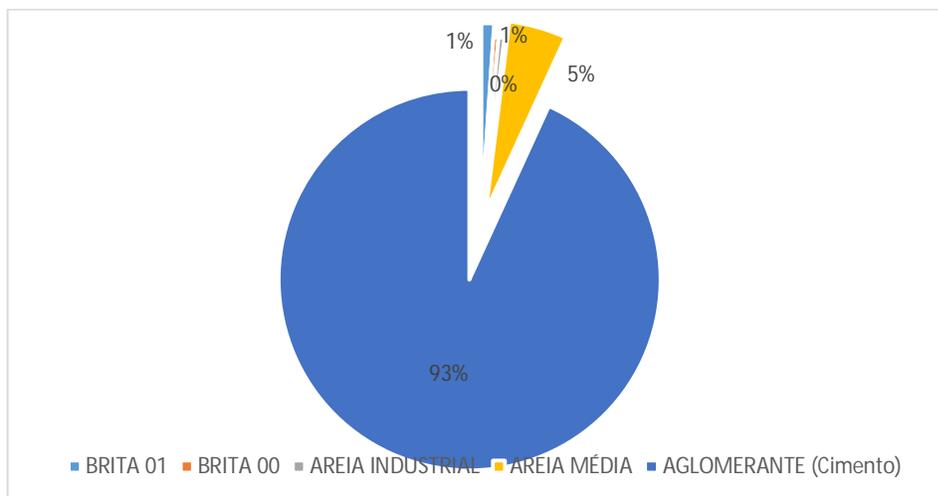
análise desta tabela, é verificada que o aglomerante (cimento) é o maior emissor de CO₂ (133,994 kgCO₂/m³), representando 93,15% do total de emissões de CO₂ para a produção de um metro cúbico de concreto (figura 19). A figura 19 também apresenta, que a brita 00 e a areia industrial são as matérias primas com menor emissão de CO₂.

Tabela 14 – Emissões de CO₂ para um metro cúbico de concreto de 35 MPa.

	Quantidade kg/m ³	Emissões Ext/Prod kgCO ₂ /kg	Emissões Transporte kgCO ₂ /kg	Emissões Totais kgCO ₂ /m ³
BRITA 01	730	0,001289	0,000783	1,51256
BRITA 00	290	0,001289	0,000783	0,60088
AREIA INDUSTRIAL	350	0,001289	0,000783	0,7252
AREIA MÉDIA	550	0,001277	0,01076	6,62
AGLOMERANTE (Cimento)	340	0,3691	0,025	133,994
Emissão Total (Traço 35 MPa) = 143,45264 kg CO ₂ / m ³ concreto				

Fonte: O Autor

Figura 19 – Contribuições percentuais das emissões de CO₂ das matérias-primas para um metro cúbico de concreto de 35 MPa.

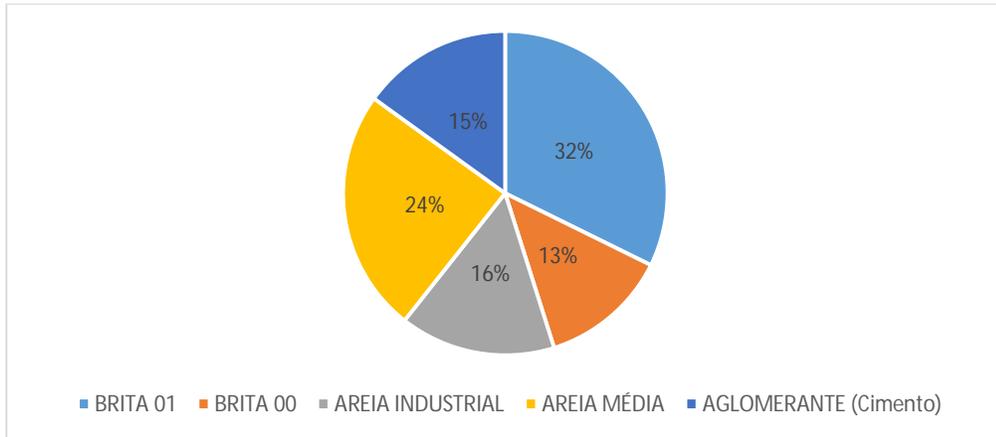


Fonte: O Autor

Interpretando os dados da figura 20, proporciona o aglomerante (cimento) como o menor volume de matéria-prima utilizada para a produção de um metro cúbico de concreto, e a brita 01 sendo o maior volume. Através da apreciação comparativa, entre a figura 19 e a figura 20, é possível destacar o aglomerante (cimento), como sendo o maior emissor de CO₂ e possuir a

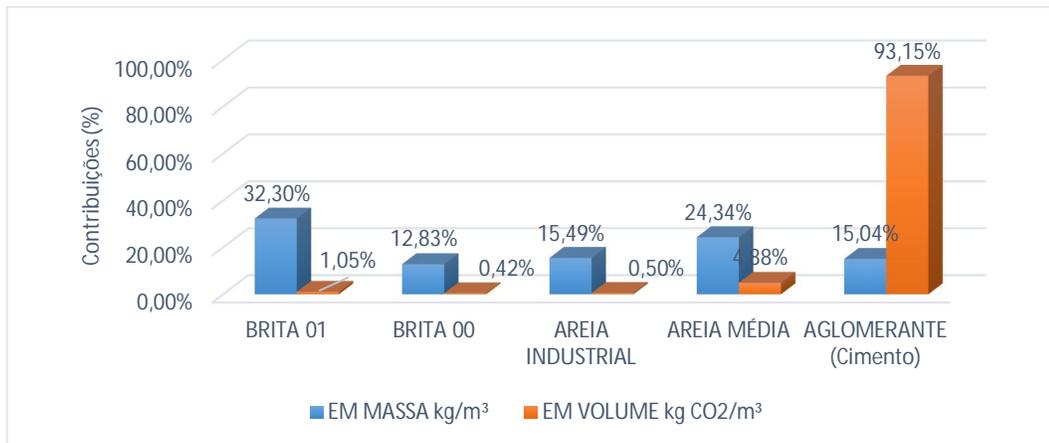
menor contribuição em volume. Também é notória as emissões de CO₂ pelos agregados brita 01, brita00 e areia industrial (1,97%) e a contribuição em volume de 60,62% (figura 21).

Figura 20 – Porcentagem das matérias-primas para um metro cúbico de concreto de 35 MPa.



Fonte: O Autor

Figura 21 – Emissões de CO₂ x Volume para a produção de um metro cúbico de concreto de 35 MPa.

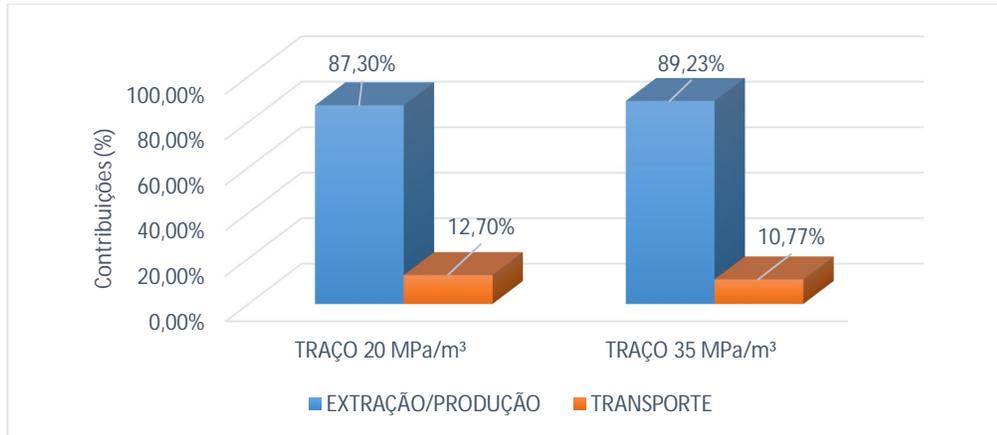


Fonte: O Autor

De posse dos resultados das emissões de CO₂, para um metro cúbico de concreto, é apresentado na figura 22 a apreciação comparativa das emissões de CO₂ nas fases de extração/produção e o transporte para o concreto com resistência característica de 20 MPa e 35 MPa. A análise mostra, que na fase de extração/produção, é emitida o maior volume de CO₂ para ambos os concretos. O concreto de 20 MPa apresenta maior emissão de CO₂ na fase de transporte, comparado ao concreto de 35 MPa, com resultados de 12,70% e 10,77%

respectivamente. As emissões totais do concreto de 35 MPa foram 22,40% superiores às do concreto de 20 MPa.

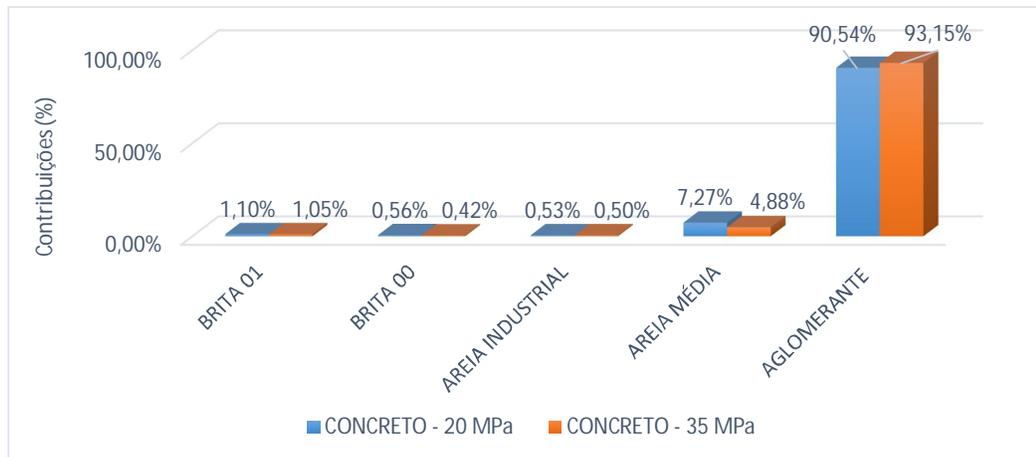
Figura 22 – Emissões de CO₂ nas fases de extração/produção e transporte do concreto.



Fonte: O Autor

A figura 23, apresenta os resultados das emissões de CO₂ das matérias-primas componentes do concreto, para um metro cúbico de concreto. Sobre as emissões de CO₂, os resultados apontados nessa apreciação comparativa, confirmam o aglomerante (cimento) sendo o maior emissor de CO₂ e o agregado brita 00 e areia industrial sendo o menor emissor de CO₂. O agregado miúdo (areia natural) obteve a segunda maior emissão de CO₂ das matérias-primas, devido à emissão de CO₂ em seu transporte.

Figura 23 – Emissões de CO₂ das matérias-primas por metro cúbico de concreto.

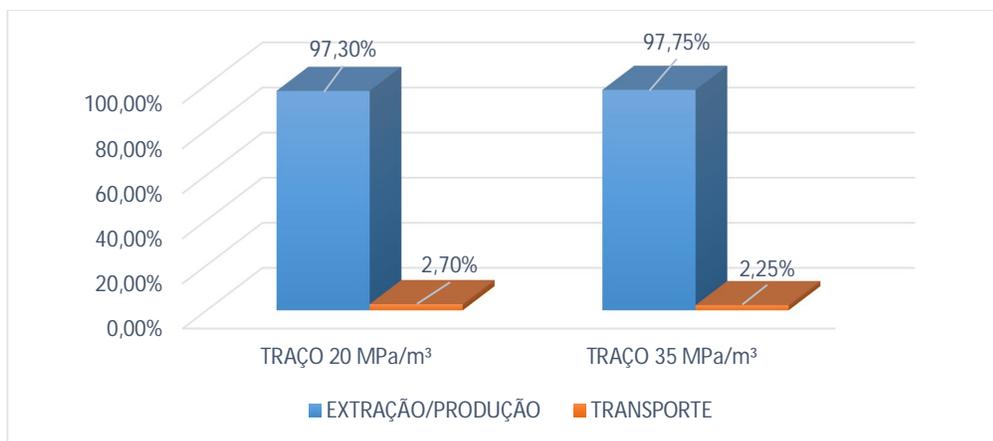


Fonte: O Autor

Analisando os índices de emissões de CO₂ apresentados, nota-se que a fase de transporte da matéria-prima é responsável por 12,70% das emissões de CO₂ no concreto de 20 MPa e 10,77% para o concreto de 35 MPa. Com o objetivo de diminuir tais emissões de CO₂, foi realizada a simulação, considerando que todas as matérias-primas necessárias para a fabricação de um metro cúbico de concreto, estejam disponíveis na cidade de Chapecó – SC, sendo percorrida uma distância média de 10 quilômetros, até a central dosadora de concreto.

A figura 24, apresenta os resultados da simulação das emissões de CO₂ nas fases de extração/produção e transporte do concreto de 20 MPa e 35 MPa.

Figura 24 – Emissões simuladas de CO₂.

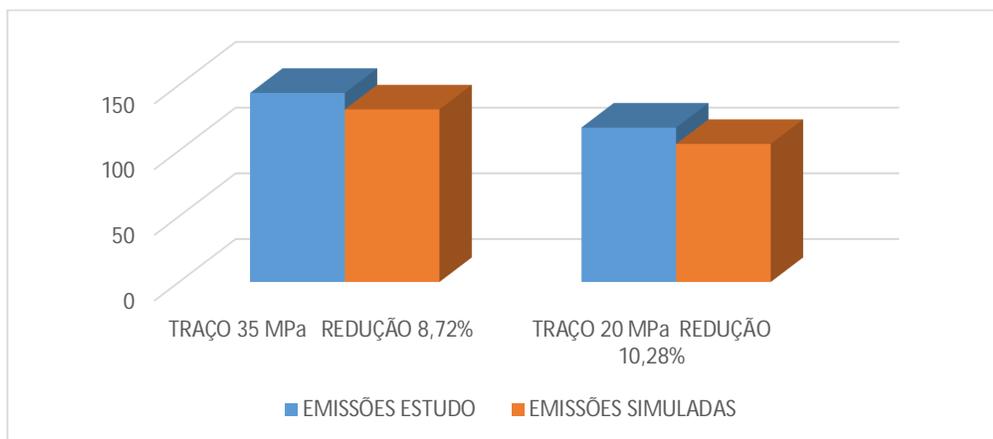


Fonte: O Autor

Conforme o gráfico evidência, para a fase de transporte, indica a redução das emissões de CO₂ por volta de 80% para o concreto de 20 MPa e de aproximadamente de 75% para o concreto de 35 MPa e para as emissões totais de CO₂, indicam redução cerca de 10% para ambos os concretos.

Na figura 25, os resultados da avaliação das emissões de CO₂ simuladas apontam redução de 10,28% para o concreto de 20 MPa e 8,72% para o concreto de 35 MPa, demonstrando a influência do transporte das matérias-primas no resultado das emissões de CO₂ totais do concreto.

Figura 25 – Emissões CO₂ estudo x emissões CO₂ simuladas.



Fonte: O Autor

4.1.3 Emissões de CO₂ na produção do concreto e no transporte do concreto da central dosadora até a obra

As emissões de CO₂ na produção do concreto referem-se a movimentação das matérias-primas estocadas no pátio da central dosadora de concreto, até a central dosadora de concreto através de carregadeira hidráulica, e o transporte do concreto da central dosadora de concreto até a obra, é realizado por caminhões betoneiras com capacidade de carga de 8,0 m³ do produto, visto que, o transporte vertical do concreto na obra, é realizado por caminhão bomba pneumáticas, com capacidade de bombeamento de 20 m³/hora. A tabela 15 apresenta as emissões de CO₂ por metro cúbico de concreto nas etapas de movimentação das matérias-primas, na central dosadora, no transporte do concreto da central dosadora até a obra e no transporte vertical do concreto na obra.

Tabela 15 – Emissões de CO₂ para a produção e transporte do concreto da central dosadora até a obra.

Movimentação das matérias-primas KgCO ₂ /m ³	Transporte até a obra KgCO ₂ /m ³	Transporte Vertical na obra KgCO ₂ /m ³	Emissões totais KgCO ₂ /m ³
0,6525	1,6965	1,46	3,809

Fonte: O Autor

Na figura 26, apresentam-se os resultados das emissões de CO₂ na produção do concreto na central dosadora, no transporte, até a obra e no transporte vertical do concreto na obra. Através da análise, verifica-se que a maior contribuição das emissões de CO₂ são do transporte do concreto até a obra e do deslocamento vertical do concreto na obra, sendo que apenas 17%

das emissões de CO₂ neste processo é resultado da movimentação das matérias-primas na central dosadora de concreto.

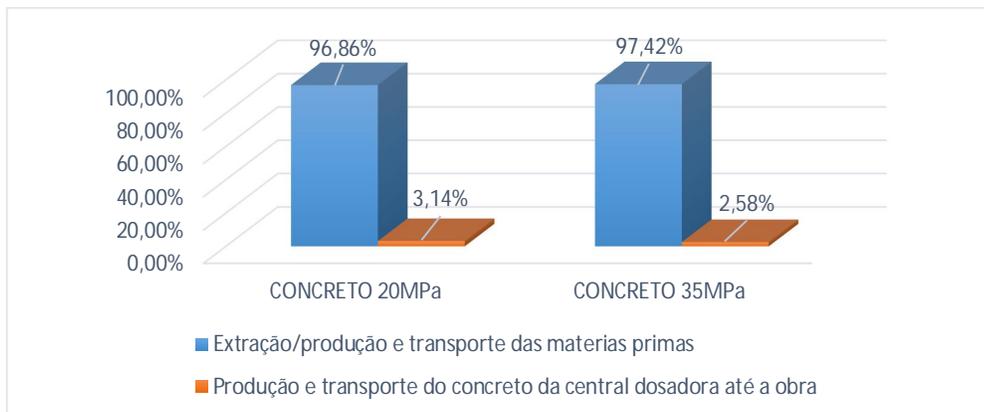
Figura 26 – Emissões CO₂ no processo de produção e transporte do concreto.



Fonte: O Autor

Na figura 27, apresentam-se os resultados da avaliação das emissões de CO₂ na extração/produção e transporte das matérias-primas componentes do concreto e das emissões de CO₂ na produção e deslocamento do concreto da central dosadora até a obra.

Figura 27 – Emissões CO₂ no processo de produção e transporte do concreto.



Fonte: O Autor

Analisando a figura 27, os dados apontados nessa apreciação comparativa, apontam para o fato que a maior emissão de CO₂ é dos processos de extração/produção e transporte da matéria-prima componente do concreto. Nessa análise, no processo de produção e transporte

do concreto, a emissão de CO₂ é impactada pela movimentação interna das matérias-primas e pela distância de transporte do concreto pronto, da central dosadora até a obra.

4.1.4 Cálculo das emissões de CO₂ do concreto a partir da utilização do software SimaPro

Para o cálculo das emissões de CO₂ utilizou-se o *Software* SimaPro, porém com os valores da base de dados ajustados à realidade da região de Chapecó – SC. A base de dados do *Software* SimaPro utilizada está especificada na etapa 5 deste estudo, assim como os ajustes feitos nos quantitativos de dosagens dos traços de concreto e transporte. O resultado das emissões de CO₂ apresentados da tabela 16, é considerado a fase de berço ao portão das matérias-primas do concreto armado.

Tabela 16 – Emissões de CO₂ calculados pelo Software SimaPro.

	Extração/Produção	Transporte	Emissões Totais
Aço (kgCO ₂ /kg)	1,847109	0,125609	1,972718
Formas de Madeira (kgCO ₂ /m ²)	20,44	0,48	20,92
Concreto 20 MPa (kgCO ₂ /m ³)	330,174	8,786974	338,961
Concreto 35 MPa (kgCO ₂ /m ³)	401,4878	4,613494	406,1013

Fonte: O Autor

Os resultados apresentados na tabela 16, evidenciam a maior emissão de CO₂ está centrada na fase de extração/produção das matérias primas, componentes do concreto armado. Tais diferenças nos resultados das emissões de CO₂ obtidas do *Software* SimaPro, em relação aos resultados obtidos no cálculo manual, apresentados na tabela 13 e na tabela 14, acontecem devido ao *Software* considerar múltiplos fatores para o cálculo das emissões de CO₂, que no cálculo manual, não é considerado, como por exemplo, no transporte da matéria-prima, além de respeitar os quantitativos de diesel, é examinado as emissões devido ao uso dos pneus, dos óleos lubrificantes, do processo de fabricação dos componentes do caminhão, etc. Da mesma forma, considera-se as emissões de CO₂ em todo o processo de produção/beneficiamento da matéria-prima, nos mínimos detalhes, justificando a grande diferença nos resultados.

Através da tabela 17, que apresenta as contribuições percentuais das emissões de CO₂ nas fases de extração/produção em relação ao transporte, confirma tal evidência, destacando-se o concreto de 35 MPa, onde possui em seu traço, maior quantidade de aglomerante (cimento).

Tabela 17 – Contribuições percentuais dos materiais em relação ao transporte.

	Extração/Produção (%)	Transporte (%)
Aço	93,63	6,37
Formas de Madeira	97,69	2,31
Concreto 20 MPa	97,41	2,59
Concreto 35 MPa	98,86	1,14

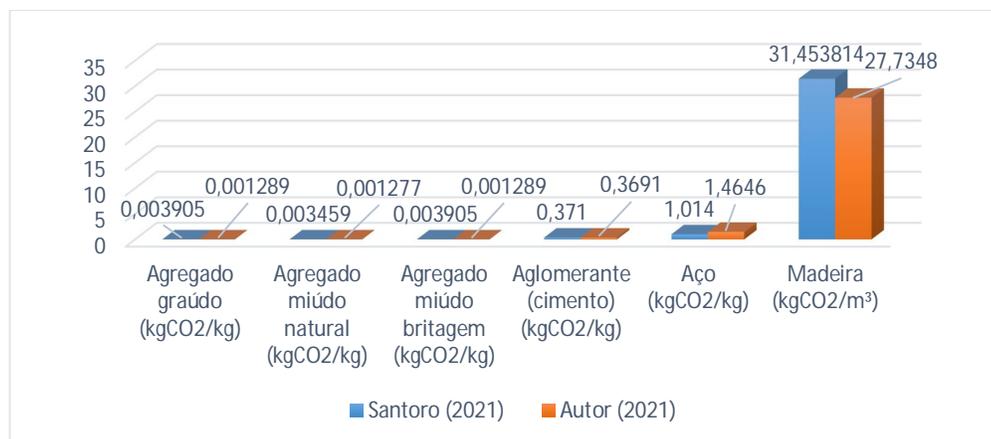
Fonte: O Autor

4.2 Comparativo dos resultados obtidos com os resultados do estudo de Santoro (2021)

Nesta seção, é feito o comparativo dos resultados obtidos neste estudo, com os resultados obtidos por Santoro (2021) para a região de Passo Fundo – RS. O comparativo dos resultados evidencia, que há variação dos resultados de região para região, influenciados por diversos fatores, tais como, distância de transporte, método de produção, tipo de veículo utilizado no transporte, e etc.

A figura 28 apresenta os resultados das emissões de CO₂ na extração/produção das matérias-primas componentes do concreto em kgCO₂/kg e kgCO₂/m³ para a madeira, obtidos pelo presente trabalho e por Santoro (2021).

Figura 28 – Comparativo das emissões de CO₂ na extração/produção das matérias-primas componentes do concreto.

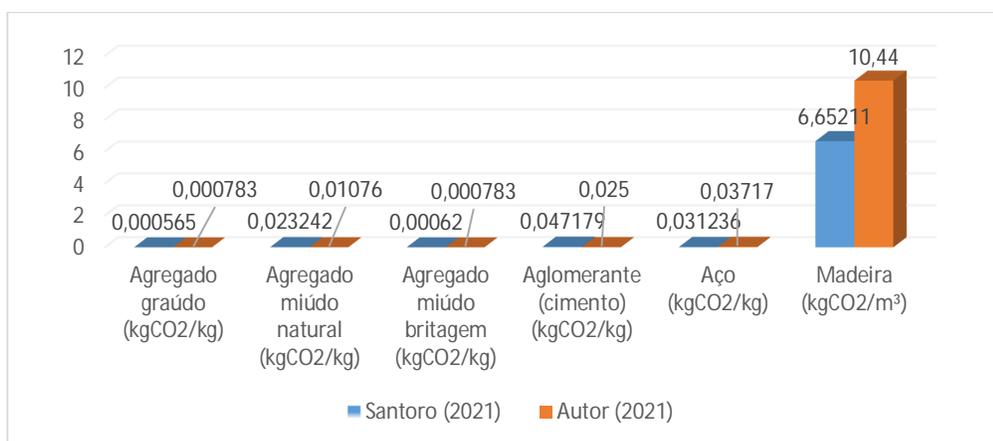


Fonte: O Autor

Com relação aos resultados apontados nessa apreciação comparativa, a análise mostra a variação das emissões de CO₂ de uma região para outra, destacando-se a extração/produção do agregado graúdo com variação de 67% entre a região de Chapecó - SC e de Passo Fundo - RS. Para a madeira a variação das emissões de CO₂ de uma região para outra, é de 12%, tal variação ocorre, devido ao método de extração das toras, do beneficiamento da madeira, do transporte das toras até a serra fita, entre outros.

Na figura 29, apresentam-se os resultados das emissões de CO₂ no transporte das matérias-primas componentes do concreto para a região de Chapecó – SC, obtidos pelo autor e para a região de Passo Fundo – RS, alcançados por Santoro (2021). Observa-se que as duas cidades são distantes apenas 180 km, o que comprova a grande influência de fatores locais, como distância dos insumos e especificidades da composição do material.

Figura 29 – Comparativo das emissões de CO₂ no transporte das matérias-primas componentes do concreto.

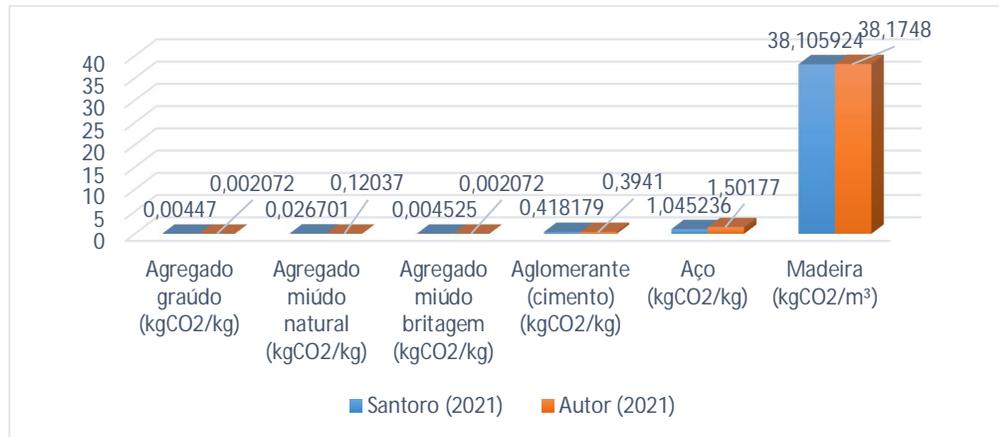


Fonte: O Autor

Conforme verificado nos resultados apontados nessa apreciação comparativa, o principal fator de influência nas emissões de CO₂, é a distância a percorrer da fábrica da matéria-prima componente do concreto, até a central dosadora de concreto, ou até a obra para o aço e a madeira. Para a matéria-prima cimento, a indústria onde é adquirida é a mesma para ambos os estudos, sendo que a distância de transporte é menor para Chapecó – SC e a emissão de CO₂ também sendo menor. Para a matéria-prima aço, a indústria onde é adquirida também, é a mesma para ambos os estudos, porém a distância de transporte é menor para Passo Fundo–RS, com a emissão de CO₂ menor comparado a Chapecó – SC.

Na figura 30, apresentam-se os resultados das emissões de CO₂ para as fases de extração/produção e transporte da matéria-prima, componente do concreto para a região de Chapecó – SC e Passo Fundo – RS.

Figura 30 – Comparativo das emissões de CO₂ na extração/produção e transporte das matérias-primas componentes do concreto.

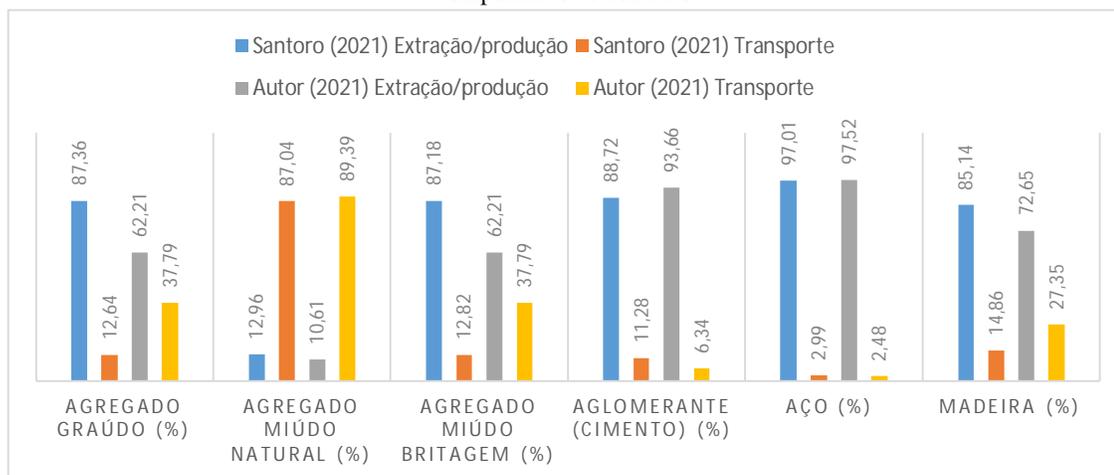


Fonte: O Autor

Com relação aos resultados apontados nessa apreciação comparativa, a análise mostra os resultados das emissões de CO₂ da madeira muito próximos desse estudo para o estudo de Santoro (2021), e resultados com grandes variações das emissões de CO₂, como o agregado graúdo, com variação de 54% e o agregado miúdo, com variação de 52% da região de Chapecó – SC para a região de Passo Fundo – RS.

A figura 31 apresenta as contribuições percentuais das emissões de CO₂ nas fases de extração/produção e transporte da matéria-prima componente do concreto para a região de Chapecó – SC e Passo Fundo – RS.

Figura 31 – Comparativo das emissões de CO₂ (em %) na extração/produção e transporte das matérias-primas componentes do concreto.

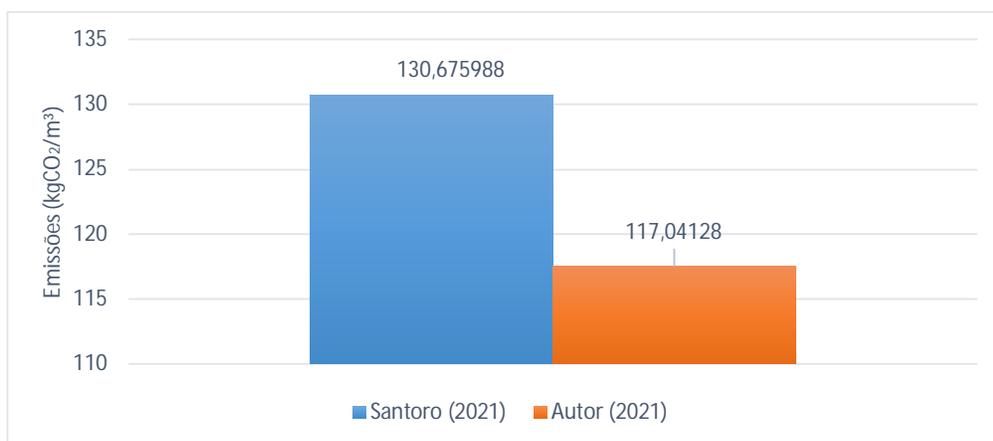


Fonte: O Autor

Conforme apurado na análise comparativa, o agregado graúdo é a matéria-prima que apresenta a maior variação nas contribuições percentuais de uma região para outra, sendo que no estudo de Santoro (2021), 87,36% das emissões de CO₂ é na fase de extração/produção, já para nesse estudo, 62,21% das emissões de CO₂ é na fase de extração/produção. Destaca-se o aço com emissão de CO₂ de aproximadamente 97% na fase de extração/produção e apenas 3% na fase de transporte.

A figura 32 apresenta os resultados das emissões de CO₂ para a produção de um metro cúbico de concreto de 20 MPa para a região de Chapecó – SC e Passo Fundo – RS.

Figura 32 – Emissões de CO₂ para a produção de um metro cúbico de concreto de 20 MPa.

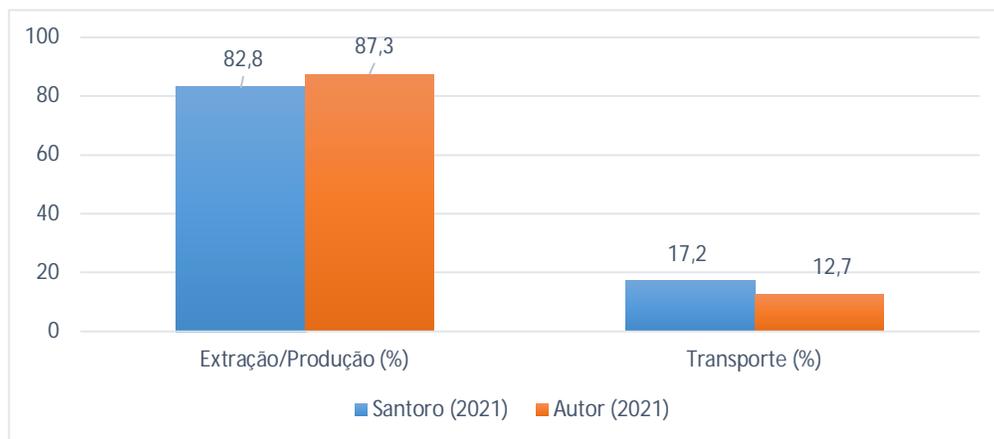


Fonte: O Autor

Na figura 32 pode-se observar que a maior emissão de CO₂ para 1,0 m³ de concreto de 20 MPa é para o estudo de Santoro (2021) para a região de Passo Fundo – RS. A variação das emissões de CO₂ da região de Passo Fundo – RS para a região de Chapecó – SC é de aproximadamente 10%, sendo diversos os fatores que influenciam no resultado das emissões de CO₂, como por exemplo, o traço do concreto, a quantidade de cimento, a distância de transporte, o tamanho do caminhão utilizado no transporte.

Na figura 33, apresentam-se as contribuições percentuais nas fases de extração/produção e transporte para a produção de 1,0 m³ de concreto de 20 MPa para as regiões de Chapecó – SC e Passo Fundo – RS.

Figura 33 – Contribuições percentuais para a produção de um metro cúbico de concreto de 20 MPa.

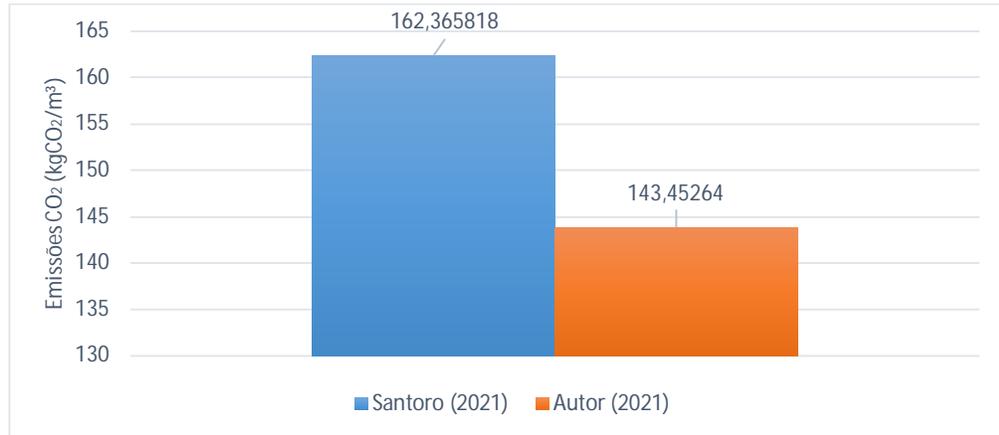


Fonte: O Autor

Os resultados apontados nessa apreciação comparativa, mostram que a porcentagem das emissões de CO₂ na fase de extração/produção possuem uma variação de aproximadamente 5% de uma região para outra, sendo que na fase de transporte a variação é de aproximadamente 26%.

A figura 34 apresenta as emissões de CO₂ para a produção de 1,0 m³ de concreto de 35 MPa para a região de Chapecó – SC obtidas no presente trabalho e Passo Fundo – RS (Santoro, 2021).

Figura 34 – Emissões de CO₂ para a produção de um metro cúbico de concreto de 35 MPa.

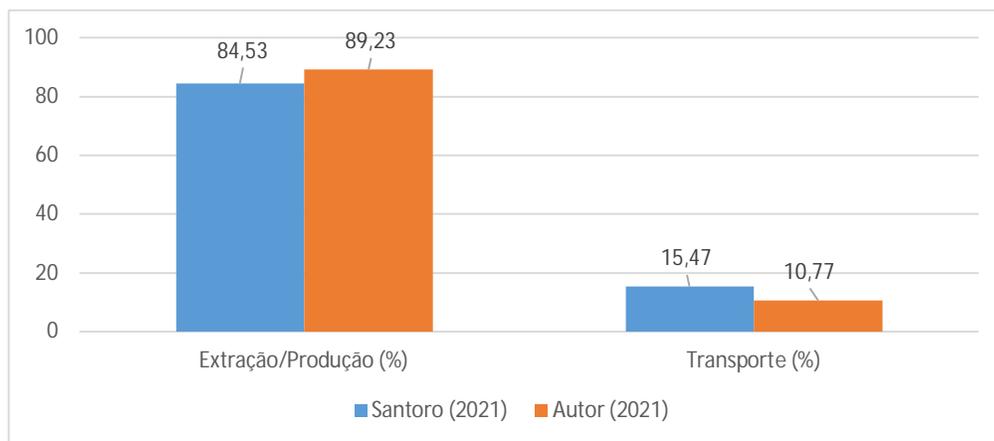


Fonte: O Autor

Na análise dos resultados apontados nessa apreciação comparativa, a maior emissão de CO₂ para a produção de 1,0 m³ de concreto é para a região de Passo Fundo – RS. A variação das emissões de CO₂ de uma região para outra é de aproximadamente 11%. Tais variações estão associadas a fatores como traço diferente do concreto de 35 MPa para cada região, distância de transporte, etc.

A figura 35 apresenta as contribuições percentuais de emissões de CO₂ nas fases de extração/produção e transporte da matéria-prima necessária para a produção de 1,0 m³ de concreto de 35 MPa para a região de Chapecó – SC e Passo Fundo – RS.

Figura 35 – Contribuições porcentuais para a produção de um metro cúbico de concreto de 35 MPa.

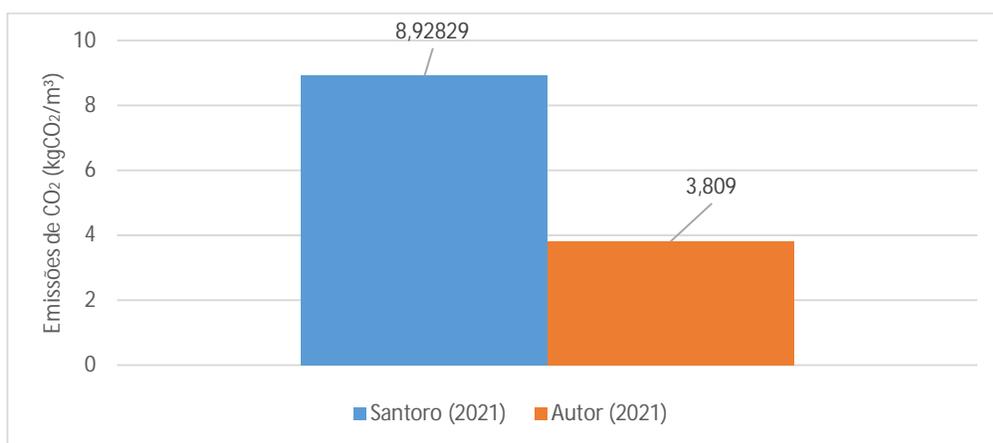


Fonte: O Autor

Conforme visto na análise comparativa, a maior contribuição percentual de emissão de CO₂ para a produção de 1,0 m³ de concreto de 35 Mpa, é na fase de extração/produção da matéria-prima, sendo responsável por 85,53% das emissões de CO₂ para a região de Passo Fundo – RS e 89,23% para a região de Chapecó – SC. As emissões de CO₂ na fase de transporte das matérias-primas necessárias para a fabricação de 1,0 m³ de concreto de 35 MPa são de 15,47% para a região de Passo Fundo – RS e 10,77% para a região de Chapecó – SC.

Na figura 36, apresentam-se as emissões de CO₂ na região de Chapecó – RS e Passo Fundo – RS para a produção do concreto na central dosadora, para o transporte do concreto da central dosadora até a obra e para o transporte vertical do concreto na obra.

Figura 36 – Emissões de CO₂ para a produção e transporte do concreto.



Fonte: O Autor

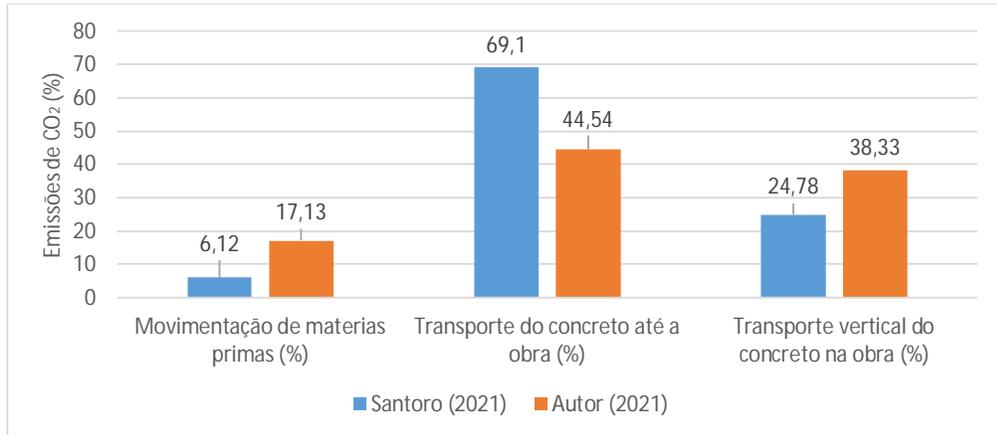
De acordo com os resultados apontados nessa apreciação comparativa, a análise mostra que segundo Santoro (2021), a emissão de CO₂ na produção do concreto na central dosadora, transporte do concreto da central dosadora até a obra e transporte vertical do concreto é de 8,92825 kgCO₂/m³ para a região de Passo Fundo – RS, já esse estudo apresenta que as emissões de CO₂ é de 3,809 kgCO₂/m³ para a região de Chapecó – SC.

Os números apresentados de uma região para outra são variáveis em aproximadamente 57%, influenciados por diversas particularidades de cada região, como por exemplo, o tipo de equipamento para movimentação do material na central dosadora, o volume de carga do caminhão para o transporte do concreto da central até a obra, a capacidade de bombeamento do equipamento para o transporte vertical do concreto na obra, entre outras.

Na figura 37, apresentam-se as contribuições percentuais para a produção do concreto na central dosadora e no transporte do concreto para as fases de movimentação das matérias-

primas na central, transporte do concreto da central dosadora até a obra e transporte vertical do concreto, para a região de Passo Fundo – RS e Chapecó – SC.

Figura 37 – Contribuições percentuais das emissões de CO₂ para a produção e transporte do concreto.

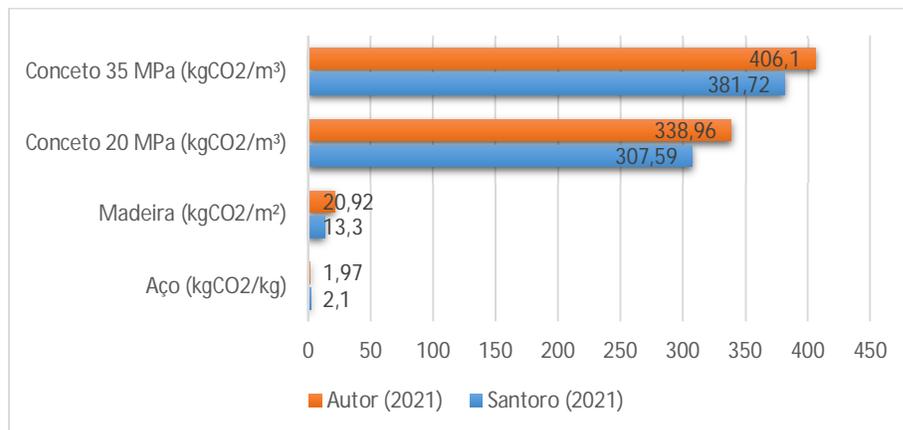


Fonte: O Autor

Os resultados apontados, mostram que a maior emissão de CO₂ nesta etapa é na fase de transporte do concreto da central dosadora até a obra. A movimentação interna dos materiais para a produção do concreto, representa a menor emissão de CO₂, sendo responsável por 6,12% para a região de Passo Fundo – RS e 17,13% para a região de Chapecó – SC.

A figura 38, apresenta as emissões de CO₂ para 1,0 m³ de concreto de 20 MPa e 35 MPa, 1,0 kg de aço e 1,0 m² de formas de madeira para a região de Chapecó – SC e Passo Fundo – RS, sendo tais resultados extraídos do *Software SimaPro*.

Figura 38 – Emissões de CO₂ extraídos do software SimaPro.

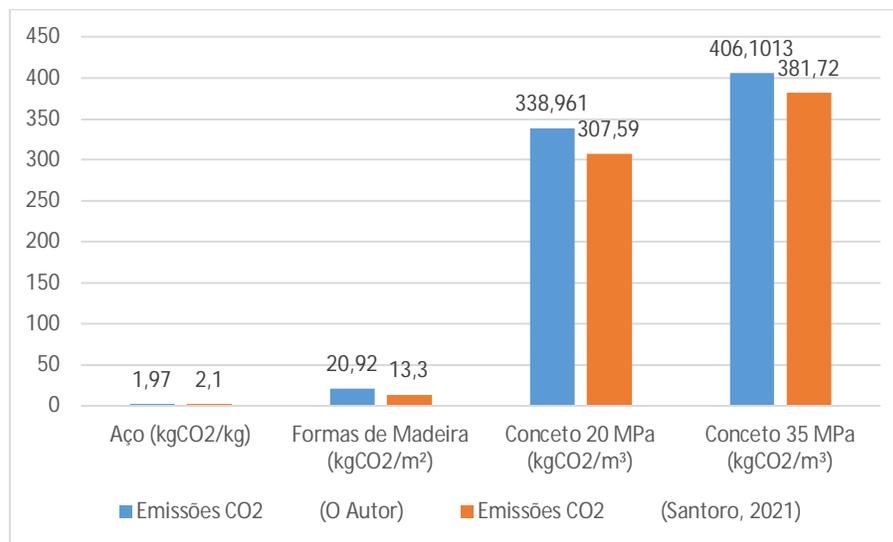


Fonte: O Autor

Na análise dos resultados, destaca-se a maior variação das emissões de CO₂ entre as regiões, para formas de madeira, apresentado variação de aproximadamente 36%, sendo a variação das emissões de CO₂ do concreto de 20 MPa, 35 MPa e o aço de a cerca 6%.

A figura 39 ilustra o comparativo dos resultados das emissões de CO₂ extraídos do *Software SimaPro* com a base de dados ajustada para cada região, para o aço, formas de madeira, concreto de 20 MPa e concreto de 35 MPa para as regiões de Passo Fundo – RS e Chapecó – SC.

Figura 39 – Comparativo das emissões de CO₂ para a região de Passo Fundo–RS e Chapecó–SC.



Fonte: O Autor

Com relação aos resultados apontados nessa apreciação comparativa, a análise mostra que as emissões de CO₂ para formas de madeira, apresentou uma variação do estudo de Santoro (2021) para o estudo do autor de aproximadamente 57%, enquanto que as emissões de CO₂ do aço apresentou uma variação acerca de 6%, justificando a teoria que as emissões de CO₂ variam de região para região, influenciadas por vários fatores, tais como, método de extração das matérias primas, método de industrialização/produção, tipo de transporte, distância de transporte, etc.

4.3 Dimensionamento otimizado de elementos estruturais

Nesta seção do estudo foi realizado o dimensionamento otimizado de pilares isolados com diferentes esforços atuantes, através do programa computacional desenvolvido por Bordignon e Kripka (2012) e atualizado em 2019, e o dimensionamento otimizado de seções transversais de vigas bi apoiadas, com diversos vãos livres através do *Software* desenvolvido por Junior e Kripka (2021).

O objetivo do dimensionamento ótimo é minimizar as emissões de CO₂ e os custos do concreto armado, visto que é usado maior quantidade para o concreto de menor resistência, sendo para melhor efeito comparativo e análise. Os materiais estruturais foram considerados em volume (m³) para o concreto, em peso (kg) para o aço e em metro quadrado (m²) para formas de madeira. Também neste item, foram feitas as análises comparativas dos resultados obtidos para o concreto de 20 MPa e 35 MPa, e o comparativo com os dados de Santoro (2021).

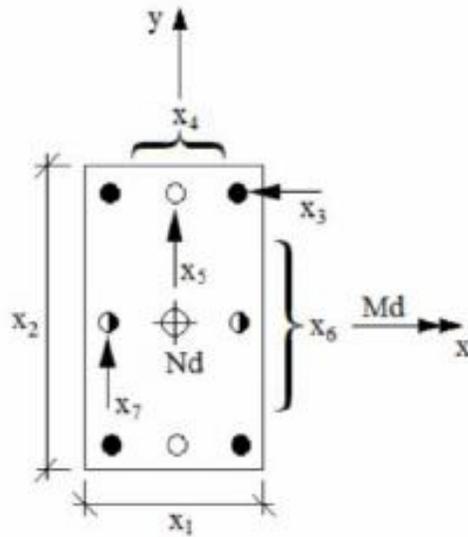
4.3.1 Dimensionamento otimizado de pilares isolados de concreto armado

Com o objetivo de minimizar custos e impactos ambientais, nesta etapa do estudo foi realizado o dimensionamento otimizado de pilares em concreto armado, submetidos a flexocompressão reta, através da utilização de um programa computacional desenvolvido por Bordignon e Kripka (2012), onde é empregado o método *Simulated Annealing* para a otimização associada a uma rotina de verificação da capacidade resistente dos pilares.

Considerando uma seção transversal retangular qualquer, o objetivo do dimensionamento ótimo é obter uma configuração que seja capaz de produzir esforços resistentes (N_{rd} e M_{rd}), iguais ou superiores aos esforços solicitantes (N_{sd} e M_{sd}), com o mínimo custo. A formulação do problema de otimização parte da consideração de alguns parâmetros de entrada, definidos previamente, representam os esforços atuantes no elemento (N_d e M_d) e as características e custos dos materiais. Esses parâmetros de projeto são informados e assumem valores fixos (Bordignon e Kripka, 2012).

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 40 (Bordignon, 2010).

Figura 40 – Variáveis de projeto da otimização de pilar.



Fonte: Bordignon (2010)

Para Bordignon (2010), a função objetivo ou custo vem a ser a função com as variáveis em que se busca encontrar um ponto que representa o mínimo custo ou impacto ambiental e, ao mesmo tempo, permita que a seção gerada resista aos esforços atuantes. Dessa forma, a função custo a ser minimizada no processo de otimização considera o custo total dos materiais (concreto, aço e formas de madeira), podendo ser expressa da seguinte forma:

$$f = (A_{con}) \cdot C_c + (A_{sTotal}) \cdot C_s + 2 \cdot (b + H) \cdot C_f \quad (7)$$

A primeira parcela da função, representa o custo do concreto, em que C_c é o custo por unidade de volume; o segundo representa o custo da armadura longitudinal, sendo C_s o respectivo por unidade de massa e considerando-se como peso específico do aço 7850 kg/m^3 . A última parcela representa o custo relativo as formas de madeira, onde C_f é o custo por unidade de área. Todos os custos fornecem um valor relativo para cada unidade de comprimento do elemento otimizado. Desta forma, pode-se definir a formulação final a ser empregada no processo como (Bordignon, 2010):

$$f(x) = (x_1 \cdot x_2) \cdot C_c + (4 \cdot x_3 + 2 \cdot x_4 \cdot x_5 + 2 \cdot x_6 \cdot x_7) \cdot C_s + 2 \cdot (x_1 + x_2) \cdot C_f \quad (8)$$

Ainda Bordignon (2010), descreve, que uma das principais restrições impostas ao problema de otimização refere-se ao critério de resistência, em que os esforços solicitantes, e a capacidade resistente da seção são relacionados entre si, possuindo o mesmo sinal e garantida a segurança por meio da satisfação dos critérios:

$$N_{rd} \geq N_{sd} \quad (9)$$

$$M_{rd} \geq M_{sd} \quad (10)$$

x_1 e x_2 – são variáveis discretas representadas pelos intervalos:

$$x_1 \in [19, 20, \dots, 200]$$

$$x_2 \in [19, 20, \dots, 1000]$$

Sendo os valores superiores suficientemente grandes, de modo a não interferir na solução ótima. As variáveis x_4 e x_6 (número de barras nas duas camadas paralelas a x_1 e número de camadas com duas barras paralelas a x_2 , respectivamente) assumem valores inteiros de 0 a 10.

x_3, x_5 e x_7 – são variáveis que representam as barras longitudinais, restritas aos seguintes diâmetros (mm):

$$x_3, x_5 \text{ e } x_7 \in [10.0, 12.5, 16.0, 22.0, 25.0, 32.0, 40.0]$$

Portando, as restrições podem ser descritas da seguinte forma:

$$g_1 = 1 - \frac{N_{rd}}{N_{sd}} \leq 0 \quad (11)$$

$$g_2 = 1 - \frac{M_{rd}}{M_{sd}} \leq 0 \quad (12)$$

$$g_3 = 1 - \frac{b}{b_{min}} = 1 - \frac{x_1}{19} \leq 0 \quad (13)$$

$$g_4 = 1 - \frac{b_{max}}{b} = 1 - \frac{200}{x_1} \leq 0 \quad (14)$$

$$g_5 = 1 - \frac{h}{h_{min}} = 1 - \frac{x_2}{19} \leq 0 \quad (15)$$

$$g_6 = 1 - \frac{h_{max}}{h} = 1 - \frac{1000}{x_2} \leq 0 \quad (16)$$

$$g_7 = 1 - \frac{5b}{h} = 1 - \frac{5x_1}{x_2} \leq 0 \quad (17)$$

$$g_8 = 1 - \frac{e}{e_{min}} \leq 0 \quad (18)$$

$$g_9 = 1 - \frac{e_{max}}{e} \leq 0 \quad (19)$$

$$g_{10} = 1 - \frac{\rho}{\rho_{min}} \leq 0 \quad (20)$$

$$g_{11} = 1 - \frac{\rho_{max}}{\rho} \leq 0 \quad (21)$$

Para atender as restrições, é utilizada a técnica das funções de penalização, na qual os problemas com restrição são transformados em problemas irrestritos, acrescentando-se à função $f(x)$ uma função de penalidade $P(x)$, a qual considera um fator de penalização r que multiplica o conjunto das restrições não atendidas $g(x)$, de forma simples.

Dessa forma, a função penalizada $f(x)$ pode ser escrita como:

$$F(x) = f(x) + P(x) \quad (22)$$

$$P(x) = \sum r |g(x)| \quad (23)$$

Com base na formulação para dimensionamento ótimo de pilares, visando a minimização das emissões de CO₂ e os custos, foram otimizadas quatro seções de pilares com esforços atuantes e crescentes, conforme tabela 18.

Tabela 18 – 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

O resultado do dimensionamento otimizado das seções dos pilares propostos para os concretos com resistências características de 20 MPa e 35 MPa, é apresentado na tabela 19, onde o valor das emissões é dado em kgCO₂/m de pilar.

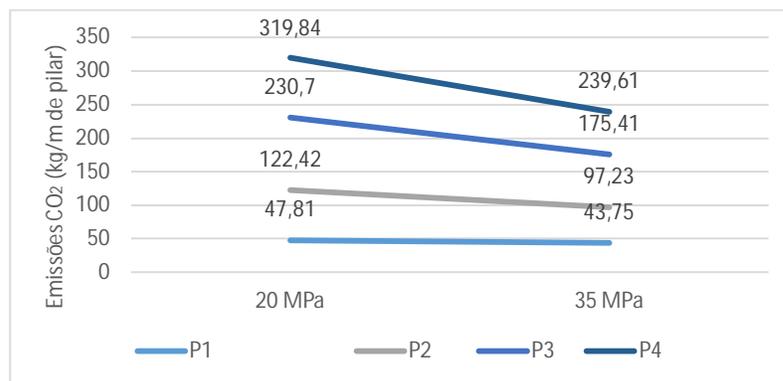
Tabela 19 – Emissões de CO₂ dos pilares em concreto armado otimizados (kgCO₂/m de pilar).

	P1	P2	P3	P4
20 MPa	47,81	122,42	230,7	319,84
35 MPa	43,75	97,23	175,41	239,61

Fonte: O Autor

Na figura 41, apresenta-se os resultados na forma gráfica do dimensionamento otimizados das seções dos pilares com resistência do concreto de 20 MPa e 35 MPa.

Figura 41 – Emissões de CO₂ do dimensionamento otimizado dos pilares em concreto armado.



Fonte: O Autor

Ao analisar a figura 41, nota-se que as emissões de CO₂ diminuem progressivamente com o aumento da resistência do concreto para todos os pilares, com todos os valores dos esforços atuantes, indicando a maior viabilidade para o impacto ambiental, o concreto de maior resistência, no caso o concreto de 35 MPa, que emite aproximadamente 30 % menos CO₂ em relação ao concreto de 20 MPa.

A tabela 20, apresenta as contribuições percentuais das emissões de CO₂ dos materiais para os pilares otimizados. As contribuições percentuais são dadas em %/m de pilar, para os quatro pilares otimizados, sendo a relação das resistências do concreto utilizado (concreto de 20 MPa e 35 MPa), com os materiais utilizados (concreto, aço e formas de madeira).

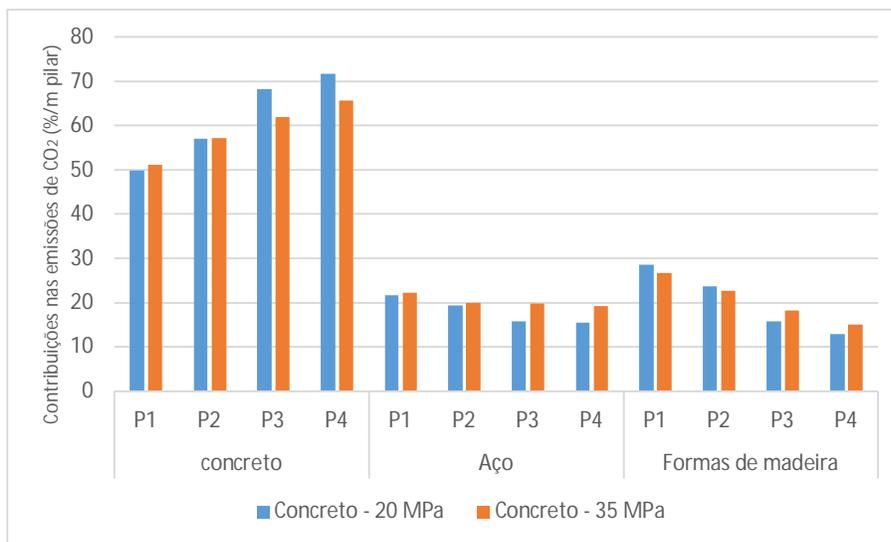
Tabela 20 – Contribuições percentuais das emissões de CO₂ dos materiais para os pilares otimizados (%/m).

	Concreto				Aço				Formas de madeira			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
Concreto - 20 MPa	49,84	56,98	68,23	71,65	21,64	19,36	15,84	15,5	28,52	23,66	15,93	12,85
Concreto - 35 MPa	51,15	57,13	61,93	65,69	22,15	20,09	19,72	19,28	26,7	22,78	18,35	15,03

Fonte: O Autor

A figura 42, apresenta as contribuições percentuais dos materiais (concreto, aço e madeira) para os pilares otimizados. Os resultados são expressos em %/m de pilar, para todos os materiais.

Figura 42 – Contribuições percentuais das emissões de CO₂ dos materiais para os pilares otimizados (%/m).

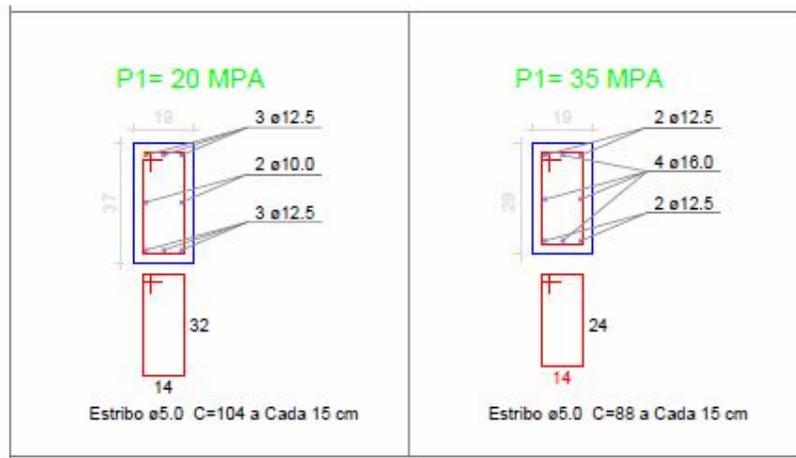


Fonte: O Autor

Com relação aos resultados apresentados nessa figura, a análise mostra que as contribuições percentuais do concreto tendem a serem crescentes na medida que os esforços atuantes aumentam, já para o aço e formas de madeira as contribuições percentuais tendem a diminuir na medida que os esforços atuantes aumentam.

A figura 43, ilustra o comparativo das seções do pilar P1 dimensionado com ênfase na sustentabilidade ambiental com o concreto de 20 MPa e 35 MPa.

Figura 43 – Comparativo das seções otimizadas do pilar P1 em relação as emissões de CO₂.



Fonte: O Autor

Diante dos resultados apontados nessa apreciação comparativa, a análise mostra que o pilar P1 dimensionado com concreto de 35 MPa apresenta seções menores comparado ao pilar P1 dimensionado com concreto de 20 MPa, entretanto a área de aço do pilar P1 de 35 MPa é maior comparado ao pilar P1 de 20 MPa, evidenciando para este estudo a menor emissão de CO₂ para o P1 com concreto de 35 MPa.

Para a avaliação dos custos do concreto armado dos pilares e vigas otimizadas, foi realizada o levantamento dos preços unitários do concreto de 20 MPa, 35 MPa, aço CA50/CA60 e formas de madeira com base no preço de mercado para a região de Chapecó – SC, com referência para o mês de novembro de 2021, sendo os valores apresentados em reais (Real Brasileiro).

Os valores listados na tabela 21, apresentam as seguintes características: concreto entregue na obra com utilização de bomba de recalque até o nível da forma de madeira da estrutura; aço entregue na obra sem limite mínimo do pedido; madeira entregue na obra sem

limite mínimo do pedido e com o tamanho das peças de madeira de acordo com a necessidade da obra.

Tabela 21 – Custo unitário dos materiais.

Material	Custos
Concreto - 20 MPa	412,00 R\$/m ³
Concreto - 35 MPa	465,00 R\$/m ³
Aço - CA50 / CA60	8,36 R\$/kg
Formas de madeira	51,74 R\$/m ²

Fonte: O Autor

A tabela 22, apresenta o custo unitário (R\$/m de pilar) dos pilares de concreto armado otimizados, com resistências de 20 MPa e 25 MPa.

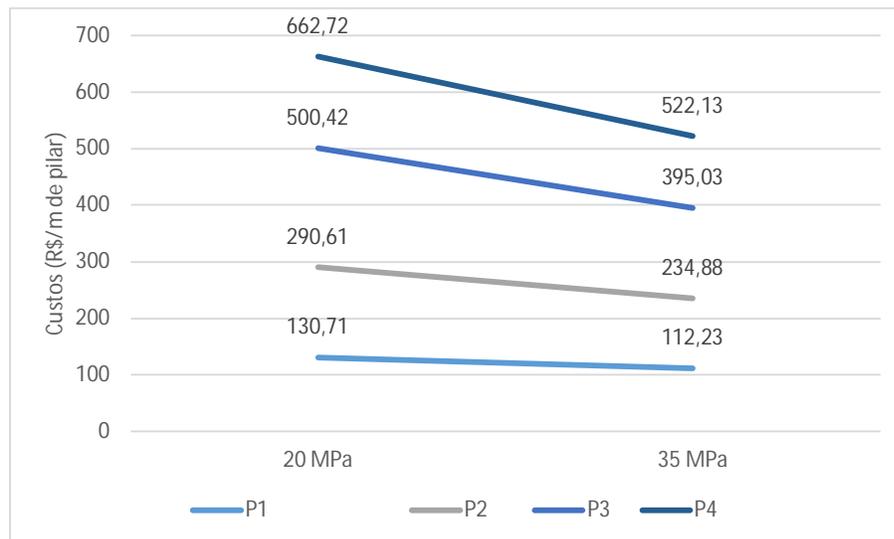
Tabela 22 – Custo unitário dos pilares (R\$/m de pilar).

	P1	P2	P3	P4
20 Mpa	130,71	290,61	500,42	662,72
35 Mpa	112,23	234,88	395,03	522,13

Fonte: O Autor

Na figura 44, apresenta-se a análise gráfica dos custos dos pilares otimizados para os concretos de 20 MPa e 35 MPa.

Figura 44 – Custos dos pilares otimizados para o concreto de 20 MPa e 35 MPa.



Fonte: O Autor

Conforme verificado nos resultados apresentados na figura 44, na medida em que aumenta a resistência do concreto, diminui-se o custo dos pilares para todos os pilares com esforços atuantes diferentes, mesmo o concreto de 20 MPa tendo valor de mercado menor que o concreto de 35 MPa, não significa que a estrutura de concreto armado será a de menor custo.

Na tabela 23, apresentam-se as contribuições percentuais dos materiais no custo dos pilares otimizados, para o concreto de 20 MPa e 35 MPa.

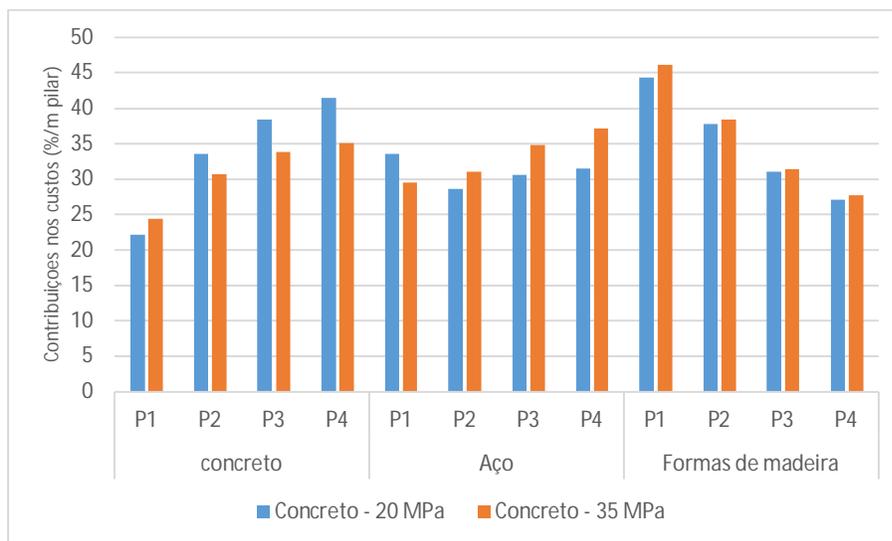
Tabela 23 – Contribuições percentuais dos materiais no custo dos pilares otimizados.

	Concreto				Aço				Formas de madeira			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
Concreto - 20 MPa	22,16	33,58	38,4	41,47	33,51	28,68	30,58	31,52	44,33	37,74	31,02	27,01
Concreto - 35 MPa	24,41	30,69	33,79	35,08	29,49	30,98	34,77	37,17	46,1	38,33	31,44	27,75

Fonte: O Autor

A figura 45 apresenta a análise gráfica das contribuições percentuais dos materiais no custo dos pilares otimizados com resistências de 20 MPa e 35 MPa.

Figura 45 – Contribuições percentuais dos materiais no custo dos pilares.



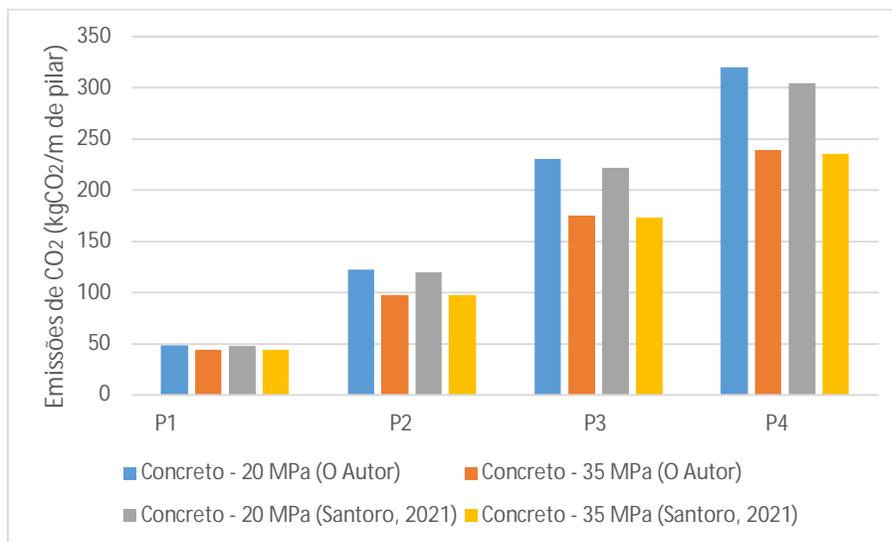
Fonte: O Autor

Na análise dos resultados apontados nessa figura, as contribuições percentuais dos materiais no custo dos pilares, aumentam na medida que os esforços atuantes aumentam, para

as formas de madeira as contribuições percentuais no custo dos pilares diminuem na medida que os esforços atuantes no pilar aumentam.

A figura 46, ilustra a análise comparativa dos resultados do dimensionamento otimizado de pilares com ênfase nas emissões de CO₂ para o estudo do Autor e de Santoro (2021).

Figura 46 – Comparativo dos resultados do dimensionamento otimizado de pilares com ênfase nas emissões de CO₂.

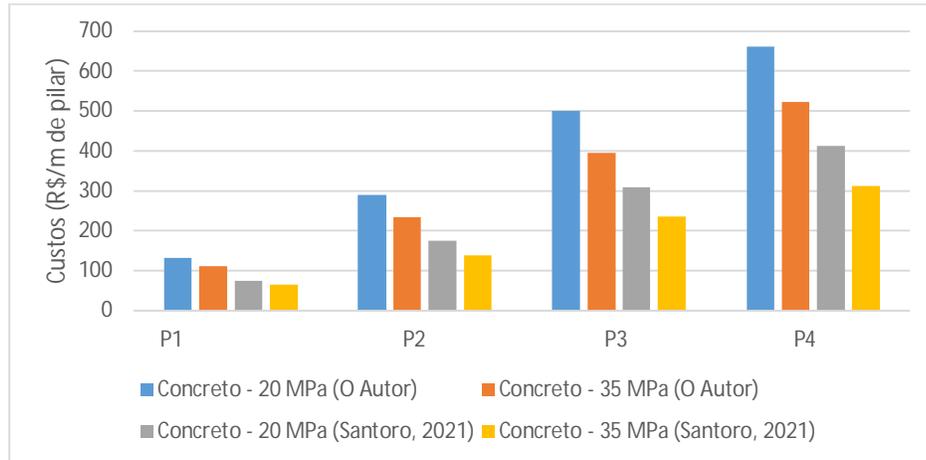


Fonte: O Autor

Com relação aos resultados apontados nessa apreciação comparativa, a análise mostra que o concreto de 35 MPa para pilares, emite em média 30% menos CO₂ que o concreto de 20 MPa para este estudo, já para o estudo de Santoro (2021) a emissão de CO₂ é na média 26% menor ao utilizar o concreto de 35 MPa para os pilares. Apesar dos resultados serem diferentes de um estudo para outro, a análise de comparação, esclarece que os resultados seguem a mesma tendência para ambos os estudos.

Na figura 47, é apresentado o comparativo dos resultados do dimensionamento otimizado de pilares com ênfase no custo, para esse estudo em relação ao estudo de Santoro (2021).

Figura 47 – Comparativo dos resultados do dimensionamento otimizado de pilares com ênfase no custo.

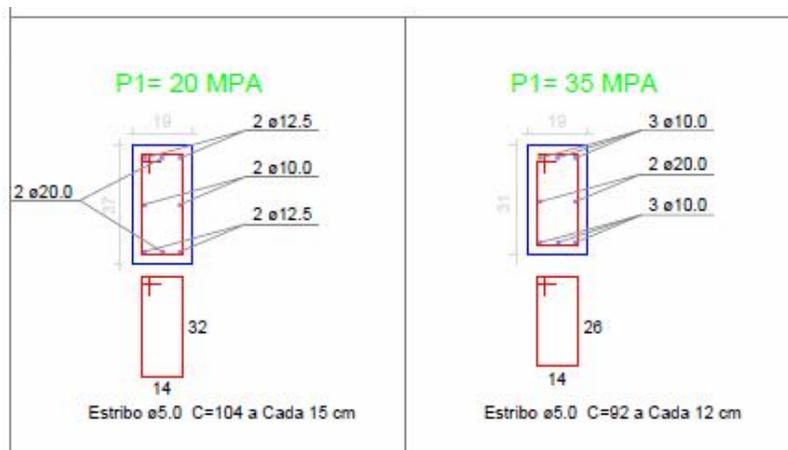


Fonte: O Autor

Os resultados apontados neste parecer comparativo, para ambos os estudos, mostram que o concreto de 35 MPa é o mais viável economicamente. As respostas desse estudo, mostram que ao utilizar o concreto de 35 MPa a economia média é de aproximadamente 25%, já para o estudo de Santoro (2021) a economia média é de aproximadamente 29%. A análise gráfica, evidencia ainda, que a tendência para ambos os estudos é a mesma, apesar de os custos serem diferentes de uma região para outra, e também são diferentes, devido a data de cotação dos preços de um estudo para outro.

Na figura 48, apresenta-se o comparativo das seções do pilar P1, dimensionado com concreto de 20 MPa e 35 MPa com ênfase na otimização em relação ao custo.

Figura 48 – Comparativo das seções otimizadas do pilar P1 em relação ao custo.



Fonte: O Autor

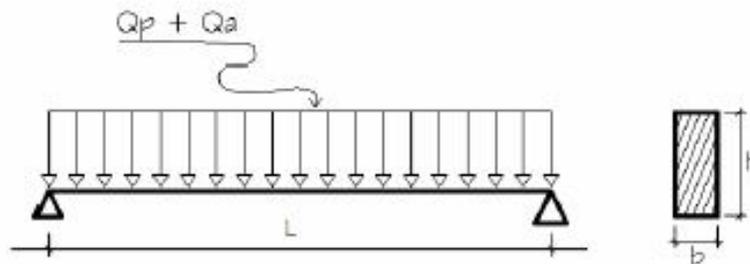
Na análise dos resultados apontados nessa apreciação comparativa, as seções do pilar P1 com concreto de 35 MPa são menores comparado com as seções do pilar P1 com concreto de 20 MPa, sendo também menor a área de aço do pilar P1 com concreto de 35 MPa, evidenciando para este estudo, que ao utilizar o concreto de 35 MPa, o custo do pilar é menor comparado ao pilar com concreto de 20 MPa.

4.3.2 Otimização de vigas em concreto armado com ênfase na minimização dos impactos ambientais e dos custos

Para a efetuação do dimensionamento otimizado das vigas em concreto armado, utilizou-se o *Software* desenvolvido por Junior e Kripka (2021). O método utilizado no *Software* é de uma variante do *Harmony Search*, uma metaheurística inspirada no processo de improvisação musical do Jazz, denominada *Modified Improved Harmony*. O dimensionamento ótimo das vigas em concreto armado é obtido através das variáveis de projeto, sendo as dimensões da seção transversal, posição e diâmetro da armadura. As restrições aplicadas são os estados limites últimos e aos estados limites de utilização da norma Brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014).

Neste estudo, foram dimensionadas vigas biapoiadas com vão livre (L) de 3,0 metros a 10,0 metros, com acréscimo de 0,5 metros. Para pré-dimensionamento da altura inicial (h) das vigas foi definido como sendo um decimo de seu vão livre, as cargas permanentes (Q_p) foi definida em 9,5 kN/m e as cargas acidentais (Q_a) em 2,0 kN/m, conforme ilustrado na figura 49.

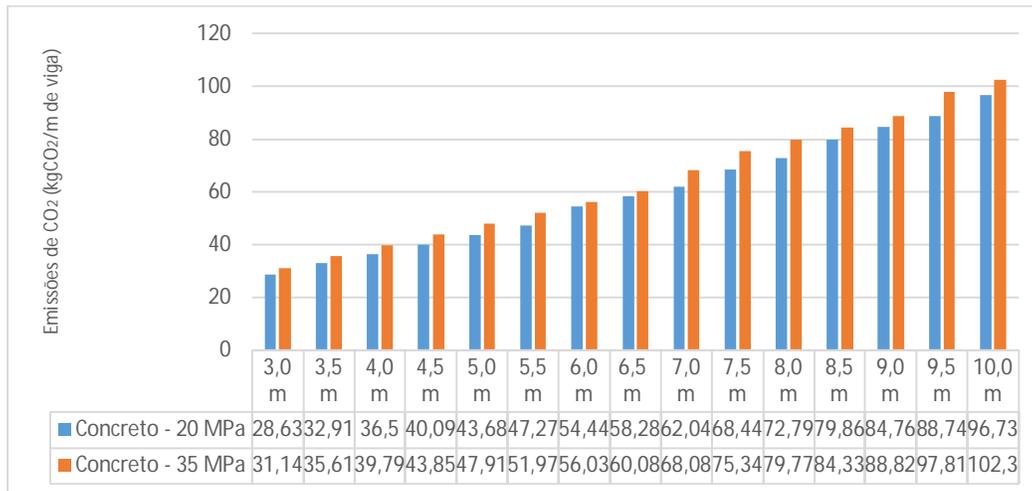
Figura 49 – Modelo de viga biapoiada para o estudo.



Fonte: Santoro (2021)

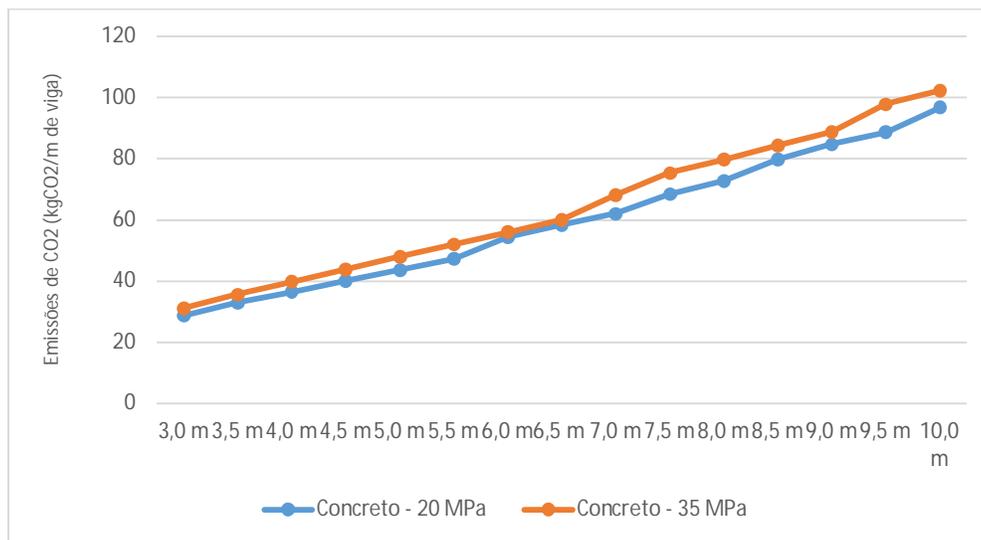
Na figura 50 e 51 é apresentado o resultado do dimensionamento otimizado das vigas em concreto armado biapoiadas com vãos variando de 3,0 metros a 10,0 metros, visando o resultado ótimo em relação as emissões de CO₂.

Figura 50 – Emissões de CO₂ das vigas biapoiadas em concreto armado.



Fonte: O Autor

Figura 51 – Comparativo das emissões de CO₂ para vigas biapoiadas em concreto armado com resistências de 20 MPa e 35 MPa.



Fonte: O Autor

Na análise dos resultados apontados nas figuras 50 e 51, as emissões de CO₂/m de viga, aumentam progressivamente, conforme aumenta o vão da viga, todavia na análise comparativa

da figura 51, é possível afirmar que para este estudo o concreto de 20 MPa é o mais viável ambientalmente, pois emite 7,5 % menos CO₂ que o concreto de 35 MPa.

Na tabela 24, é apresentado as seções das vigas obtidas a partir do dimensionamento otimizado, com ênfase na viabilidade ambiental.

Tabela 24 – Seções das vigas para os concretos de 20 MPa e 35 MPa.

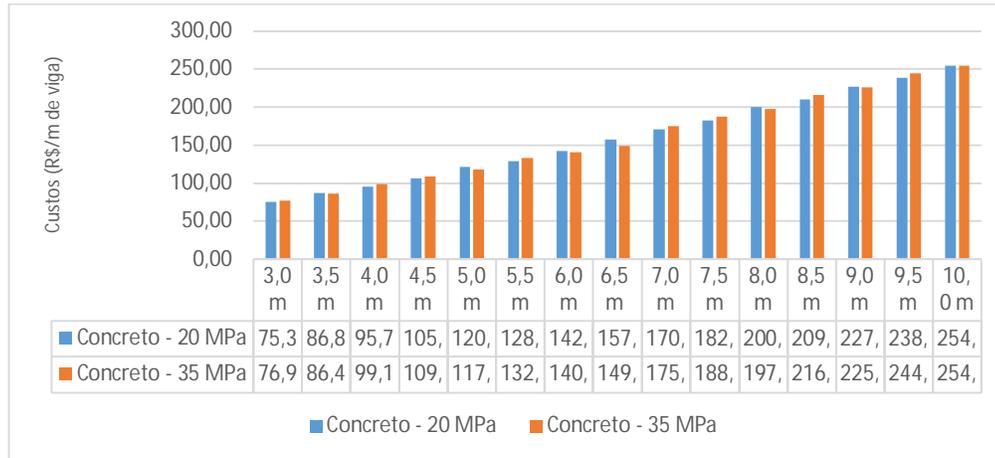
	Concreto 20 MPa	Concreto 35 MPa
vão (cm)	seção (cm)	seção (cm)
300	15X30	16x25
350	14X30	16x30
400	14X35	14x35
450	14X40	14x40
500	14X45	14x45
550	14X50	14x50
600	14X65	14x55
650	15X55	14x60
700	15X60	15x60
750	14X75	15x65
800	15X70	14x80
850	14X90	15x75
900	15X85	15x80
950	15X90	15x90
1000	15X100	15x95

Fonte: O Autor

A análise comparativa da tabela 24, comprova que para a maioria das vigas com concreto de 20 MPa, utiliza-se maior volume de concreto, entretanto, o resultado ótimo do dimensionamento, depende de variáveis como as emissões de CO₂ do aço, concreto e formas de madeira, e das cargas aplicadas no elemento estrutural.

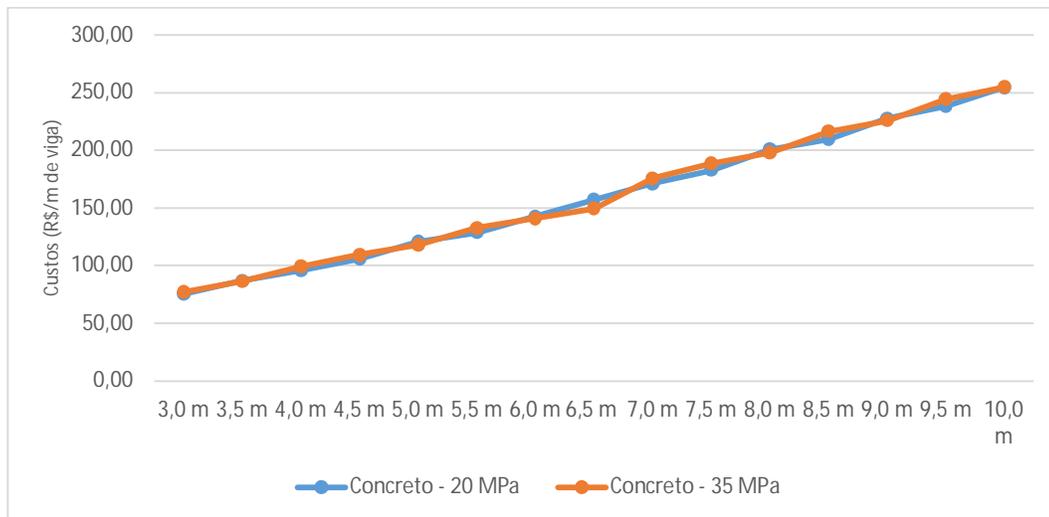
Nas figuras 52 e 53, são apresentados os resultados do dimensionamento otimizado das vigas em concreto armado biapoiadas, com vãos variando de 3,0 metros a 10,0 metros, visando o resultado ótimo em relação ao custo.

Figura 52 – Custos das vigas bi apoiadas em concreto armado.



Fonte: O Autor

Figura 53 – Comparativo dos custos das vigas bi apoiadas em concreto armado de 20 MPa e 35 MPa.



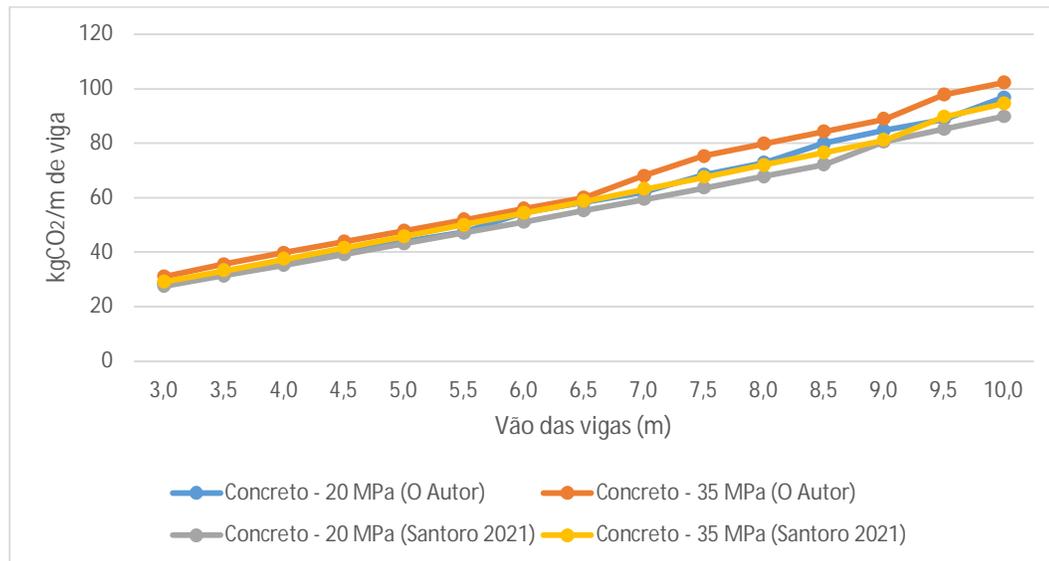
Fonte: O Autor

Com relação aos dados apontados nas figuras 52 e 53, a análise mostra que os custos aumentam progressivamente com o aumento dos vãos das vigas, sendo que, a apreciação comparativa da figura 53, mostra que o concreto de 35 MPa é o mais viável economicamente somente para os vãos de vigas biapoiadas de 6,5 metros, 8,0 metros e 9,0 metros.

Na média geral deste estudo, é possível afirmar que o custo para ambos os concretos é equivalente. Cabe destacar que, ao contrário dos impactos ambientais, os custos relativos dos materiais, podem variar de forma significativa numa mesma região ou em períodos diferentes.

Na figura 54. Apresenta-se o comparativo dos resultados do dimensionamento otimizado de vigas, com ênfase nas emissões de CO₂ para esse estudo, correlacionado ao estudo de Santoro (2021).

Figura 54 – Comparativo do dimensionamento otimizado de vigas com ênfase nas emissões de CO₂.

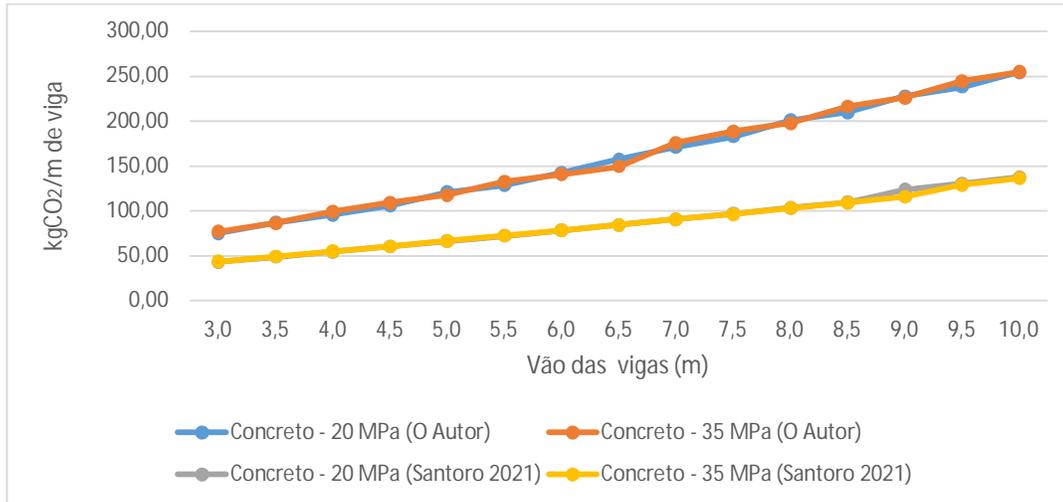


Fonte: O Autor

Na análise dos resultados apresentados nessa apreciação comparativa, para ambos os estudos, na medida que aumenta o vão da viga, aumenta as emissões de CO₂. No comparativo das práticas, a média dos resultados desse estudo aponta que ao utilizar o concreto de 20 MPa para vigas a emissão de CO₂ é aproximadamente 7,5% menor em relação a utilização do concreto de 35 MPa, para as investigações de Santoro (2021) a média dos resultados apontam que o concreto de 20 MPa emitem aproximadamente 5,50% menos CO₂ em relação ao concreto de 35 MPa. O gráfico ainda apresenta, que a tendência dos resultados para os dois estudos é a mesma, e ressaltando que tais diferenças nos resultados podem ser influenciadas devido ao uso de programas de cálculo de otimização diferentes em ambos.

A figura 55, ilustra o comparativo dos resultados do dimensionamento otimizado de vigas com ênfase no custo, para esse estudo em relação ao estudo de Santoro (2021).

Figura 55 – Comparativo do dimensionamento otimizado de vigas com ênfase no custo.



Fonte: O Autor

Esta análise comparativa, apresenta a mesma tendência dos resultados para ambos os estudos. Os resultados apresentados apontam que o custo das vigas utilizando o concreto de 20 MPa é idêntico com a utilização do concreto de 35 MPa, tanto para um estudo, como para o outro. O gráfico ainda apresenta, que o custo médio das vigas é 90% maior que o do estudo de Santoro (2021), tal fato dá-se devido ao período diferente da realização dos estudos.

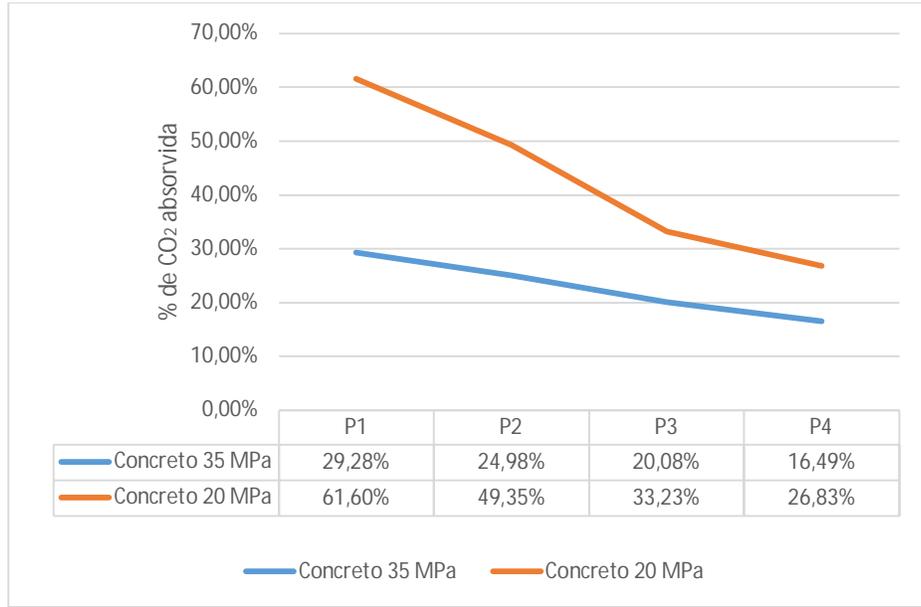
4.4 Cálculo da carbonatação dos elementos estruturais

Com base na metodologia de cálculo de carbonatação apresentada por Felix e Possan (2018), a carbonatação foi calculada através das equações 5 e 6. A primeira etapa do cálculo é a determinação da profundidade de carbonatação média do concreto (equação 5) e a segunda etapa do cálculo, é a determinação da captura de CO₂ devido a carbonatação do concreto (equação 6).

Para o cálculo da profundidade da carbonatação é imprescindível considerar as condições de exposição da estrutura e as características do concreto, conforme tabela 1, tabela 2 e tabela 3. A estrutura foi considerada como construída em ambiente urbano protegida da chuva, com umidade média anual de 70% e com teor de CO₂ de 0,04%, sendo que a estrutura é em concreto aparente e sem pintura. Ainda, é respeitada a vida útil da estrutura de 50 anos e utilizou-se concreto com resistência a compressão de 20 MPa e 35 MPa, empregando cimento CP II – F – 32.

A figura 56, apresenta a porcentagem de CO₂ absorvido durante a vida útil dos pilares relacionados às emissões de CO₂, para fabricar os pilares em concreto armado, otimizados conforme capítulo anterior.

Figura 56 – Captura de CO₂ durante a vida útil dos pilares dimensionados com concreto de 20 MPa e 35 MPa.

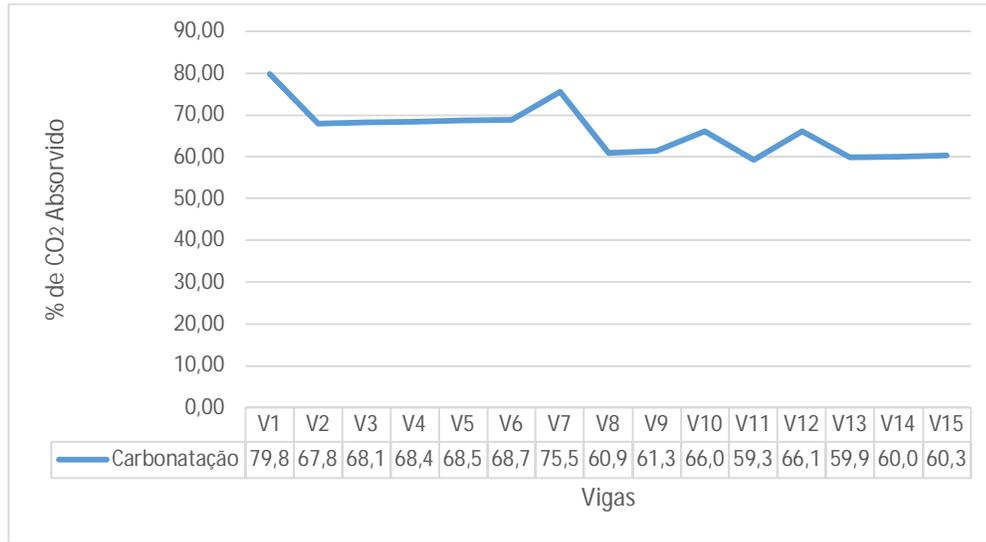


Fonte: O Autor

A carbonatação média para os pilares dimensionados com concreto de 20 MPa é de aproximadamente 42%, o que consiste em dizer que os elementos estruturais (pilares) absorvem aproximadamente 42% do CO₂ emitido durante todo o seu processo de fabricação. Os pilares dimensionados com concreto de 35 MPa absorvem aproximadamente em média 22% do CO₂ emitido durante todo o processo de sua fabricação. O aumento da resistência a compressão do concreto faz com que a profundidade de carbonatação do concreto diminua, como consequência, a quantidade de CO₂ absorvida pelo elemento estrutural também diminui.

Na figura 57, apresentam-se a carbonatação para as vigas em concreto armado, dimensionadas com concreto de 20 MPa.

Figura 57 – Captura de CO₂ durante a vida útil das vigas dimensionados com concreto de 20 MPa.

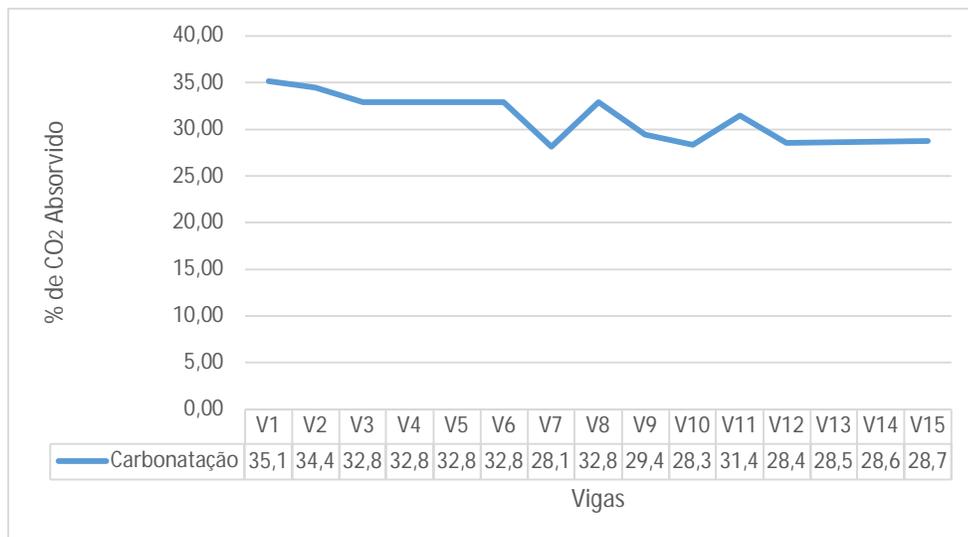


Fonte: O Autor

Os resultados apontados na figura 57, destacam que a absorção média de CO₂ para as vigas em concreto armado dimensionadas com concreto de 20 MPa durante sua vida útil (50 anos), é de aproximadamente 66%.

A figura 58, apresenta os resultados do cálculo da carbonatação para as vigas em concreto armado, dimensionadas com concreto de 35 MPa.

Figura 58 – Captura de CO₂ durante a vida útil das vigas dimensionados com concreto de 35 MPa.

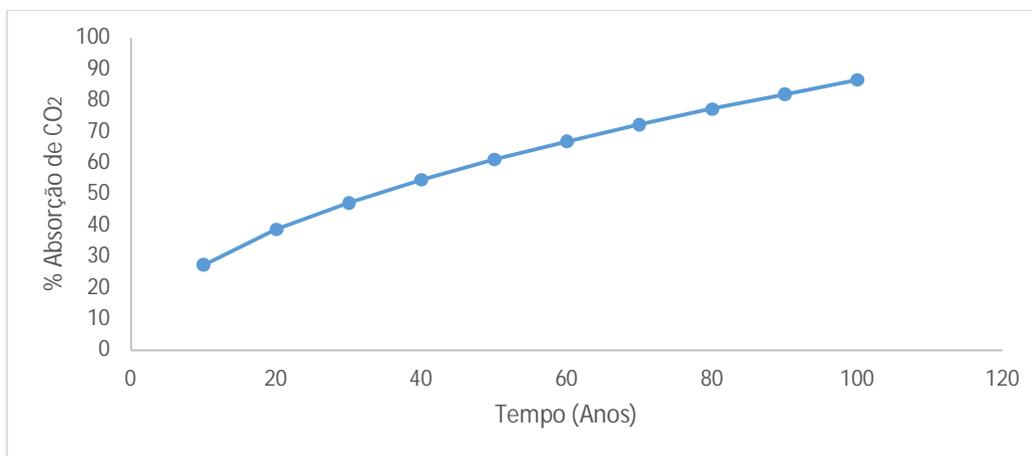


Fonte: O Autor

A análise da figura 58, apresenta que as vigas dimensionadas em concreto de 35 MPa absorvem em média 31% do CO₂ emitido em todo o seu processo de fabricação. Tais resultados demonstram menor captação de CO₂ para os concretos com maior resistência a compressão. Para este estudo, os resultados de carbonatação para pilares e vigas, apresentam variação, tal fato dá-se, principalmente à área de exposição do elemento estrutural, pois, quanto maior for a área exposta, maior será a absorção de CO₂ pela estrutura.

Na figura 59, é apresentado a carbonatação da viga com vão de 6,50 metros, dimensionada com concreto de 20 MPa e vida útil variando de 10 a 100 anos.

Figura 59 – Carbonatação da viga em concreto armado para vida útil de 10 a 100 anos.

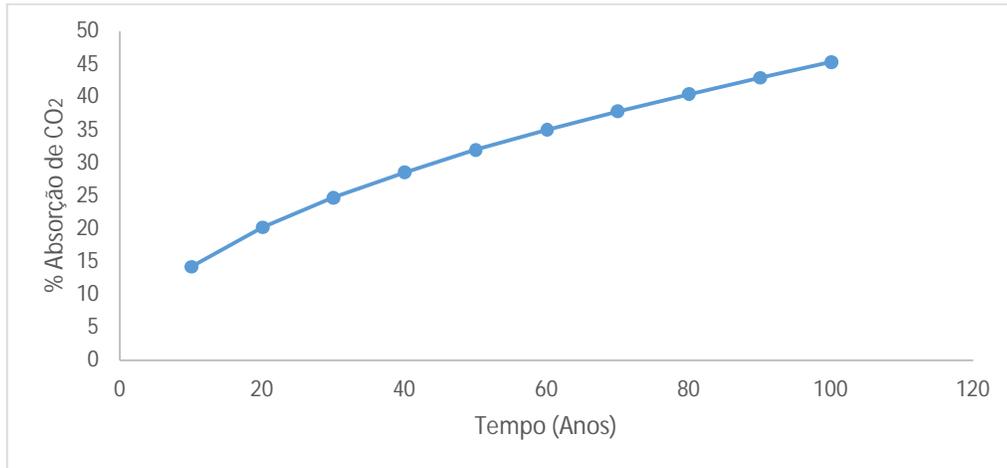


Fonte: O Autor

Analisando a figura 59, nota-se que, quanto maior for a vida útil da estrutura maior será a absorção de CO₂ da atmosfera, não significando que a carbonatação será constante ao longo do tempo, mas o volume total se dá pelo acumulo de volume da absorção de CO₂ na vida útil da estrutura.

A figura 60 apresenta a carbonatação da viga com vão de 6,50 metros, dimensionada com concreto de 35 MPa e com vida útil variando de 10 a 100 anos.

Figura 60 – Carbonatação da viga em concreto armado para vida útil de 10 a 100 anos.

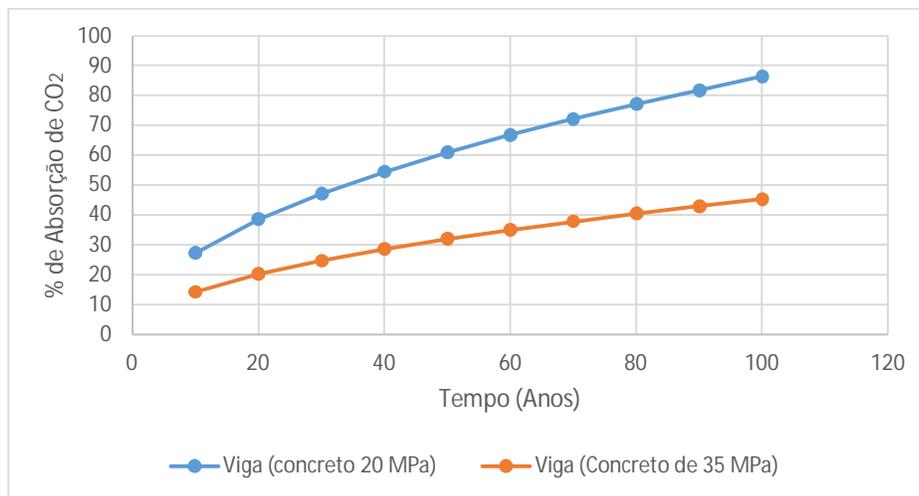


Fonte: O Autor

Através da análise da figura 60, a captura de CO₂ é durante toda a vida útil da estrutura de concreto armado, pois quanto maior a vida útil da estrutura de concreto armado, maior é a captura de CO₂. Para a vida útil de 50 anos, o elemento estrutural (viga) absorve aproximadamente 32% do CO₂ emitido durante todo o seu processo de fabricação, já para a vida útil de 100 anos, o elemento estrutural (viga) absorve cerca de 45% do CO₂ emitido durante todo o seu processo de fabricação.

A figura 61 ilustra o comparativo da carbonatação para a viga com vão de 6,50 metros, dimensionada com concreto de 20 MPa e 35 MPa e a vida útil variando de 10 a 100 anos.

Figura 61 – Comparativo da carbonatação da viga com vão de 6,50 m para vida útil variando de 10 a 100 anos, dimensionada em concreto de 20 MPa e 35 MPa.



Fonte: O Autor

Na análise dos resultados apontados, a viga de 6,50 m dimensionada com concreto de 35 MPa, apresenta menor absorção de CO₂ durante sua vida útil em aproximadamente 30% em relação a viga com vão de 6,50 m dimensionada com concreto de 20 MPa. Tais resultados evidenciam a comprovação de que em concretos com maior resistência, a compressão absorve menos CO₂ da atmosfera.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo, objetivou analisar as emissões de dióxido de carbono (CO₂) do concreto armado nas fases de extração/produção e transporte das matérias-primas, componentes do concreto e na produção e transporte do concreto até a obra, buscando subsídios aos projetistas, para minimizar os impactos ambientais e o custo, através do dimensionamento otimizado das estruturas em concreto armado. Paralelamente, foram comparados os resultados obtidos neste estudo com os resultados atingidos no estudo de Santoro (2021), na sequência foi avaliado a influência da carbonatação nas estruturas de concreto armado, ao longo de seu ciclo de vida.

Para isso, determinou-se a região de estudo, os responsáveis pela extração, a produção e transportes das matérias-primas componentes do concreto, até sua utilização. Em seguida, realizou-se a coleta de dados e a determinação das emissões de CO₂ para cada matéria-prima, e para a produção de 1,0 m³ de concreto com resistência a compressão de 20 MPa e 35 MPa, sendo na etapa seguinte, utilizando o *Software* SimaPro com a base de dados ajustado para região em estudo, calculando-se as emissões de CO₂, onde, através destes resultados, realizou-se o dimensionamento otimizado dos elementos estruturais em concreto armado (pilares e vigas), com ênfase nos aspectos ambientais e econômicos. Confrontando com os resultados obtidos neste estudo, realizou-se o comparativo com os resultados do estudo de Santoro (2021). Na sequência foi calculada a carbonatação dos elementos estruturais em concreto armado (pilares e vigas) obtidos através do dimensionamento otimizado, e avaliado o quanto estes absorvem de CO₂ ao longo de sua vida útil.

Com o estudo realizado é possível concluir que:

- O uso de dados para a avaliação do impacto ambiental deve ser de acordo com a região em estudo, para a obtenção de resultados precisos para aquela região;
- As emissões de CO₂ são menores para os concretos de menor resistência a compressão, é necessário a utilização de traços com menor volume de aglomerante (cimento), pois é a matéria-prima com maior contribuição nas emissões de CO₂ para a produção do concreto;
- Para minimizar as emissões de CO₂ na etapa de extração/produção das matérias-primas componentes do concreto deve-se modernizar o processo produtivo, com implemento

de equipamentos menos poluentes, que utilizem energias renováveis e que haja a reutilização ou reciclagem de materiais que são descartados;

- Para minimizar as emissões de CO₂ na etapa de transporte das matérias-primas componentes do concreto, é preciso reduzir a distância de transporte, através da seleção de fornecedores próximos ao destino final da matéria-prima, utilizar veículos que cujo o consumo de combustível é menor e a capacidade de carga maior, como por exemplo, os veículos elétricos;
- Utilizar concretos de maior resistência a compressão para os pilares, e de menor resistência a compressão para vigas, obtendo nessa configuração estruturas em concreto armado menos poluentes;
- Ao minimizar o impacto ambiental da estrutura em concreto armado, estará minimizando o custo da estrutura, menor volume de material, menor emissão de CO₂, conseqüentemente menor custo;
- A carbonatação pode ser relevante para a construção civil, podendo ser considerada como fator de comparação nas escolhas para projetos estruturais, visando a durabilidade, o menor custo, o menor impacto ambiental e a maior absorção de CO₂. Observou-se que, os concretos de menor resistência, além de possuírem menor quantidade de cimento, também correspondem ao maior grau de carbonatação.

Por fim, com base nas análises e resultados obtidos, sugere-se para estudos futuros, a utilização de outras metodologias para o cálculo da carbonatação do concreto, bem como da avaliação demais categorias de impacto ambiental para o concreto armado, com resistências características do grupo I (resistências características à compressão entre 20 e 50 MPa). Apesar de aplicado ao município de Chapecó – SC, a metodologia apresentada, pode também ser empregada em outras regiões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14041**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Definição de objetivo e escopo e análise de inventário. Rio de Janeiro, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014.

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

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

AL-TAMIMI, A. K.; IBRAHIM, A.; AL-SUGHAIYER, N. **Evaluation of sustainability of multistory reinforced concrete structure**. Physics Procedia. V. 55, p. 445-450, 2014.

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

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2017 – Aço**. Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostraimagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=9687>
Acesso em 02 nov. 2020.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2017 – Areia para Construção**. Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostraimagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=9689>
Acesso em 02 nov. 2020.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2017 – Brita e Cascalho**. Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostraimagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=9691>
Acesso em 02 nov. 2020.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2017 – Cimento**. Disponível em:

<https://sistemas.dnppm.gov.br/publicacao/mostraimagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=9693>
Acesso em 02 nov. 2020.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. **Quarto Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Processos Industriais, Produção de Metais, Ferro e Aço.** Brasília, DF, 2017.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. **Quarto Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Processos Industriais, Produtos Minerais, Produção de cimento.** Brasília, DF, 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Segundo inventário Brasileiro de Emissões Atmosféricas por Veículo Automotores Rodoviários.** Brasília, DF, 2014.

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.** Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Área de Concentração em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia – Instituto de Arquitetura e Urbanismo da universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

BORDIGNON, R; **Otimização de pilares retangulares em concreto armado submetidos à flexocompressão reta.** 2010. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Meio Ambiente), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo - RS, 2010.

BORDIGNON, R.; KRIPKA, M. **Projeto ideal de pilares de concreto armado submetidos à compressão flexural uniaxial.** Computadores e concreto. 9, p. 327-340, 2012.

CARVALHO, S. Z.; VERNILLI, F.; ALMEIDA, B.; OLIVEIRA, M. D.; SILVA, S. N. **Reducing environmental impacts: the use of basic oxygen furnace slag in Portland cement.** J. Clean. Prod. 172, p. 385-390, 2018.

CABELLO, J. F.; GARCIA, E. F.; CAMARA, E. M.; PARTE, M. P. DE LA. **Sensitivity analysis of life cycle assessment to select reinforced concrete structures with one-way slabs.** Engineering Structures. V. 132, p. 586-596, 2017.

CAMPOS, E. F.; **Emissão de CO2 da madeira serrada da Amazônia: O caso da exploração convencional.** 2012. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 2012.

CHEVALIER, J. L.; PEUPORTIER, B. **Life cycle assessment methodologies in the construction sector: From research to current application:** International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction, July 10-12, Nantes, France, 2012.

EKOLU, S. O. **A review on effects of curing, sheltering, and CO₂ concentration upon natural carbonation of concrete.** Construction and Building Materials. V. 127, p. 306-320, 2016.

EKOLU, S. O. **Implications of global CO₂ emissions on natural carbonation and service lifespan of concrete infrastructures – Reliability analysis.** Cement and concrete composites. V. 114, 2020.

FELIX, E. F.; POSSAN, E. **Modeling the carbonation front of concrete structures in the marine environment through ANN.** IEEE Lat. Am. Trans. V. 16. p. 1772-1779, 2018.

GAJDA, J.; MILLER, F. **Concrete as a sink for atmospheric carbon dioxide: a literature review and estimation of CO₂ absorption by Portland Cement Concrete.** PCA. ReD Serial no. 2255, Chicago, 2000.

GUTIERREZ, A. SAGASTUME; J. J. CABELLO ERAS; C. A. GAVIRIA; J. VAN CANEGHEM; C. VANDECASTEELE. **Improved selection of the functional unit in environmental impact assessment of cement.** F. Clean. Prod, 168, p. 463-473, 2017.

GUINÉE, J. B.; **Life Cycle Assessment: past, present and future:** International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction, July 10-12, Nantes, France, 2016.

GOOGLE MAPS, como chegar. Disponível em: <https://maps.google.com.br/> Acesso em 03 jan. 2022.

HASIK, V.; ESCOTT, E.; BATES, R.; CARLISLE, S.; FAIRCLOTH, B.; BILEC, M. M. **Comparative whole-building life cycle assessment of renovation and new construction.** Building and Environment. V. 161, 2019.

HASELBACH, L.; THOMAS, A. **Carbon sequestration in concrete sidewalk.** Construction and Building Materials, 2014

JACBSEN, S; JAHREN, P. **Binding of CO₂ by carbonation of Norwegian OPC concrete.** In: CANMET/ACI International Conference on Sustainability and Concrete Technology, Lyon, 2002.

JOANNA, P. S., PARVATI, T. S.; ROOBY, J.; PREETHA, R. **A study on the flexural behavior of sustainable concrete beams with high volume fly ash.** Material Today: Proceedings. June 2020.

JUNIOR, F. L. T., KRIPKA, M.; **Modified improved harmony search applied to reinforced concrete beams.** CILAMCE-PANACM, Rio de Janeiro, 2021.

- KARSTENSEN, M. H.; **Formação e emissão de POPs pela indústria de cimento, fundação para a pesquisa científica e industrial da Noruega: World Business Council for Sustainable Development – Cement Sustainable Initiative [Edição Brasileira Fundação Christiano Ottoni (FOC)/ Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)], 2006.**
- KRIPKA, M., KRIPKA, R. M. L., OLIVEIRA NETO, L.; **Determinação do posicionamento ótimo de apoio de pontes.** *Ciência e Engenharia*, v. 22, n. 22, p. 23-36, 2013.
- LI, H.; DENG, Q; ZHANG, J.; XIA, B.; SKITMORE, M. **Assessing the life cycle CO2 emissions of reinforced concrete structures: Four cases from China.** *Journal of Cleaner Production*. Shanxi Xian, China, v. 210, p. 1496-1506, 2019.
- MACIEL, M. A. D.; **Levantamento de inventário de emissões de gases de efeito em obra da indústria da construção civil em Maringá – PR.** 2016. 116 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Limpas), UNICESUMAR – Centro Universitário de Maringá, Maringá - PR, 2016.
- MAJHI, R. K.; NAYAK, A. N. **Production of sustainable concrete utilising high-volume blast furnace slag and recycled aggregate with lime activator.** *Journal of Cleaner Production*. August 2019.
- MEDEIROS G. F., KRIPKA M. **Algumas aplicações de métodos heurísticos na otimização de estruturas.** *Revista CIATEC-UPF*. V. 4, p. 19-32, 2012.
- MEDEIROS G. F., KRIPKA M., **Otimização de pilares de concreto armado de acordo com diferentes parâmetros de avaliação de impacto ambiental.** *Eng. Struct.*, 59 (2014), pp. 185 - 194.
- NIDHEESH, P. V.; KUMAR, M. SURESH. **An overview of environmental sustainability in cement and steel production.** *J. Clean. Prod.* 231, p. 856-887, 2019.
- NAVARRO, I.; YEPES, V.; MARTÍ, J. V. **A Review of Multicriteria Assessment Techniques Applied to Sustainable Infrastructure Design.** *Advances in Civil Engineering*. Valência, Espanha, v. 2019, 2019.
- OLIVEIRA, A. S. **Análise Ambiental da Viabilidade de Seleção de Produtos da Construção Civil Através da ACV e do Software BEEs 3.0.** 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia: Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- PAVAN, A. L. R. **Avaliação de impactos do ciclo de vida no Brasil: Desenvolvimento de fatores de caracterização regionais para serviços ecossistêmicos relacionados à qualidade**

do solo. 2019. 190f. Tese (Doutorado) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, 2019.

PASSUELO, A. C. B.; OLIVEIRA, A. F. DE; COSTA, E. B. DA; KIRCHHEIM, A. P. **Aplicação da avaliação do ciclo de vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos.** Ambiente Construído, Porto Alegre, V. 14, n.4, p. 7-20, out. /dez. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

PADE, C.; GUIMARÃES, M. **The CO₂ uptake of concrete in a 100-year perspective.** Cement and Concrete Research, vol. 47, n. 9, p. 1384-1356, 2007.

PENADÉS-PLÀ, V.; GARCÍA-SEGURA, T.; YEPES, V. **Accelerated optimization method for low-embodied energy concrete box-girder bridge design.** Engineering Structures, v. 179, n. June 2018, p. 556-565, 2019.

PEDROSO, D. E., **Aproveitamento do rejeito de minério de ferro em compósitos para a construção civil.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

POSSAN, E.; THOMAZ, W. A.; ALEANDRI, G. A.; FELIX, E. F. DOS SANTOS, A. C. **CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: a case study.** Case Stud. Constr. Mater., V.6, p. 147-161, 2017.

ROHDEN, A. B.; GARCEZ, M. R. **Increasing the sustainability potential of a reinforced concrete building through design strategies: case study.** Case Studies in Construction Materials. V. 9, 2018.

RAJAN, R. G.; SAKTHIESWARAN, N.; BABU, O. G. **Experimental investigation of sustainable concrete by partial replacement of fine aggregate with treated waste tyre rubber by acidic nature.** Material Today: Proceedings. May 2020.

ROBERTS, M.; ALLEN, S.; COLEY, D. **Life cycle assessment in the building design process – A systematic literature review.** Building and Environment. V. 185, 2020.

STOIBER, N.; HAMMERL, M.; KROMOSER, B.; **Cradle-to-gate life cycle assessment of CFRP reinforcement for concrete structures: Calculation basis and exemplary application.** Journal of Cleaner Production. v. 280, January 2020.

SANTORO, J. F.; **Determinação de Parâmetros Ambientais para o Dimensionamento Otimizado de Estruturas em Concreto Armado.** 2015. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Meio Ambiente), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo - RS, 2015.

SANTORO, J. F.; **Subsídios para a minimização do impacto ambiental de estruturas em concreto armado**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Passo Fundo, Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura, Passo Fundo - RS, 2021.

SimaPro Pré Consultants. Disponível em <https://simapro.com/>. Acesso em: 15 dez. 2021.

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

TRINTA, R. P. B., **Caracterização do clínquer e comportamento físico-mecânico do cimento**. Dissertação (Mestrado em engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – RJ, 2019.

VENTURA, A.; **Life Cycle Assessment, in-between Reseach, Standards, Regulations and Application**: International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction, July 10-12, Nantes, France, 2012.

VERMA, S. K.; SINGLA, C. S.; NADDA, G.; KUMAR, R., **Development of sustainable concrete using sílica fume and stone dust**, Material Today: Proceedings. Febuary 2020.

VOGELE, S.; GRAJEWSKI, M.; GOVORUKHA, K.; RUBBELKE, D. **Challenges for the European steel industry: analysis, possible consequences and impacts on sustainable development**. Appl Energy, 264, p. 114633, 2020.

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

ZENG, R., CHINI, A.; **A review of research on embodied energy of buildings using bibliometric analysis**. Energy and Buildings, v.155, p.172-184, 2017.



UPF
UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

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