

# Avaliação comparativa das emissões de estruturas **em concreto armado** produzidas no sul do Brasil

**MOACIR KRIPKA** - DR. PROF. - <https://orcid.org/0000-0002-1997-3414> (mkripka@gmail.com) ;  
**PAULO CEZAR VITORIO JUNIOR** - DR. PROF. - <https://orcid.org/0000-0003-4109-0834> – UTFPR-PB  
**JEFERSON JUNIOR ALIEVI** - MESTRE/ENG. - <https://orcid.org/0000-0003-2139-7134> – UPF  
 **- DR. PROF. - <https://orcid.org/0000-0002-3396-2666> – IFSul**

## RESUMO

**O** ARTIGO APRESENTA UMA AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> ASSOCIADAS À PRODUÇÃO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO NAS CIDADES DE CHAPECÓ-SC E PASSO FUNDO-RS, CONSIDERANDO A ABORDAGEM DO BERÇO AO PORTÃO. FORAM ANALISADOS DOIS TRAÇOS DE CONCRETO (20 MPa E 35 MPa) COM BASE EM DADOS REGIONAIS E SEUS IMPACTOS FORAM QUANTIFICADOS POR MEIO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) COM O USO DO SOFTWARE SIMAPRO. RESULTADOS MOSTRAM QUE CONCRETOS COM MENOR RESISTÊNCIA GERAM MENOS EMISSÕES POR M<sup>3</sup> DEVIDO AO MENOR TEOR DE CIMENTO. QUANDO CONSIDERADO O DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL, O CONCRETO DE 35 MPa SE MOSTRA MAIS VANTAJOSO PARA PILARES APÓS OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL. JÁ, PARA VIGAS, O TRAÇO DE 20 MPa APRESENTA MENOR IMPACTO. AS DIFERENÇAS REGIONAIS INFLUENCIAM OS RESULTADOS, ESPECIALMENTE, NOS INSUMOS E TRANSPORTE. CONCLUI-SE QUE A ESCOLHA ADEQUADA DO TRAÇO, ASSOCIADA À OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL, PODE

REDUZIR O IMPACTO AMBIENTAL DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO.

**PALAVRAS-CHAVE:** CONCRETO ARMADO, EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>, AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA, OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL, ESTRUTURAS, SUSTENTABILIDADE.

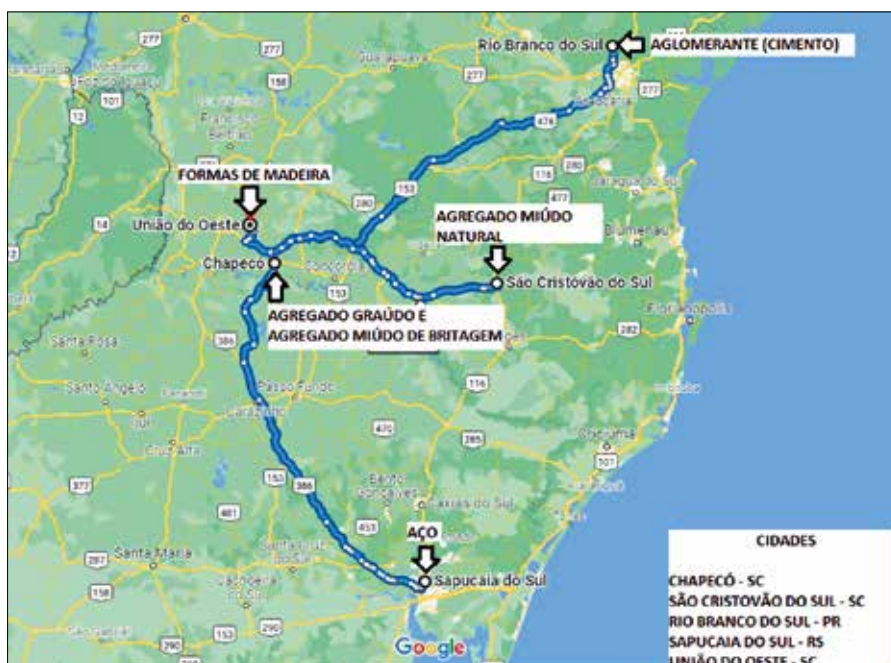
## 1. INTRODUÇÃO

As atividades ligadas à construção civil respondem por aproximadamente 21% das emissões globais de gases de efeito estufa e consomem cerca de 40% dos recursos

naturais do planeta, incluindo 15% da água doce disponível (Cabeza, L.F. *et al.*, 2023). Dentre os diversos materiais utilizados, ganha destaque o concreto armado, amplamente utilizado devido à sua versatilidade, resistência e baixo custo de execução, mas que apresenta elevado potencial de emissão de CO<sub>2</sub>, principalmente pela produção de cimento Portland e pelo uso intensivo de agregados e aço para armaduras.

Devido ao esgotamento dos recursos naturais e às crescentes mudanças climáticas,

tem-se buscado a quantificação dos impactos ambientais produzidos pelos materiais e produtos a partir da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), através da qual se pode avaliar os diversos impactos desde a extração dos materiais até o fim de vida, passando pelas fases de produção e utilização. Paralelamente, técnicas de otimização estrutural podem ser empregadas para reduzir o consumo de materiais e custos, mantendo o atendimento às exigências normativas e promovendo



**FIGURA 1**  
 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS  
 FONTE: GOOGLE MAPS (2025)

estruturas mais sustentáveis. Estudos anteriores apresentam critérios e parâmetros otimizados para o projeto sustentável de estruturas como edificações (Santoro e Kripka, 2024) e pontes (Tres Junior *et al.*, 2023), entre outras. No entanto, as aplicações geralmente são específicas para um país ou região, o que pode gerar discrepâncias nos resultados ao não refletir as condições próprias à realidade local. Comparações entre diferentes regiões são escassas, mesmo sendo essenciais para compreender variações logísticas, de matriz energética, de processo construtivo e de mercado.

Este artigo objetiva investigar o impacto produzido pelos materiais envolvidos na produção de estruturas de concreto armado, considerando as fases de extração dos materiais, transporte e produção, numa abordagem conhecida como do berço ao portão. Inicialmente, são apresentados os resultados de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) relativos à produção de concreto armado para a cidade de Chapecó-SC, considerando dois traços distintos. Esses materiais foram aplicados no dimensionamento otimizado de vigas e pilares, com o objetivo de identificar formas efetivas de mitigação desses impactos. Na sequência, os valores obtidos são confrontados com os apresentados por Santoro (2021) para a cidade de Passo Fundo-RS, visando identificar tendências comuns e diferenças regionais, bem como parâmetros para o dimensionamento de estruturas de menor impacto.

2. IMPACTOS NA PRODUÇÃO DO CONCRETO EM CHAPECÓ-SC

Para a determinação dos impactos dos materiais estruturais desde a extração das matérias-primas até a produção das estruturas foram considerados os materiais concreto (20MPa e 35MPa), aço e fôrmas de madeira. Na fase de inventário, coletaram-se dados primários junto às empresas for-

TABELA 1  
TRAÇOS DOS CONCRETOS ANALISADOS  
(EM KG/M<sup>3</sup>)

|                  | 20 MPa | 35 MPa |
|------------------|--------|--------|
| Brita 01         | 625    | 730    |
| Brita 00         | 315    | 290    |
| Areia industrial | 300    | 350    |
| Areia média      | 670    | 550    |
| Aglomerante      | 270    | 340    |

FONTE: OS AUTORES (2025)

necedoras de matérias-primas: cimento CP-V-ARI transportado de Rio Branco do Sul-PR (504 km), aço, proveniente de Sapucaia do Sul-RS (446 km); agregados graúdos (brita 00 e 01) e areia industrial produzidos na usina no próprio município; areia natural extraída a 294 km; madeira para fôrmas (Pinus, madeira serrada e seca em estufa) com origem a 60 km. A Fig. 1 apresenta um mapa com a cidade de Chapecó e a localização geográfica das fontes dos insumos.

Os traços considerados para a produção dos concretos foram obtidos a partir de informação de concreteira da região, apresentados na Tabela 1.

Para o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> foi considerada a categoria de impacto 'Potencial de Aquecimento Global' do método ReCiPe 2016, utilizando-se o software SimaPro 9.2.0.1 versão *Faculty* com a base de dados Ecoinvent 3.7.1. O Ecoinvent consiste em um banco de dados abrangente para análises de ciclo de vida, o qual contém dados sobre fluxos de materiais, energia, emissões e outros impactos ambientais, permitindo a avaliação do desempenho

ambiental de produtos e sistemas. No caso, os valores de entrada foram ajustados à realidade da região de Chapecó - SC, considerando os traços e as distâncias de transporte definidos na etapa inicial do estudo. Por exemplo, para a geração e transmissão de energia foi utilizada a matriz energética do Sul do Brasil, baseada em usina hidrelétrica. Já, para o transporte, foi considerado o uso de caminhões pesados movidos a diesel, com valores de emissão equivalentes à média mundial, excluindo Europa (designado como RoW, ou resto do mundo). Os resultados das emissões são apresentados na Tabela 2, com as unidades correspondentes. Para a emissão de CO<sub>2</sub> por metro quadrado de fôrma, considerou-se, para o estudo, o consumo de 0,0398 m<sup>3</sup> de madeira para obtenção de um metro quadrado de forma. Não foram previstas reutilizações. Um maior detalhamento de como os valores da tabela foram obtidos pode ser visto em Alievi (2022).

A partir dos resultados da Tabela 2, observa-se que as emissões do concreto de maior resistência característica são quase 20% superiores às do de menor resistência. Isso se deve, principalmente, ao maior consumo de cimento, o qual corresponde a mais de 90% das emissões totais dos concretos. A areia correspondeu ao segundo maior impacto, devido, especialmente, ao volume e às maiores distâncias percorridas. Percebe-se que, de forma geral, os impactos devidos ao transporte variam de 1,14% a 6,37% do impacto total, sendo maiores no caso do aço. Um maior detalhamento pode ser obtido em Alievi (2022).

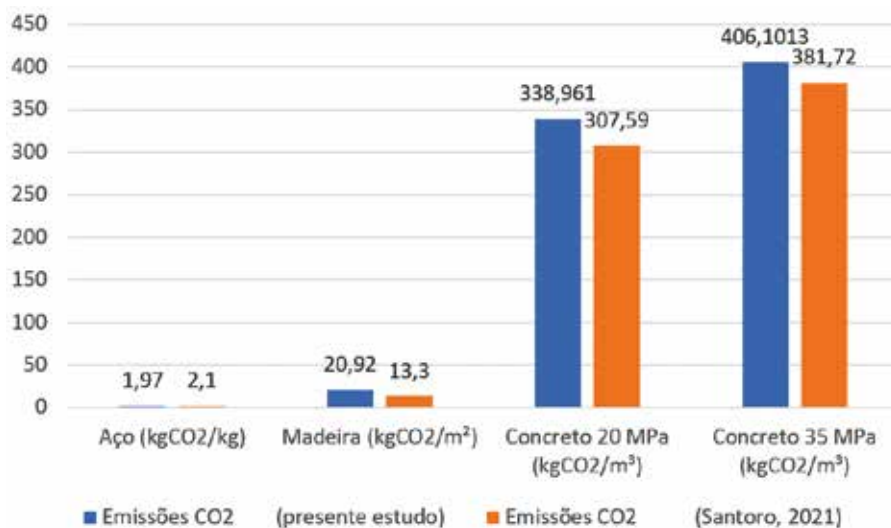
3. COMPARAÇÃO COM PASSO FUNDO-RS

Santoro (2021) aplicou metodologia análoga de ACV também considerando as fases do berço ao portão, mas com distâncias de transporte e traços específicos obtidos diretamente

TABELA 2  
EMISSIONES DE CO<sub>2</sub> CALCULADAS PELO SOFTWARE SIMAPRO

|                                                           | Extração/<br>Produção | Transporte | Emissões<br>totais |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------|------------|--------------------|
| Aço<br>(kgCO <sub>2</sub> /kg)                            | 1,847109              | 0,125609   | 1,972718           |
| Fôrmas de madeira<br>(kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ) | 20,44                 | 0,48       | 20,92              |
| Concreto 20 MPa<br>(kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )   | 330,174               | 8,786974   | 338,961            |
| Concreto 35 MPa<br>(kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )   | 401,4878              | 4,613494   | 406,1013           |

FONTE: OS AUTORES (2025)



**FIGURA 2**

COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> DAS MATÉRIAS-PRIMAS

FONTE: OS AUTORES (2025)

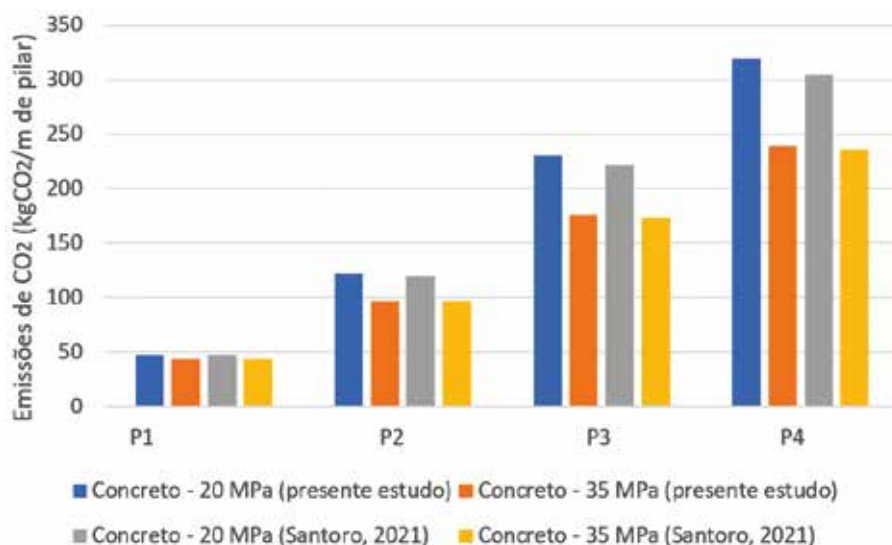
com concreteira da região de Passo Fundo-RS. Apesar da distância relativamente pequena entre os dois municípios estudados, de cerca de 180 km, diferenças significativas foram observadas (até 10,2% no concreto e 57,3% na madeira). Essas diferenças podem ser observadas com maior clareza na Fig. 2, que apresenta os resultados das emissões de CO<sub>2</sub> na extração/produção das matérias-primas componentes do concreto em kgCO<sub>2</sub>/kg e kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> para a madeira, obtidos pelo presente trabalho e por Santoro (2021). Com relação ao concreto, a maior variação das emissões de CO<sub>2</sub> de uma região para outra é devida à extração e produção do agregado graúdo. Para a madeira, o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> decorre não apenas das distâncias maiores a percorrer no presente estudo (de 23 km para 60 km), mas sobretudo nos processos selecionados na base Ecoinvent. Ambos consideram madeira de Pinus serrada e seca em estufa. No entanto, o estudo de Santoro considera o uso de madeira reflorestada, o que por si só já impacta nos indicadores ambientais de forma mais positiva. Além disso, utiliza processos de abrangência global, o que inclui países de alto grau de desenvolvimento. Já o presente estudo emprega um processo mais conservador, no qual não há garantia quanto à certificação da madeira.

Adicionalmente, ao invés do processo de abrangência global, utiliza o designado RoW (resto do mundo), o qual exclui países da Europa e Estados Unidos, entre outros, e considera dados médios de países que não possuem processos específicos na base de dados. No entendimento dos autores, essa última alternativa representa de forma mais fiel a realidade brasileira. Outras diferenças

foram verificadas entre os processos empregados no presente estudo e no de Santoro (2021), como a capacidade do veículo empregado no transporte da madeira. No entanto, acredita-se que sua influência seja pouco significativa.

#### 4. OTIMIZAÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS

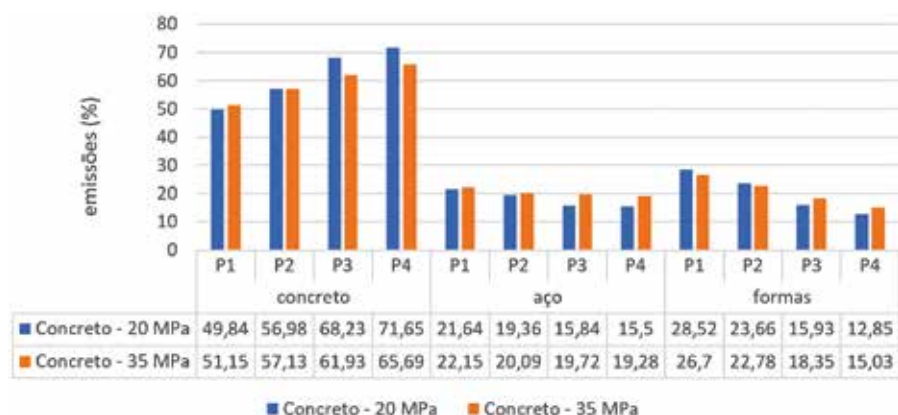
Dos resultados anteriores, observa-se que os concretos de maior resistência (no caso 35MPa) produzem maior impacto que os de 20 MPa, uma vez que esse impacto está diretamente vinculado ao teor de cimento. No entanto, elementos estruturais dimensionados com concretos de maior resistência terão suas dimensões reduzidas, acarretando em menor consumo de material. Assim, uma comparação do impacto relativo entre dois materiais de diferentes características só pode ser realizada de maneira realista se considerado o dimensionamento dos elementos estruturais. Adicionalmente, caso sejam embasadas em elementos dimensionados com o emprego de técnicas de otimização, as comparações e conclusões decorrentes se tornam mais efetivas. A otimização matemática busca, através de um processo sistematizado, encontrar a melhor solução possível para cada situação



**FIGURA 3**

COMPARATIVO DOS RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE PILARES COM ÊNFASE NAS EMISSÕES TOTAIS DE CO<sub>2</sub>

FONTE: OS AUTORES (2025)



**FIGURA 4**

COMPARATIVO DOS RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE PILARES COM ÊNFASE NAS EMISSÕES DE CADA MATERIAL, PARA CHAPECÓ

FONTE: OS AUTORES (2025)

analisada, e, portanto, torna o resultado menos dependente dos critérios específicos adotados pelo projetista.

Para quantificar o efetivo impacto das diferenças de emissão foram otimizadas seções transversais de pilares e vigas biapoiadas. Os pilares foram dimensionados à flexo-compressão reta, considerando as dimensões da seção e a quantidade e bitola das armaduras como variáveis de projeto. Foram considerados como objetivos a minimização do custo e do impacto por metro de comprimento de pilar, englobando os custos de concreto, aço e formas (Santoro, 2021). Para a otimização do impacto, foram utilizados os valores de emissões apresentados na Fig. 2.

A Figura 3 ilustra a análise comparativa dos resultados do dimensionamento otimizado de pilares com ênfase nas emissões de CO<sub>2</sub> para o presente estudo e para o de Santoro (2021). Os pilares P1 a P4 correspondem a diferentes combinações de momentos fletores e esforços axiais, idealizados com o intuito de cobrir situações diversificadas.

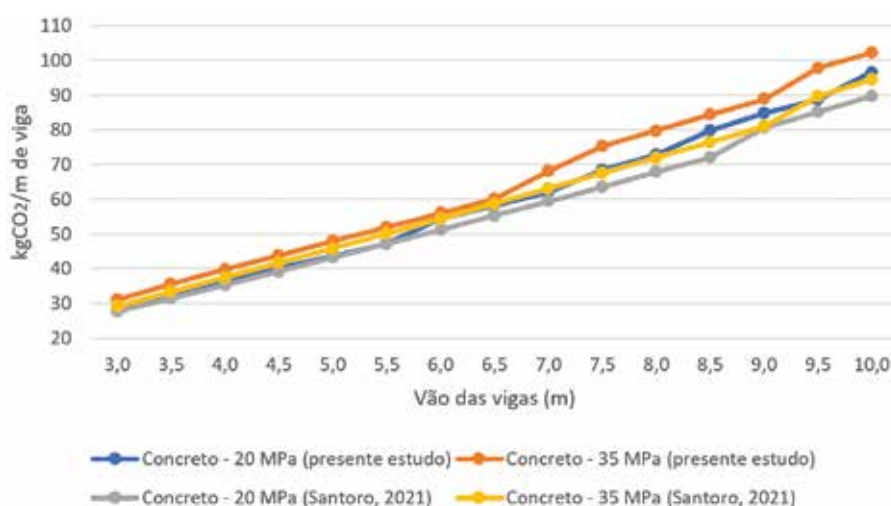
Com relação aos resultados apontados nessa apreciação comparativa, a análise mostra que o concreto de 35 MPa para pilares, emite em média 30% menos CO<sub>2</sub> que o concreto de 20 MPa para o presente estudo. Já, para Santoro (2021), a emissão de CO<sub>2</sub> é na média 26% menor ao utilizar o con-

creto de 35 MPa para os pilares. Apesar dos resultados serem distintos de um estudo para outro em termos de emissões unitárias, a análise de comparação aponta que os resultados seguem a mesma tendência para ambos os estudos. Assim, apesar dos impactos superiores apontados pelo presente estudo, comparativamente aos de Santoro (2021), as diferenças percentuais não chegam a ser significativas, uma vez que o processo de otimização efetua uma compensação ao utilizar

materiais de menor emissão relativa em maior quantidade.

A Figura 4 apresenta os impactos relativos de cada material para as seções otimizadas dos pilares obtidos para a cidade de Chapecó. Nela é possível perceber que o concreto é o responsável por grande parcela das emissões totais. Essa parcela variou entre 49,84% e 71,65% para 20 MPa e 51,15% e 65,69% para 35 MPa.

Na otimização das vigas, foram consideradas como variáveis a altura, a largura e as armaduras para elementos biapoiados com vão variando entre 3 a 10 m. Para as vigas otimizadas com base no presente estudo, vãos dimensionados com concreto de 20 MPa apresentaram melhor balanço entre emissões e custos, consumindo menos cimento por metro, apesar de gerarem seções transversais maiores. Isso se deve ao menor aproveitamento do concreto em seções submetidas predominantemente a esforços de flexão. Na Figura 5, apresenta-se o comparativo dos resultados do dimensionamento otimizado de vigas, com ênfase nas emissões de CO<sub>2</sub> para esse estudo, correlacionado ao estudo de Santoro (2021). De forma geral, observou-se que, em média, ao utilizar o concreto de 20 MPa para vigas, a emissão de CO<sub>2</sub> é aproximadamente



**FIGURA 5**

COMPARATIVO DO DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE VIGAS COM ÊNFASE NAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

FONTE: OS AUTORES (2025)

7,5% menor em relação a utilização do concreto de 35MPa.

A partir dos resultados obtidos, constatou-se que o dimensionamento otimizado das estruturas pode propiciar a efetiva redução nos impactos gerados, uma vez que permite não apenas determinar os quantitativos dos materiais estruturais, como também identificar a resistência mais adequada em função dos esforços atuantes. No entanto, essa redução pode ser ainda mais significativa se acompanhada de estudos que objetivem melhorar as propriedades dos concretos. Do ponto de vista da otimização, isso pode ser feito, por exemplo, pela dosagem dos materiais visando a minimização dos vazios, através de técnica conhecida com empacotamento de partículas, interferindo diretamente na resistência e na durabilidade do concreto. Adicionalmente, uma tendência tem sido o uso de rejeitos como materiais cimentícios suplementares, permitindo a substituição parcial do cimento com redução na extração de matérias-primas e menor disposição desses rejeitos em aterros.

Cabe destacar que, no dimensionamento estrutural (e, portanto, na otimização), a interação entre os diversos elementos deve ser adequadamente considerada. Assim, uma modelagem mais realista, na qual outros modelos sejam avaliados, poderia levar a resultados distintos e, portanto, também deve ser alvo de investigação.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo objetivou analisar as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) 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 das estruturas em concreto armado. Paralelamente, foram comparados os resultados obtidos neste estudo com os resultados atingidos no estudo de Santoro (2021).

A partir do dimensionamento otimizado de vigas e pilares, foi possível evidenciar a influência da resistência do concreto nas emissões. Dentre as conclusões do estudo, podem ser destacados os seguintes aspectos:

- Os impactos gerados pelos materiais são significativamente influenciados por aspectos regionais, com o traço utilizado e as distâncias dos insumos. Nesse sentido, maior destaque deve ser dado à obtenção de resultados mais afeitos à região. No caso de valores específicos para a região de estudo não estarem disponíveis, recomenda-se que processos retirados de bases como o Ecoinvent sejam selecionados de modo a refletir de forma mais fidedigna as características do país (como observado no caso das madeiras);
- As emissões de CO<sub>2</sub> são menores para os concretos de menor resistência a compressão, uma vez que envolvem menor volume de aglomerante (cimento), matéria-prima com maior contribuição nas emissões de CO<sub>2</sub> para a produção do concreto. No entanto, esses materiais necessitam ser usados em maior quantidade. Assim, em paralelo ao dimensionamento otimizado, deve-se incentivar estudos que visem a redução na quantidade de cimento (ou a substituição parcial

deste), sem a redução proporcional da resistência do concreto;

- De acordo com as análises efetuadas, é interessante utilizar concretos de maior resistência à compressão para os pilares e de menor resistência à compressão para vigas, obtendo nessa configuração estruturas em concreto armado menos poluentes. Destaca-se que esses resultados foram obtidos para elementos isolados e, portanto, podem divergir para a análise segundo modelos estruturais que considerem a efetiva interação entre os elementos;
- Apesar de não determinantes no presente estudo em relação às emissões totais, as distâncias percorridas pelos insumos também geram impactos que podem ser mitigados. Como sugestão é proposta a adoção de medidas como a seleção de fornecedores próximos ao destino final da matéria-prima, a utilização de veículos cujo consumo de combustíveis fósseis seja menor ou com capacidade de carga maior e a avaliação da possibilidade de uso de outros modais de transporte, quando disponíveis.

Apesar de aplicada ao município de Chapecó - SC, a metodologia apresentada pode ser adaptada para outras regiões. Como continuidade, sugere-se para estudos futuros a avaliação das demais categorias de impacto ambiental para o concreto armado, além das etapas de operação, manutenção e fim de vida dos materiais.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa concedida ao primeiro autor. ☺

## ► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALIEVI, J. J. Avaliação de Impactos Ambientais Gerados por Estruturas de Concreto Armado na Cidade de Chapecó-SC. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2022.
- [2] CABEZA, L.F. et al. *Buildings*. Em: *Climate Change 2022 — Mitigation of Climate Change*. 1. ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2023. p. 953-1048.
- [3] SANTORO, J. F. Subsídios para a minimização do impacto ambiental de estruturas de edifícios em concreto armado. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2021.
- [4] SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. *Evaluation of CO<sub>2</sub> emissions in RC structures considering local and global databases*. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 9, n. 2, p. 33, fev. 2024.
- [5] TRES JUNIOR, F. L. et al. *Multi-Objective Optimization Applied to the Design of Sustainable Pedestrian Bridges*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 20, n. 4, p. 3190, 11 fev. 2023.