INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROJETO ESTRUTURAL NA EMISSÃO DE CO_2 EM UMA EDIFICAÇÃO DE CONCRETO ARMADO

Rodnny Jesus Mendoza-Fakhye[1], Luciano Izaac Valverde da Costa[2], Gustavo Savaris[1]

[1] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo - PR, Brasil
(rodnny@utfpr.edu.br)
[2]Bacharel em Engenharia Civil, Toledo - PR, Brasil

Resumo: A construção civil é uma das maiores emissoras de CO2 devido ao uso de cimento e concreto. Este estudo avaliou a relação entre a resistência do concreto, as dimensões dos pilares e as emissões em uma edificação de 10 pavimentos. Foram simuladas diferentes combinações de resistência e seções para estimar o consumo de materiais e CO2. Os resultados mostram que o dimensionamento estrutural influencia diretamente as emissões, exigindo equilíbrio entre segurança e impacto ambiental.

Palavras-chave: Concreto Armado; Emissão de CO2; Sustentabilidade

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a sustentabilidade deixou de ser apenas uma diretriz idealizada e passou a representar uma necessidade urgente diante do agravamento das mudanças climáticas. Eventos extremos como secas prolongadas, inundações severas e queimadas intensas tornaram-se mais frequentes e severas no Brasil, evidenciando alterações no equilíbrio climático global. De acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2023), o Brasil tem mantido níveis elevados de emissões de dióxido de carbono (CO2), atribuídas, majoritariamente, ao desmatamento e ao elevado consumo de combustíveis fósseis. Estudos conduzidos pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre do INPE, em parceria com a Rede Clima e o *Met Office Hadley Centre* (Brasil; Reino Unido, 2011), indicam que esses fatores contribuem diretamente para o aumento da temperatura média e para a intensificação de eventos extremos no território nacional. Tais evidências reforçam a urgência da incorporação de práticas sustentáveis em setores estratégicos, como a construção civil, com o objetivo de mitigar os impactos ambientais e climáticos associados às emissões de CO2.

Nesse contexto, destaca-se o papel da indústria da construção civil, cuja cadeia produtiva é altamente dependente de materiais cimentícios e estruturas de concreto armado. Esses elementos, embora essenciais para a estabilidade e durabilidade das edificações, estão entre os principais emissores de gases de efeito estufa. Estima-se que o setor da construção seja responsável por cerca de 39% das emissões globais de dióxido de carbono relacionadas à energia, em decorrência do consumo intensivo de recursos naturais e da energia empregada em seus processos produtivos (Mostafei et al., 2023).

O crescimento da construção civil no Brasil, conforme apontado no relatório Panorama do Mercado de Construção (CBIC, 2021), evidencia uma demanda crescente por edificações urbanas. Este cenário reforça a importância de práticas projetuais que considerem o impacto ambiental desde as etapas iniciais do empreendimento. O estudo destaca que a análise de parâmetros estruturais pode ser uma ferramenta eficaz para reduzir a pegada de carbono das construções, oferecendo alternativas sustentáveis sem comprometer a viabilidade técnica ou econômica dos projetos.

Dessa forma, este trabalho busca explorar a influência de diferentes parâmetros, como a resistência característica do concreto (f_{ck}), seções dos pilares, parâmetros de estabilidade e deslocamentos na emissão de dióxido de carbono em edificações de concreto armado. A partir dessa análise, espera-se levantar subsídios que possam colaborar com a formulação de diretrizes voltadas à elaboração de projetos mais eficientes do ponto de vista ambiental.

A pesquisa adota uma abordagem quantitativa, baseada em estudos de caso e simulações computacionais. Será utilizado o software TQS® para o desenvolvimento dos modelos estruturais, sendo aplicadas tabelas específicas para a quantificação das emissões de CO2. Espera-se, com isso, fornecer subsídios técnicos que apoiem engenheiros, arquitetos e demais profissionais da construção civil na adoção de soluções estruturais mais conscientes e alinhadas com os princípios da sustentabilidade.

A construção civil é responsável por aproximadamente 37% a 38% das emissões globais de dióxido de carbono (CO_2) associadas ao consumo energético, sendo um dos setores que mais impactam o equilíbrio climático mundial (*International Energy Agency*, 2020). Essas emissões podem ser classificadas em diretas, como aquelas oriundas da queima de combustíveis fósseis em fornos industriais, e indiretas, relacionadas ao consumo de eletricidade, transporte e produção de insumos. No Brasil, embora a matriz elétrica seja majoritariamente renovável, o que fornece certa vantagem quanto à sua matriz energética em comparação com a média global (GLOBALABC; UNEP, 2023), o setor da construção ainda depende de fontes fósseis em diversas etapas produtivas, o que o mantém como um dos principais emissores industriais do país (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2022).

A indústria cimenteira é especialmente relevante nesse contexto. A produção do clínquer — principal componente do cimento — envolve a calcinação do calcário (CaCO3) a cerca de 1450 °C, processo que libera CO_2 por duas vias principais: a decomposição química do Calcário, que responde por cerca de 60% das emissões do processo, e a queima de combustíveis fósseis, responsável pelos 40% restantes (BRASIL, 2010). Após a formação, o clínquer é resfriado, moído e combinado com adições minerais para a produção do cimento, tornando essa cadeia produtiva uma das maiores fontes de gases de efeito estufa no país (BRASIL, 2010; MCTI, 2022).

Outro material estrutural de grande relevância é o aço, cuja produção é igualmente intensiva em carbono. O processo inicia-se com a redução do minério de ferro em altos-fornos, utilizando coque — um derivado do carvão mineral — como agente redutor. Durante esse processo, o coque reage com os óxidos de ferro, gerando ferro metálico e liberando CO_2 tanto pela combustão quanto pelas reações químicas envolvidas (*International Energy Agency*, 2020). No Brasil, a indústria do aço permanece como uma fonte relevante de emissões industriais apesar dos progressos tecnológicos, o que estimula a investigação de soluções de baixo carbono (Instituto Aço Brasil, 2024). Assim, o projeto de uma edificação e a definição dos parâmetros estruturais exerce influência direta sobre o consumo de materiais e, consequentemente, sobre a emissão de dióxido de carbono (CO_2) associada à construção civil. Entre esses parâmetros, destacam-se a resistência característica do concreto (f_{ck}), as dimensões dos pilares e vigas, e os critérios de estabilidade global e deslocamentos admissíveis. Tais escolhas impactam não apenas o desempenho técnico da estrutura, mas também seu custo ambiental, dado o peso que materiais como cimento e aço têm na pegada de carbono da edificação, sendo possível correlacionar o quantitativo de material com a emissão de CO_2 para cada situação de interesse (Domingos; Mandaio; Gidrão, 2020).

Nesse contexto o presente trabalho pretende investigar a correlação entre as variáveis do projeto estrutural e a quantificação de CO2 emitido em uma edificação de concreto armado, buscando promover práticas com menor impacto ambiental na construção civil.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo caracteriza-se como um estudo de caso com abordagem quantitativa e comparativa, fundamentado na modelagem computacional de diferentes cenários estruturais com o objetivo de estimar e comparar as emissões de dióxido de carbono (CO_2) associadas a cada configuração.

A edificação analisada consiste em um prédio habitacional em concreto armado, projetado para representar uma construção de médio porte. As características do modelo base são:

- Altura: 10 pavimentos-tipo – 28 m de altura;

- Geometria: planta com 15 × 10 m e pé-direito de 2,80 m;

- Sistema construtivo: estrutura convencional em concreto armado, composta por lajes, vigas e pilares.

Todos os cenários foram modelados e dimensionados com o uso do software TQS®. A modelagem foi realizada com base nas diretrizes estabelecidas pelas normas técnicas brasileiras, em especial NBR 6118 (ABNT, 2026), NBR 6120 (ABNT, 2019) NBR 6123 (ABNT, 2023) e NBR 8681 (2025).

Para estimar as emissões de dióxido de carbono (CO_2) em projetos estruturais, é comum utilizar uma metodologia que considera a quantidade de cada material empregado, seu respectivo fator de perda e o fator de emissão de CO_2 associado ao uso do material na construção civil (Domingos; Mandaio; Gidrão, 2020). Essa abordagem segue princípios semelhantes aos propostos por Costa (2012), e destaca a importância de conhecer tanto as perdas quanto as emissões como parte essencial para avaliar os impactos ambientais.

Para o cálculo das emissões, utiliza-se a seguinte equação:

$$Emissões: MTj = QTj \,.\, FPj \,.\, FEPj$$

Onde:

- QTj: Representa a quantidade, em toneladas, do produto "j" necessária para a obra.

- *FPj*: Corresponde ao fator de perda do produto "j", sendo este um valor adimensional.
- *FEPj*: Indica o fator de emissão de CO_2 decorrente do uso do produto "j" em construções, expresso em toneladas de CO_2 por tonelada de produto final.

Para determinar a emissão de CO_2, aplicou-se o Fator de Perda (*FPj*) correspondente a cada material, conforme detalhado na metodologia de Agopyan *et al.* (1998). A análise começou com a consulta à Tabela 1, que apresenta os indicadores globais de perdas de materiais na obra.

Tabela 1. Fatores médios de perda de materiais (%)

Identificação	Média	Mínimo
Cimento	95	6
Areia	76	7
Brita	75	9
Aço	10	4

Para viabilizar a análise das emissões, a Tabela 2 estabelece os Fatores de Emissão de CO2 (*FEPj*) por tonelada de material. Esses fatores englobam as emissões de dióxido de carbono desde a extração das matérias-primas até o portão da obra, e são fundamentados nos dados e na metodologia propostos por Costa (2012).

Tabela 2. Fatores de emissão de CO_2 por tonelada de material produzido

Material	Fator de Emissão (t CO_2/t produto)
Cimento	0,652
Areia	0,086
Brita	0,086
Aço	1,845

Embora a Tabela 1 apresente indicadores globais de perdas de materiais com valores médios baseados na literatura clássica (Agopyan *et al.*, 1998), observa-se uma extrema discrepância entre as colunas Média e Mínimo para materiais críticos como Cimento (95% vs. 6%). O valor médio de 95% para a perda de cimento é considerado atipicamente alto no contexto da literatura (Meira et al., 1998). Mesmo existindo estudos que documentam perdas elevadas, como a perda de 66,67% de cimento observada em obras com gestão falha (Fávaro; Rocha, 2023), o valor de 95% está significativamente acima do consenso para o desperdício médio do cimento puro, comprometendo a robustez do cálculo.

Desta forma, e para contornar a fragilidade dos dados médios discrepantes e estabelecer uma análise focada na eficiência, prefere-se o Fator de Perda Mínimo para todos os materiais da Tabela 1. Esta premissa simula um cenário de melhores práticas e garante a coerência dos resultados, permitindo quantificar as emissões sob a ótica de um canteiro de obras otimizado. O Fator de Perda FPj utilizado no cálculo deriva-se do percentual mínimo de perda (FPj=1+Perda Mínima/100) para cada material.

Cada valor de resistência característica (f_{ck}) exige proporções distintas de cimento, areia e brita, conforme especificado na Tabela 3. A partir desses dados, foi viável transformar o volume total de concreto de cada arranjo nas massas de seus componentes e, em seguida, determinar as emissões de CO2.

Tabela 3. Traços do concreto para cada resistência

f_{ck} (MPa)	(Cimento : Areia : Brita : A/C)
40	1 : 1.8 : 2.7 : 0.48
35	1 : 2.0 : 2.8 : 0.52
30	1 : 2.2 : 3.0 : 0.58
25	1 : 2.4 : 3.2 : 0.64

A proporção de materiais em cada traço adotado (sem a consideração apenas do fator A/C a fim de focar apenas na emissão de CO2) é mostrada na Tabela 4.

Tabela 4. Proporção de Matéria Prima no Concreto

f_{ck}	Cimento (%)	Areia(%)	Brita 0(%)
40	17	31	45
35	15	32	44
30	14	33	44
25	13	34	44

Para a quantificação da emissão de CO2 (pegada de carbono) da estrutura, adotou-se um modelo de cálculo baseado no Ciclo de Vida com um escopo parcial que se estende até o canteiro de obras (*Cradle-to-Site* Parcial). Os coeficientes de emissão de CO2 específicos para o concreto foram determinados a partir dos traços fornecidos por uma concreteira estabelecida na região Oeste do Paraná, garantindo a representatividade local dos dados. A composição desses traços incluiu o consumo de cimento, agregados miúdos e graúdos para cada uma das classes de resistência características (fck 25, 30, 35 e 40 MPa) utilizadas nas simulações. Esta premissa foi fundamental para a análise, pois permitiu quantificar o impacto real dos diferentes traços de concreto na pegada de carbono, incluindo as emissões de transporte e as emissões geradas pelo

consumo de energia conforme o método de Costa (2012), destacado nos resultados.

O estudo comparativo foi conduzido a partir do dimensionamento estrutural de 20 modelos distintos, com formato de edifício seguindo a Figura 1, criados pela variação sistemática de dois parâmetros de projeto: a dimensão da seção transversal dos pilares e a resistência característica do concreto (f_{ck}).



Figura 1. Vista 3D do edifício em estudo.

As especificações geométricas e de materiais do objeto de estudo compreendem: vigas de seção 25 × 50 cm (pré dimensionadas com base na regra prática de 10% do vão livre, que seria de 5,0 m) e lajes com 15 cm de espessura (adotada para atender aos requisitos de serviço, como controle de flechas). O edifício é composto por um total de 10 pavimentos (incluindo o térreo), com pé-direito de 2,80 m por pavimento. Foram definidas cinco dimensões de pilares (de 30 × 30 cm a 50 × 50 cm, em incrementos de 5 cm), e cada dimensão foi dimensionada com quatro valores de f_{ck} (25MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa), totalizando às 20 configurações para análise.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise e dimensionamento estrutural foi conduzido de maneira a obter uma estrutura na qual os efeitos de segunda ordem possam ser desconsiderados, isto para evitar a inclusão de efeitos correspondentes a comportamento não linear da estrutura. Ou seja, para todas as configurações os coeficientes de estabilidade especificados na NBR6118 (ABNT, 2026) forneceram valores correspondentes a estrutura de nós fixos. Além disso para que as configurações sejam consideradas válidas deveriam satisfazer o Estado Limite de Serviço de deslocamento máximo no topo da estrutura, assim algumas configurações que não atendiam este critério foram descartadas, como mostrado na Tabela 5

Tabela 5. Verificação de deslocamento no topo

Pilares	f_{ck} (MPa)	Deslocamento (limite = 1,81cm)	Condição
30x30	25	1,94	Não Atende
30x30	30	1,75	Não Atende
30x30	35	1,59	Não Atende
30x30	40	1,47	Não Atende
35x35	25	1,18	Não Atende
35x35	30	1,07	Não Atende
35x35	35	0,97	Não Atende
35x35	40	0,90	Atende
40x40	25	0,81	Atende
40x40	30	0,63	Atende
40x40	35	0,58	Atende
40x40	40	0,53	Atende
45x45	25	0,60	Atende
45x45	30	0,54	Atende
45x45	35	0,49	Atende
45x45	40	0,46	Atende
50x50	25	0,48	Atende
50x50	30	0,43	Atende
50x50	35	0,39	Atende
50x50	40	0,36	Atende

A Tabela 6 mostra os consumos de aço e concreto para as configurações validades, esses consumos já incluem os fatores de perda. Pode-se observar que o aumento dos insumos é constante. Este padrão é uma consequência direta da variação das dimensões geométricas adotadas para os elementos estruturais ao longo das vinte configurações avaliadas.

No que diz respeito à massa de aço, o comportamento é mais complexo, sendo influenciado pela combinação da geometria dos pilares, da do f_{ck}, e das exigências normativas. Quando a comparação se dá entre configurações onde apenas a dimensão da

seção transversal do pilar é alterada, mantendo o f_{ck} fixo, observa-se um aumento na quantidade de aço. Este fenômeno é primariamente explicado pela exigência de armadura mínima longitudinal da norma, que é diretamente proporcional à área da seção de concreto. Isso implica que elementos mais robustos demandam mais aço, mesmo que a carga estrutural não o exija.

Tabela 6. Volumes de concreto e aço

Pilares (cm)	fck (MPa)	Concreto (t)	Aço (t)
40X40	25	1053,79	32,24
45X45	25	1083,30	32,44
50x50	25	1134,69	32,97
40X40	30	1134,58	29,66
45X45	30	1160,54	29,88
50x50	30	1207,67	31,64
40X40	35	1134,48	30,68
45X45	35	1160,43	30,87
50x50	35	1207,55	32,99
35X35	40	1084,52	31,19
40X40	40	1135,96	32,24
45X45	40	1161,95	32,44
50x50	40	1209,13	34,64

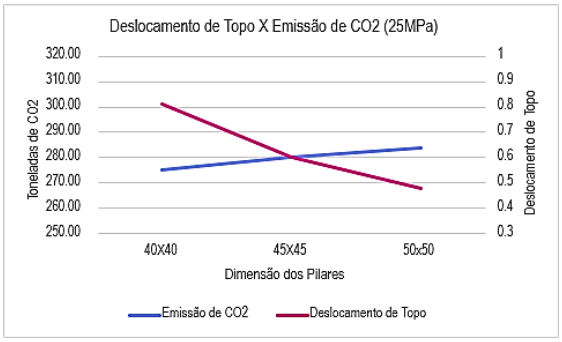
A variação do f_{ck} (com dimensão fixa) também impacta a massa de aço. É importante destacar que os pilares com o menor f_{ck} (25 MPa) exibem uma maior quantidade de aço em comparação com os de 30 MPa. Essa inversão sugere que a menor resistência do concreto exige uma armadura mais carregada para compensar a deficiência de resistência à compressão do material, a fim de garantir a capacidade portante. Por fim, a partir desses quantitativos de materiais, a Tabela 7 expõe as implicações ambientais do estudo, detalhando a emissão total de CO2 (em kg e t), com a devida discriminação por material, possibilitando uma avaliação completa da sustentabilidade das diferentes configurações.

Tabela 7. Emissão Total de CO2 por Quantidade de Material Consumido

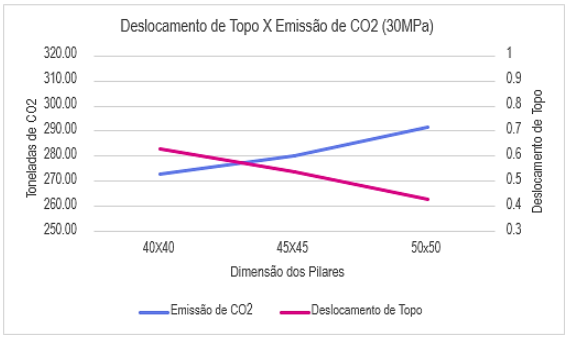
Pilar (cm)	f_{ck} (MPa)	Concreto (tCO_2)	Aço (tCO_2)	Total (tCO_2)
40X40	25	162,28	59,48	221,76
45X45	25	166,83	59,85	226,68
50x50	25	174,74	60,82	235,56
40X40	30	181,53	54,72	236,25
45X45	30	185,69	57,33	243,02
50x50	30	193,23	58,84	252,07
40X40	35	188,32	56,61	244,93
45X45	35	192,63	56,96	252,59
50x50	35	200,45	60,86	261,31
35X35	40	187,62	57,54	245,16
40X40	40	196,52	59,49	256,01
45X45	40	201,02	59,85	260,87
50x50	40	209,18	63,91	273,09

Para mostrar e analisar a relação de compromisso que existe entre rigidez estrutural e custo ambiental na Figura 2 são mostrados os gráficos que relacionam deslocamento lateral da edificação (avaliação da rigidez) com o consumo de carbono (custo ambiental) para cada valor de f_{ck} e dimensões de pilar analisadas.

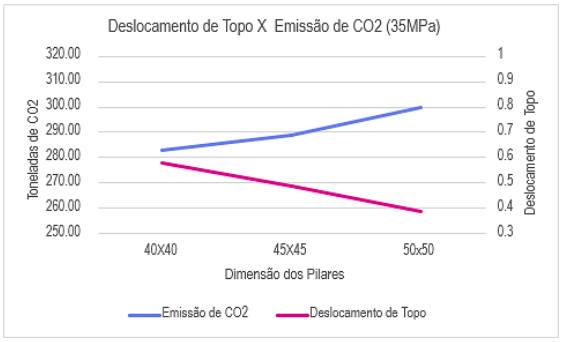
A relação é direta a medida que aumenta a seção do pilar e, ou, f_{ck}, embora torne a estrutura mais robusta, inevitavelmente aumenta a pegada de carbono do edifício.



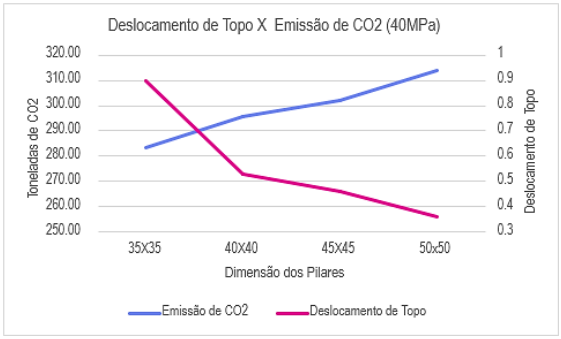
(a) f_{ck} = 25 MPa



(b) f_{ck} = 30 MPa



(c) f_{ck} = 35 MPa



(d) f_{ck} = 40 MPa

Figura 2. Comparação dos deslocamentos de topo e taxa de emissão de CO_2.

Como o deslocamento no topo e a emissão de carbono são parâmetros de sentido de variação contrário, ou seja, enquanto um decresce o outro decresce, conseguimos encontrar pontos ótimos de acordo com a necessidade do edifício, ou seja, ao estabelecer um parâmetro de deslocamento de topo necessário conseguimos a partir deste examinar uma dimensão coerente que esteja de acordo com o exigido e ofereça menor impacto ambiental, evitando o superdimensionamento e emissão excessiva de CO_2.

Observamos que a escolha do fck é um fator decisivo na localização do ponto ótimo do projeto. Para as resistências de concreto analisadas (entre 25 MPa e 40 MPa), a análise comparativa entre os fatores emissivos e os respectivos deslocamentos de topo, em função das dimensões dos pilares (Figuras 2.a) e 2.b), revela que o fator emissivo aumenta consideravelmente. Tal comparação gráfica oferece um instrumento valioso para auxiliar na escolha das geometrias que conciliam desempenho estrutural e impacto ambiental.

CONCLUSÃO

A investigação, baseada em simulações paramétricas, permitiu estabelecer uma correlação direta entre as variáveis de projeto estrutural: a resistência característica do concreto (f_{ck}), a dimensão da seção transversal dos pilares e a quantificação da pegada de carbono da edificação. A análise das variações evidenciou que estas decisões projetuais possuem um impacto ambiental, reforçando a necessidade de abordagens que busquem a sustentabilidade desde a fase de concepção estrutural.

A análise dos quatro cenários (Figuras 2.a a 2.d), considerando concretos com f_{ck} de 25, 30, 35 e 40 MPa, demonstrou que, para atender a um mesmo deslocamento de topo, o aumento da resistência do concreto permite a redução das dimensões dos pilares. Entretanto, mesmo com a diminuição das seções transversais, observou-se um aumento nas emissões de CO_2 à medida que o f_{ck} foi elevado. Esse resultado evidencia a complexidade da busca por soluções estruturalmente eficientes e ambientalmente sustentáveis. Embora o aumento da resistência do concreto (f_{ck}) possibilite a redução das dimensões dos elementos e do volume total de material empregado, esse benefício é parcialmente compensado pelas maiores emissões de CO_2 associadas ao aumento do teor de cimento nos concretos de alta resistência. Dessa forma, a minimização da pegada de carbono não pode ser avaliada apenas sob a perspectiva da redução dimensional, reforçando a necessidade de uma análise integrada entre a resistência do concreto e a geometria dos elementos estruturais para a identificação do ponto ótimo de projeto.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 6118:2026: projeto de estruturas de concreto. Rio de janeiro: ABNT, 2026.

ABNT. NBR 6120:2019: ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de janeiro: ABNT, 2019.

ABNT NBR 6123:2023: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ABNT. NBR 8681:2025: ações e segurança nas estruturas. Rio de janeiro: ABNT, 2003.

Agopyan, V.; Souza, U. E. L.; Paliari, J. C.; Andrade, A. C. Alternativas para a redução de desperdício de materiais nos canteiros de obras. São paulo: pcc/epusp, 1998.

Brasil. Ministério da Ciência e Tecnologia. Segundo inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa: relatórios de referência. Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais – produtos minerais. Parte i: produção de cimento. Elaborado por: sindicato nacional da indústria do cimento – snic; associação brasileira de cimento portland – abcp. Autores: josé otavio carvalho; yushiro kihara; carlos maia; gonzalo visedo. Brasília: mct, 2010. Disponível em: https://repositorio.mcti.gov.br/handle/mctic/5295. Acesso em: 24 maio 2025.

Brasil. Ministério da ciência, tecnologia e inovações (MCTI). Inventário nacional de emissões atmosféricas por fontes móveis e fixas. Brasília, 2022.

Brasil; reino unido. Riscos das mudanças climáticas no brasil: análise conjunta brasil-reino unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na amazônia. São josé dos campos: inpe; met office hadley centre, 2011.

CBIC. Panorama do mercado imobiliário é revisado por segmento. Brasília: CBIC, [2021]. Disponível em: https://cbic.org.br/panorama-do-mercado-imobiliario-e-revisado-por-segmento/. Acesso em: 28 maio 2025.

Costa, B. L. C. Quantificação das emissões de co_2 geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no brasil. 2012. 190 f. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, rio de janeiro, 2012.

Domingos, A. R.; Mandaio, D. C.; Gidrão, G. M. S. Correlação entre emissão de CO_2 e parâmetros de projeto estrutural para um edifício em concreto armado. Revista de engenharia e tecnologia, araras, v. 12, n. 3, p. 193, out. 2020. ISSN 2176-7270.

Fávaro, l. B.; rocha, l. R.; congro da. Análise do consumo e desperdício de materiais em uma obra de alvenaria convencional na cidade de dourados/ms. 2023. Trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia civil) – universidade federal da grande dourados (ufgd), dourados, 2023.

GLOBALABC; UNEP. Global status report 2023: towards a net zero emissions buildings and construction sector. 2023.acesso em: 10 jun. 2025.

Instituto Aço Brasil, 2024. Anuário da indústria do aço brasileiro 2023. Brasília, DF: instituto aço brasil, 2024. Disponível em: https://institutoacobrasil.org.br/anuario-da-industria-do-aco-brasileiro-2023/. Acesso em: 26 maio 2025.

International Energy Agency (IEA), 2020: international energy agency (IEA). Iron and steel technology roadmap: towards a low-carbon future. Paris: IEA, 2020. Disponível em: https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap. Acesso em: 26 maio 2025.

Meira, A. R.; Librelotto, L. I.; Santos, P. L.; Heineck, l. F. M. Metodologia para redução das perdas na construção civil. In: encontro nacional de engenharia de produção, 18., 1998, Niterói: Enegep, 1998. Acesso em: 29 maio 2025.

Mostafaei, H.; Badarloo, b.; Chamasemani, N. F.; Rostampour, m. A.; lehner, p. Investigating the effects of concrete mix design on the environmental impacts of reinforced concrete structures. Buildings, v. 13, n. 5, p. 1313, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/2075-5309/13/5/1313. Acesso em: 29 maio 2025.

SEEG – Sistema de estimativas de emissões de gases de efeito estufa no brasil: análise 2023. São paulo: oc, 2023. Disponível em: https://seeg.eco.br. Acesso em: 24 maio 2025.