



Otimização do Custo Monetário e Ambiental de Vigas de Concreto Armado via Algoritmo Evolucionário

Gabriel Mendes Zampieri¹, Guilherme Fleith de Medeiros²

¹ Universidade de Passo Fundo / Curso de Engenharia Civil / 181463@upf.br

² Universidade de Passo Fundo / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental / guifleith@upf.br

Resumo

A Engenharia Civil é responsável por grandes impactos ambientais, além do uso de diversos recursos naturais. Nesse cenário, torna-se cada vez mais necessário a busca por soluções estruturais que conciliem desempenho técnico, ambiental e viabilidade econômica. Este trabalho aborda a análise e o dimensionamento de vigas de concreto armado a partir de otimização estrutural via *Solver* do Excel. É utilizado o método evolucionário, o qual consiste em uma técnica de otimização inspirada na seleção natural, capaz de encontrar soluções eficientes para problemas com grande número de variáveis e um grande espaço de busca, por meio de processos como seleção, cruzamento e mutação de soluções. Nessa pesquisa, foram utilizadas duas funções objetivo distintas, de maneira independente, visando à minimização do impacto ambiental (emissão de gás carbônico na atmosfera) e do custo monetário. São avaliadas diferentes variáveis para o problema de otimização, como a resistência do concreto, altura da viga, quantidade e diâmetros de barras de aço. São consideradas, como restrições, questões normativas e aspectos construtivos. Os exemplos desenvolvidos consideram diferentes comprimentos para vigas de único vão de extremidades engastadas (2 a 8 m, a cada metro), assim como diferentes condições de carregamento. As soluções são geradas de modo a definir o detalhamento completo das vigas, com indicação da geometria final e discretização de todas as armaduras, bem como fornecem os valores de emissão e custos totais e individuais para cada material. A estratégia desenvolvida mostra-se vantajosa para a obtenção de soluções de menor custo monetário e com minoração de impactos ambientais. Apesar das melhores soluções monetárias e ambientais convergirem para resultados similares em termos de função objetivo, as mesmas diferem entre si em termos de consumo dos materiais e valores finais das variáveis. Maiores vãos e cargas elevadas intensificam o consumo de materiais, custos e emissões de CO₂.

Palavras-chave

Concreto Armado; Otimização estrutural; Método evolucionário; Otimização de custos; Otimização ambiental.

Introdução

A construção civil, além de grande consumidora de recursos naturais, é uma indústria geradora de excessivos impactos ambientais. Para a quantificação dos mesmos, existem diversas métricas utilizadas pela literatura técnica, dentre as quais destaca-se a estimativa de emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa, com ênfase no gás carbônico (CO₂). Diante desse contexto, a busca por projetos com menor geração de impacto ambiental, que aliem desempenho e economia, torna-se interessante. No entanto, abordagens convencionais de dimensionamento, baseados na intuição do projetista, nem sempre garantem a solução ótima em termos de custo e menor impacto ambiental,

mesmo seguindo os critérios normativos. Isso resulta em estruturas superdimensionadas, com desperdício de materiais e aumento de emissões.

Nas últimas décadas, a área de otimização estrutural tem avançado significativamente, impulsionada pelo crescente poder computacional e pelo desenvolvimento de algoritmos capazes de resolver problemas complexos. Com esse cenário, torna-se pertinente o uso de ferramentas de busca sistemática, como os métodos heurísticos, com intuito de explorar espaços de solução complexos e não-lineares, com destaque para métodos evolucionários, que se inspiram em processos naturais como a seleção genética e a evolução biológica.

O presente trabalho tem como objetivo a otimização do custo monetário em vigas de concreto armado de vão único, bem como a redução do impacto ambiental, através da minimização das emissões de gás carbônico pela estrutura. Isso é realizado com base na variação de vãos, carregamentos, resistência do concreto, armaduras longitudinais, transversais e de pele analisadas. As funções objetivo são avaliadas de maneira independente através de otimização mono-objetivo. As ligações são tomadas como engastadas nos exemplos, para representar os vínculos entre vigas e pilares moldados in loco, além de uma abordagem completa de análise e dimensionamento, com detalhamento completo das armaduras nas soluções realizadas.

A otimização de vigas de concreto armado já foi abordada em diversos trabalhos, principalmente considerando vínculos de segunda ordem, como visto em Correia et al. (2019), Lima (2011) e Leite e Pereira Junior (2019). Os trabalhos citados, inclusive, dão ênfase apenas à minimização dos custos monetários, não incluindo a otimização do impacto ambiental em suas avaliações.

Metodologia

Para a pesquisa foi elaborada uma planilha eletrônica, com auxílio do *software* Microsoft Excel, contendo os procedimentos de análise e dimensionamento estrutural para vigas de concreto armado, visando à execução posterior dos exemplos de otimização. A análise estrutural é realizada pelo método dos deslocamentos (MARTHA, 2022) para obtenção dos esforços solicitantes de cisalhamento e flexão. Para o dimensionamento, a planilha incluiu as seguintes verificações: cálculo à flexão, cálculo ao cisalhamento, cálculo da armadura de pele e cálculo das deformações limites de serviço (ELS-DEF) de acordo com a norma ABNT NBR 6118 (2023).

O processo de busca das soluções ótimas fez uso da ferramenta *Solver* presente na própria aplicação, considerando o método evolucionário. O método evolucionário, utilizado por alguns solucionadores como o *Solver*, baseia-se em princípios da biologia evolutiva para otimização. Inicialmente, gera-se aleatoriamente uma população de soluções candidatas. Essas soluções passam por um processo de reprodução e seleção inspirado na genética, no qual indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de gerar descendentes, enquanto os menos aptos são gradualmente eliminados. A cada geração, novas soluções são criadas combinando características das soluções genitoras, permitindo que a população evolua em direção a soluções mais eficientes. A partir disso, o algoritmo finaliza e a melhor solução verificada até o momento é apresentada, evitando ficar aprisionado em um ideal local durante o processo (SANTOS; MENDES, 2022). Em relação à configuração da ferramenta, foram empregados os seguintes parâmetros de otimização apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros para o método evolucionário.

Parâmetro	Valor
Convergência	0,0001
Taxa de Mutação	0,075
Tamanho da População	300
Propagação Aleatória	0
Tempo Máximo sem Aperfeiçoamento	150 segundos

Nesta pesquisa, foram efetuados exemplos considerando duas funções objetivo distintas, as quais se constituem nos valores a serem otimizados (no caso desse trabalho, minimizados) a partir da mudança das variáveis do problema. Essa avaliação das duas funções ocorreu de maneira independente (otimização mono-objetivo). O primeiro objetivo constitui-se na minimização do custo monetário das vigas em concreto armado e o segundo baseia-se na redução da emissão de gás carbônico da estrutura proposta. Os valores unitários relacionados ao custo monetário foram obtidos através da tabela do SINAPI-RS (CAIXA, 2025), considerando dados de janeiro de 2025. A Tabela 2 apresenta os custos monetários para cada material. A estimativa do valor da função (custo da viga) é realizada multiplicando o custo unitário dos materiais pela respectiva quantidade dos mesmos (volume de concreto, massa de aço e área de fôrmas). O custo relativo às fôrmas de madeira considera duas utilizações do material.

Tabela 2 – Valores de custo monetário por material.

Material	Especificação	Unidade	Custo (R\$)
Concreto	C25	Por m ³	557,79
	C30		576,38
	C35		594,97
	C40		620,66
Aço	CA-50	Por kg	8,78
Fôrmas	Chapa de madeira	Por m ²	44,10

Em relação às medidas de emissão de gás carbônico em kg/CO₂, foi utilizado o estudo de Santoro (2021) para obtenção dos dados, o qual considera a região do sul do Brasil para estimativa dos valores dos impactos ambientais dos materiais do concreto armado. Na Tabela 3, é possível observar os valores de emissão para cada material. A estimativa do valor da função (emissão de CO₂ da viga) é realizada multiplicando a emissão individual dos materiais pela respectiva quantidade dos mesmos (volume de concreto, massa de aço e área de fôrmas). A exemplo dos custos monetários, o valor da emissão de CO₂ das fôrmas considera o uso com uma reutilização.

Tabela 3 – Valores de emissão de gás carbônico por material.

Material	Especificação	Unidade	Emissão (kg/CO ₂)
Concreto	C25	Por m ³	149,26
	C30		157,65
	C35		171,74
	C40		182,14
Aço	CA-50/CA-60	Por kg	1,05
Fôrmas	Chapa de madeira	Por m ²	0,89

Para os exemplos desenvolvidos para o processo de otimização foram adotadas vigas contínuas de vão único, com ambas as extremidades engastadas e carregamento uniformemente distribuído ao longo do trecho. Foram consideradas algumas propriedades fixas, como a classe de agressividade ambiental II (ambiente urbano), cobrimento nominal de 3 cm, uso residencial, aço CA-50, base da viga (b_w) de 19 cm, agregado de basalto ($\alpha_E = 1,2$) e brita tipo 1 (diâmetro máximo nominal de 19 mm).

Como valores variáveis do problema de otimização foram utilizados a altura da viga (h), a resistência característica do concreto (f_{ck}) e os diâmetros das barras de aço ($\emptyset$) utilizadas em armaduras longitudinais, transversais e de pele (neste último caso, para vigas maiores que 60 cm). Neste trabalho, foram utilizadas variáveis discretas, isto é, as mesmas poderiam assumir apenas valores específicos, como múltiplos de cinco para a resistência do concreto e altura de viga, além de valores comerciais para diâmetros das armaduras, resultando, assim, em situações de dimensionamentos aplicáveis em projetos reais.

Para a resolução do problema de otimização do *Solver* foram determinadas restrições superiores e inferiores, definindo um intervalo específico de valores possíveis a serem adotados, a partir de condições da ABNT NBR 6118 (2023) e aspectos construtivos, como apresentado nas Eq. (1) a Eq. (13). Outras condições de cálculo, como espaçamentos mínimos entre armaduras, verificação das bielas comprimidas no cisalhamento, entre outras, foram automaticamente consideradas nos procedimentos de cálculo da planilha desenvolvida para análise e dimensionamento das vigas, através de testes lógicos nas próprias células.

$$A_{s,min} \leq A_s \leq A_{s,máx} \quad (1)$$

$$15 \text{ cm} \leq h \leq 200 \text{ cm} \quad (2)$$

$$25 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 40 \text{ MPa} \quad (3)$$

$$5 \text{ mm} \leq \emptyset_l \leq 25 \text{ mm} \quad (4)$$

$$5 \text{ mm} \leq \emptyset_t \leq b_w/10 \quad (5)$$

$$5 \text{ mm} \leq \emptyset_{pele} \leq b_w/10 \quad (6)$$

$$\delta \leq L/250 \quad (7)$$

As restrições da Eq. (1) referem-se aos limites presentes na ABNT NBR 6118 (2023) no que se trata das armaduras mínimas ($A_{s,min}$) e máximas ($A_{s,máx}$) das vigas. As restrições apresentadas na Eq. (2) foram determinadas permitindo um intervalo amplo para as alturas (h) adotadas (evitar limitação quanto a essa variável). Para os valores de resistência do concreto (f_{ck}), limitados de acordo com a Eq. (3), foi adotado o valor mínimo para classe de agressividade ambiental II (25 MPa) e o máximo (40 MPa) foi estabelecido para que se ficasse contido em concretos do Grupo I com dados disponíveis de custo e emissão. Quanto aos diâmetros das barras de aço, presentes nas Eq. (4) a (6), as restrições para as armaduras longitudinais ($\emptyset_l$), transversais ($\emptyset_t$), e de pele ($\emptyset_{pele}$), procuraram respeitar os limites normativos, bem como a disponibilidade de bitolas comerciais e sua aplicabilidade para o tipo de projeto avaliado. A Eq. (7) refere-se à limitação da deformação vertical máxima das vigas (δ), de acordo com o seu vão (L) e os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6118 (2023) para aceitabilidade sensorial visual.

Foram efetuados exemplos para sete valores de comprimento de viga diferentes, adotando 5 m como vão médio, além de um intervalo de até 3 m abaixo ou acima deste valor. Isso resultou em vãos entre 2 e 8 m, a cada metro. A ação uniforme média atuante, para o dimensionamento nos Estados Limites Últimos, foi calculada conforme a ABNT NBR 6120 (2019), a partir do somatório da ação acidental (q) e ação permanente (g), resultando em uma ação média uniformemente distribuída ao longo da estrutura, considerando condições de uso das lajes, alvenarias e

revestimentos usuais. A carga média de alvenaria considerada foi de 5,21 kN/m e a carga média de revestimentos considerado para paredes foi de 1,76 kN/m. A carga relativa às lajes (permanente e acidental) está apresentada, para cada vão considerado, na Tabela 4.

Tabela 4 – Cargas médias em relação ao vão.

Vão (m)	2	3	4	5	6	7	8
Carga acidental das lajes (kN/m)	1,25	1,875	2,5	3,13	3,75	4,375	5
Carga permanente das lajes (kN/m)	13,96	16,27	18,57	20,88	23,18	25,49	27,79

A carga de peso próprio da viga varia durante o processo de otimização, sendo obtida a partir do produto entre a área da seção de concreto considerada para a solução avaliada e o peso específico aparente do concreto armado (25 kN/m³). A partir da carga média também foram efetuadas outras faixas de carregamento, com um acréscimo de 25% e 50% do valor médio, bem como um decréscimo de 25% e 50% do valor médio, totalizando assim cinco variações de carga para cada vão (buscando representar situações de variabilidade nas condições de projeto no que diz respeito às ações atuantes).

Para o problema de otimização relativo ao custo monetário, foi feito uso de todos valores de vão, com as cinco faixas de carregamento para cada vão, totalizando 35 exemplos. Em relação à minimização da emissão de CO₂, foi utilizado o mesmo intervalo de vãos, porém somente com o valor de ação média uniforme calculada, totalizando sete exemplos.

No processo de otimização via *Solver*, foram utilizadas duas condições distintas de partida para as variáveis. Ou todas partiam dos limites inferiores, ou todas iniciavam dos limites superiores. Para cada um dos exemplos de minimização de custo (35), e para cada uma das condições distintas de partida (2), foram executados 5 testes pela ferramenta, com 350 execuções totais, portanto. Para a minimização das emissões, os exemplos avaliados (7), considerando também as 2 condições distintas de partida e a execução de 5 testes pela ferramenta, totalizaram 70 execuções totais. A partir de todas as execuções do *Solver*, foram coletados os melhores resultados em termos de custo e de emissão, para cada faixa de vão e carregamento avaliados.

Resultados

Após obtenção das soluções para os problemas de otimização apresentados, foram efetuados gráficos apresentando as principais informações extraídas dos exemplos, tanto de minimização monetária como de minimização da emissão de CO₂, visando facilitar o comparativo e estabelecer conclusões em relação a estes resultados.

Na otimização de vigas em concreto armado considerando o custo monetário, os valores da função objetivo apresentam, de forma esperada, um aumento não linear, e sim exponencial, a partir do aumento dos vãos e das cargas, como é possível observar na Figura 1.

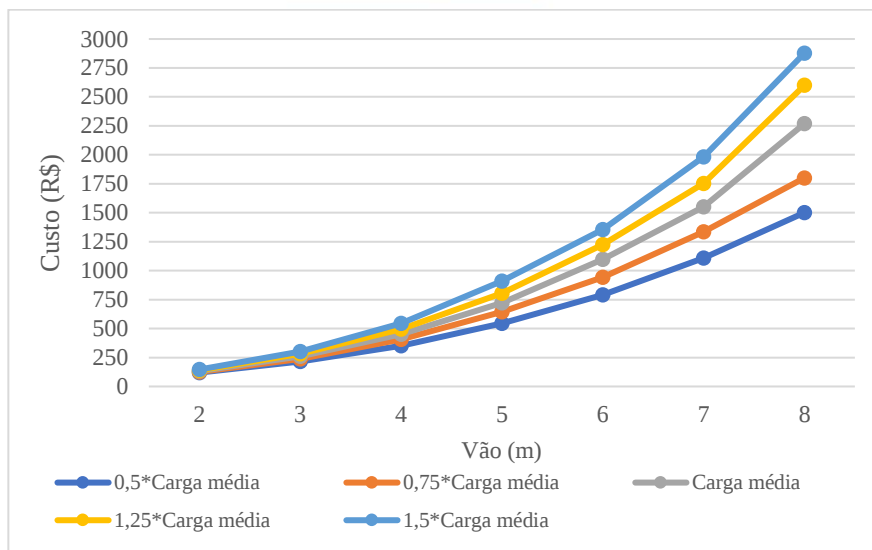


Figura 1 – Custo ótimo das vigas para diferentes vãos e ações.

A Figura 2 indica de forma muito perceptível que a participação do aço no custo monetário é superior para todos os casos, em relação aos demais materiais, tornando-se ainda mais significativa a sua influência com o aumento do vão. Isso se justifica pelo aumento das solicitações em vigas de maior comprimento, e pela necessidade da inclusão da armadura de pele em vigas mais altas (com altura superior a 60 cm). Já a participação do concreto e das fôrmas permanece semelhante, porém se observa um crescimento na influência do concreto com o aumento do vão, devido ao emprego de concretos de maior resistência característica (e maior custo unitário). É importante destacar que o custo do aço varia exponencialmente com o vão, enquanto os demais materiais possuem uma correlação polinomial de segunda ordem entre o custo e o comprimento das vigas.

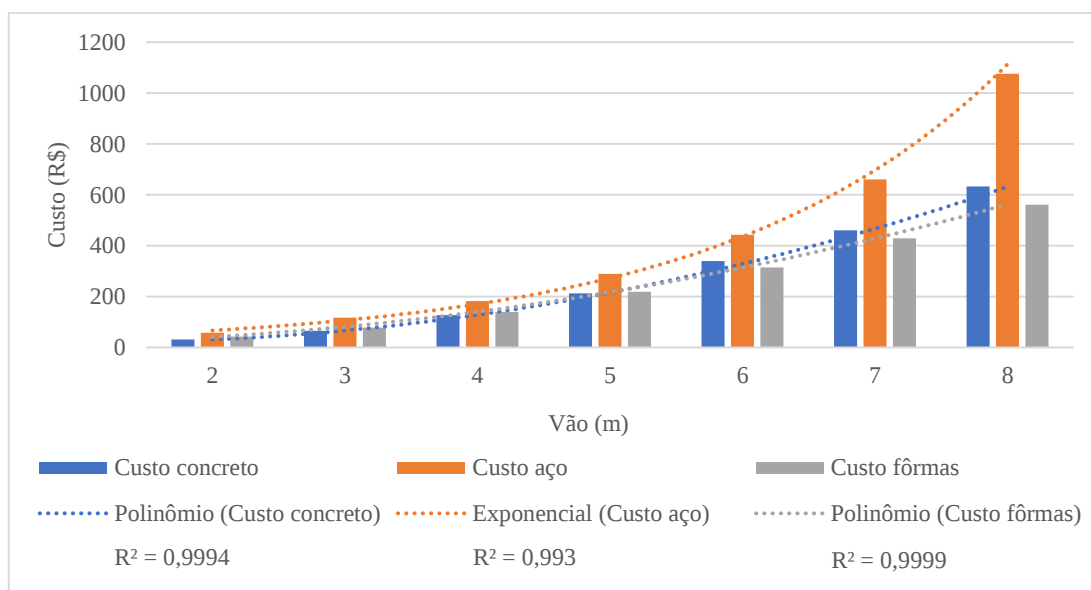


Figura 2 – Participação dos materiais na composição do custo monetário.

Ao se atentar à geometria das estruturas das soluções, é interessante observar os valores de alturas ótimas obtidas para vigas com otimização para custo monetário, apresentadas na Figura 3. O gráfico evidencia, além das alturas ótimas obtidas de acordo com o vão e cargas avaliadas, duas retas

lineares tracejadas que representam as condições usuais de pré-dimensionamento da altura de vigas de concreto armado. Para as vigas biapoiadas, usualmente é utilizado o valor do quociente entre o vão e 10. Já para vigas contínuas utiliza-se o quociente entre o vão e 12. Ao comparar as alturas ótimas das soluções com os padrões usuais de pré-dimensionamento, é possível identificar que as relações citadas possuem boa correlação para a carga média e duas faixas superiores, e são conservadoras quando se trata das duas faixas de ações inferiores analisadas.

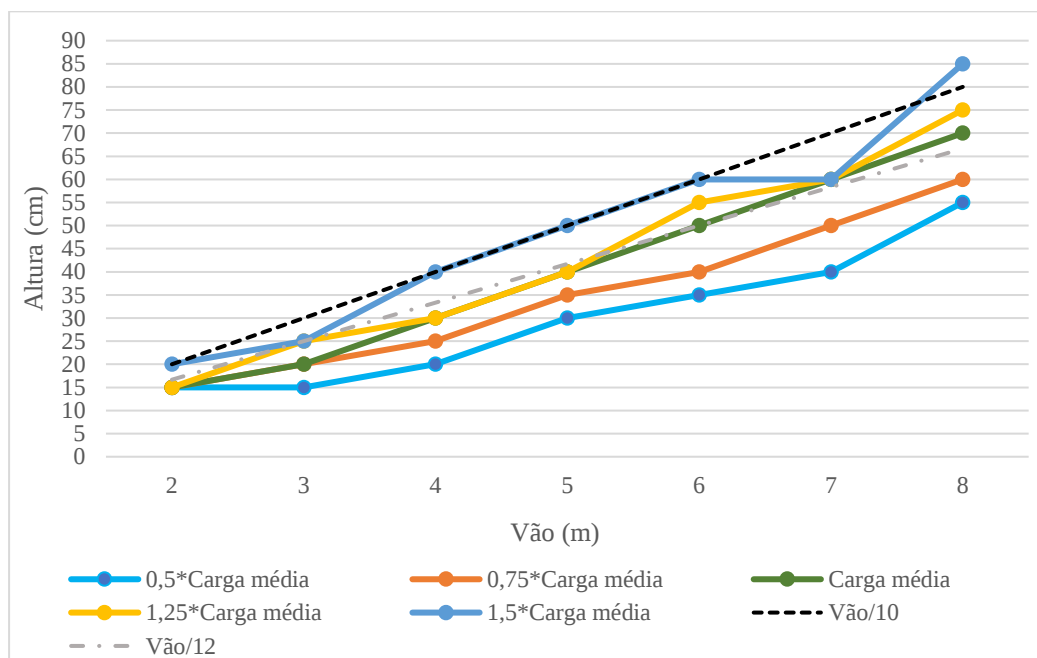


Figura 3 – Alturas ótimas de acordo com diferentes vãos e ações.

As Figuras 4 e 5 apresentam comparativos em relação ao custo monetário total e emissão de gás carbônico para ambas as soluções ótimas com a carga média. Ao analisar os gráficos, tanto as soluções que otimizam o custo, quanto as soluções que minimizam a emissão de CO₂, atingem valores semelhantes ou equivalentes em alguns cenários, ou seja, uma estrutura com o custo reduzido resulta em uma estrutura com um menor impacto ambiental resultante, da mesma maneira que uma estrutura com emissão reduzida apresenta custos inferiores, com poucas diferenças significativas em termos de função objetivo. Porém, as soluções obtidas possuem certa distinção quanto aos valores das variáveis, como é possível verificar na Figura 6, no que tange, por exemplo, à classe de resistência do concreto. As vigas de melhor solução ambiental utilizam concretos com menor resistência do que as vigas de melhor solução monetária. Isso ocorre devido à participação do concreto nos valores de emissão ser significativamente superior aos valores de custo, tendo assim um comportamento restritivo no aumento de resistência para evitar maior impacto ambiental.

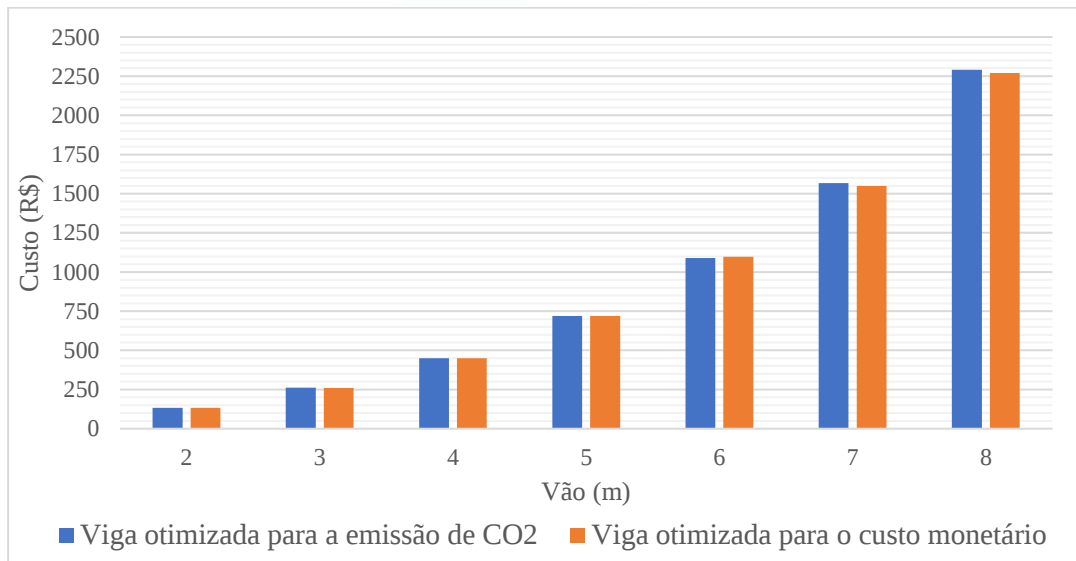


Figura 4 – Comparação do custo monetário para soluções ótimas.

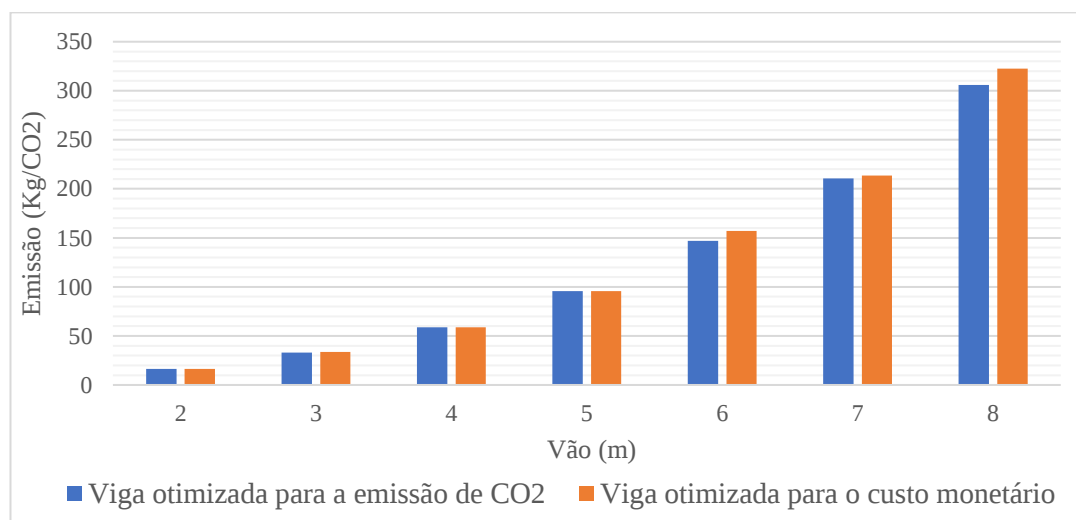


Figura 5 – Comparação da emissão de CO₂ para soluções ótimas.

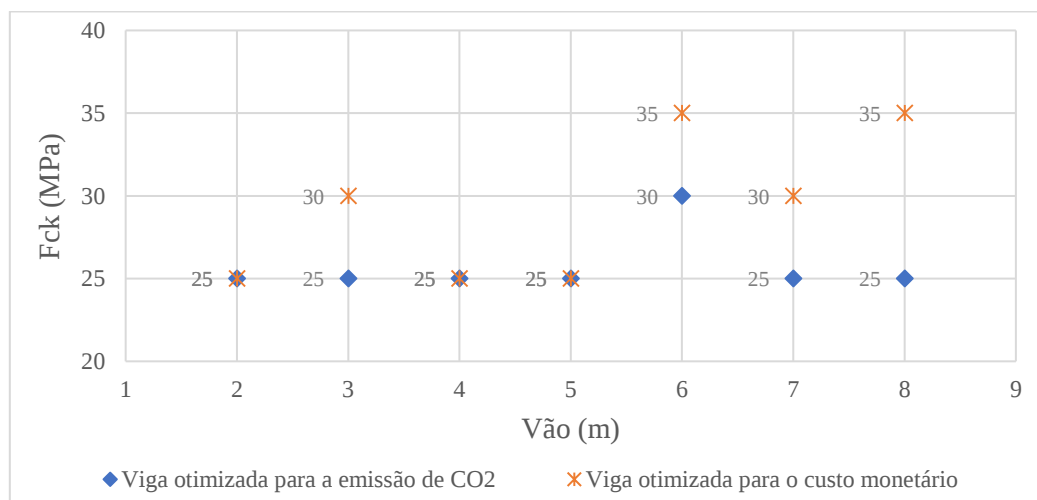


Figura 6 – Variação da resistência do concreto nas soluções ótimas.

Através da Figura 7, é apresentada a participação percentual dos materiais no custo das vigas otimizadas para custo monetário (linhas contínuas) e redução de impacto ambiental (linhas tracejadas), a partir de todos os valores definidos de vão, utilizando a carga média. É notável que para as vigas de custo monetário otimizado, as participações se mantêm praticamente constantes com a variação do vão, com o aço aumentando ainda mais a sua importância na composição de custo nos vãos mais elevados, em detrimento da adoção da armadura de pele em maiores alturas de seção. Também é perceptível que as participações do concreto e das fôrmas de madeira, relacionadas às dimensões da estrutura, são bastante próximas em termos percentuais (com o concreto tendo maior participação em vãos maiores, devido à necessidade da adoção de maiores f_{ck} , e as fôrmas de madeira tendo maior influência nos vãos menores).

Em relação às vigas de emissão de CO₂ minimizada, as participações do concreto são bastante superiores quando comparadas ao aço, destacando a maior influência do material no impacto ambiental das vigas quanto aos gases de efeito estufa. A madeira, neste caso, responde visivelmente pela menor participação. Este gráfico novamente demonstra que, apesar do custo das funções objetivo ficar próximo para ambas as situações avaliadas na pesquisa, as soluções e considerações são bastante distintas entre si.

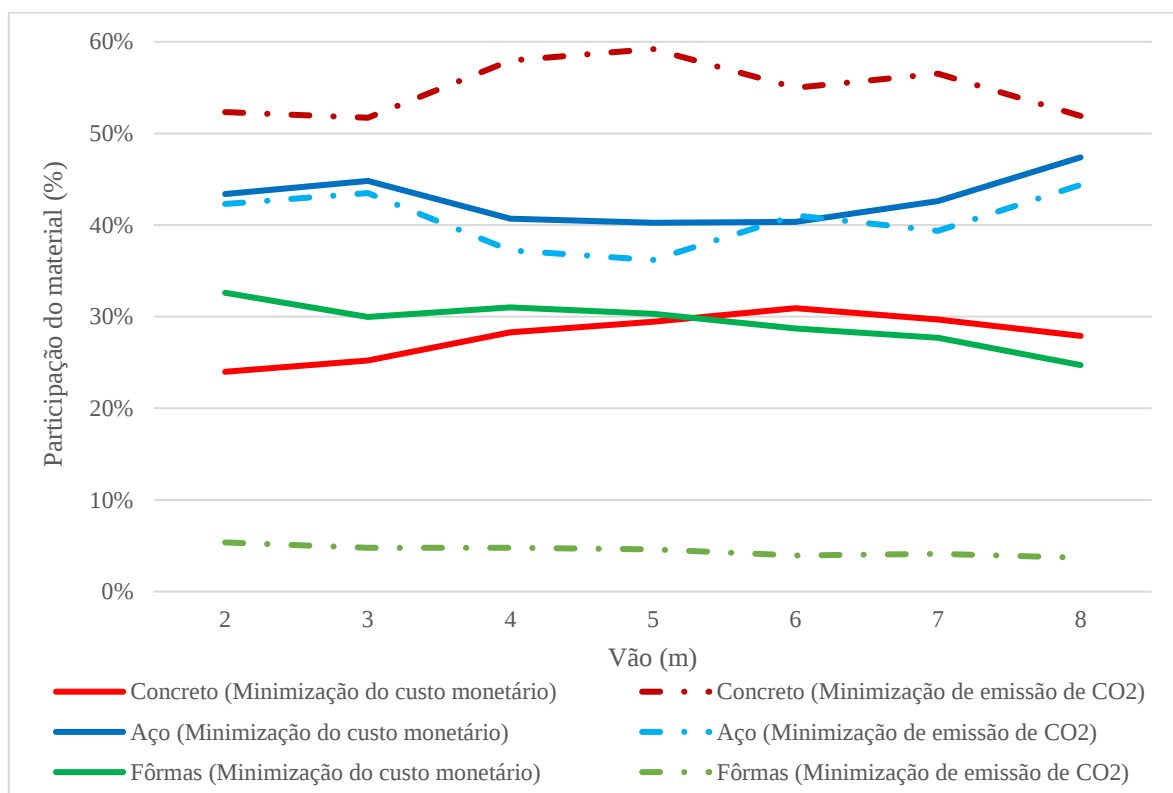


Figura 7 – Comparação da participação dos materiais para as soluções ótimas.

Conclusões

A otimização de vigas de concreto armado demonstrou ser uma estratégia eficaz na redução de custos e emissões causadas pela produção do concreto armado, considerando variáveis normativas e construtivas. Os resultados obtidos evidenciam que maiores vãos e cargas elevadas intensificam o consumo de materiais e custos, aumentando o impacto ambiental negativo e reforçando a necessidade da utilização de processos sistemáticos de busca das melhores soluções possíveis aplicáveis em projetos, mostrando-se o método evolucionário presente no *Solver* do Excel como



uma boa alternativa de ferramenta. Verificou-se ainda que soluções com menor impacto ambiental tendem a apresentar também custos reduzidos, mesmo com soluções diferentes, evidenciando a convergência entre economia e questões ambientais em projetos estruturais.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: 2019;
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: 2023;
- CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil: relatório de preços de insumos: Porto Alegre – RS. Mês de referência: jan. 2025. Emissão: 11 fev. 2025. Brasília, DF: CEF, 2025;
- CORREIA, R. S.; BONO, G. F. F.; BONO, G. Otimização de vigas de concreto armado utilizando a ferramenta Solver. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, São Paulo, v. 12, n. 4, p. 910–931, jul./ago. 2019. DOI: 10.1590/S1983-41952019000400011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/vX3XXx53G38pmx7Z8hN7g8s/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 30 jul. 2025.
- LEITE, M. B.; PEREIRA JUNIOR, W. M. Utilização de técnicas de otimização no dimensionamento de vigas de concreto armado. HOLOS, [S. l.], v. 5, p. 1–17, 2019. DOI: 10.15628/holos.2019.6282. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/6282/pdf>. Acesso em: 30 jul. 2025.
- LIMA, M. L. R. Otimização topológica e paramétrica de vigas de concreto armado utilizando algoritmos genéticos. 2011. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.
- MARTHA, Luiz Fernando. Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos. 3. Rio de Janeiro GEN LTC 2022 1 recurso online ISBN 9788521638216.
- SANTORO, J. F. Subsídios para a minimização do impacto ambiental de estruturas em concreto armado. 2021. 173 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2021.
- SANTOS, L. C.; MENDES, O. L. Aplicação do método evolucionário como resposta para questões de otimização em roteirização entre estabelecimentos do setor de construção civil para o município de Barretos (SP). Faculdade de Tecnologia de Bebedouro – FATEC, 2022.