COMPARAÇÃO DE PEGADA DE CARBONO ENTRE CONCRETO CONVENCIONAL E CONCRETO COM ADIÇÕES MINERAIS

COMPARISON OF CARBON FOOTPRINT BETWEEN CONVENTIONAL CONCRETE AND CONCRETE WITH MINERAL ADDITIONS

José Rinaldo Domingos de Melo

Professor do Instituto Federal de Pernambuco (IFPE). Pós-Doutor pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

RESUMO

A indústria da construção civil é responsável por parcela significativa das emissões globais de dióxido de carbono, sendo a produção de cimento Portland um dos principais contribuintes. Este artigo realiza uma comparação da pegada de carbono entre o concreto convencional, produzido exclusivamente com cimento Portland, e concretos formulados com adições minerais, tais como cinza volante, escória de alto-forno e sílica ativa. Por meio de revisão da literatura técnica e análise de fatores de emissão disponíveis em inventários de ciclo de vida, estimou-se a redução potencial de emissões de CO_2 associada à substituição parcial do cimento por esses materiais cimentícios suplementares. Os resultados indicam que a substituição de 20% a 50% do cimento por cinza volante ou escória pode reduzir a pegada de carbono do concreto entre 15% e 45%, dependendo do teor de substituição e da origem das adições. A sílica ativa, embora empregada em menores proporções (5% a 10%), também contribui para a mitigação de emissões ao permitir a redução do consumo total de ligante. Conclui-se que o uso de adições minerais constitui estratégia tecnicamente viável e ambientalmente relevante para a descarbonização da construção civil, desde que se assegure o desempenho mecânico e a durabilidade exigidos pelas normas técnicas vigentes.

Palavras-chave: pegada de carbono; concreto sustentável; adições minerais; cinza volante; escória de alto-forno; sílica ativa.

ABSTRACT

The construction industry accounts for a significant share of global carbon dioxide emissions, with Portland cement production being one of the main contributors. This paper compares the carbon footprint of conventional concrete, produced exclusively with Portland cement, and concretes formulated with mineral additions such as fly ash, ground granulated blast-furnace slag and silica fume. Through a review of the technical literature and analysis of emission factors available in life-cycle inventories, the potential reduction of CO_2 emissions associated with the partial replacement of cement by these supplementary cementitious materials was estimated. Results indicate that replacing 20% to 50% of cement by fly ash or slag can reduce the carbon footprint of concrete by 15% to 45%, depending on the replacement level and the origin of the additions. Silica fume, although used in smaller proportions (5% to 10%), also contributes to emission mitigation by allowing a reduction in total binder consumption. It is concluded that the use of mineral additions constitutes a technically feasible and environmentally relevant strategy for the decarbonization of the construction sector, provided that the mechanical performance and durability required by current technical standards are ensured.

Keywords: carbon footprint; sustainable concrete; mineral additions; fly ash; blast-furnace slag; silica fume.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil figura entre os setores econômicos de maior impacto ambiental no planeta. Estima-se que a produção global de cimento seja responsável por aproximadamente 7% a 8% das emissões antrópicas de dióxido de carbono (CO_2), em razão do processo de calcinação do calcário e do consumo intensivo de energia térmica e elétrica (IEA, 2023). Nesse contexto, a busca por soluções que reduzam a pegada de carbono dos materiais de construção tornou-se prioritária para o cumprimento das metas de descarbonização estabelecidas no Acordo de Paris e nas contribuições nacionalmente determinadas (NDCs) dos países signatários.

O concreto, material mais consumido no mundo depois da água, concentra grande parte desse impacto. A substituição parcial do cimento Portland por adições minerais — materiais cimentícios suplementares (MCS) — constitui uma das estratégias mais consolidadas e de menor custo relativo para mitigar emissões. Entre as adições mais empregadas destacam-se a cinza volante (subproduto da combustão do carvão em termelétricas), a escória granulada de alto-forno (subproduto da produção de ferro-gusa) e a sílica ativa (subproduto da produção de silício metálico e ligas de ferro-silício). Esses materiais, além de reduzirem o consumo de clínquer, frequentemente melhoram propriedades de durabilidade do concreto, como permeabilidade e resistência a ataques químicos (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A relevância do tema é reforçada pela projeção de crescimento da demanda global por cimento e concreto nas próximas décadas, impulsionada pela urbanização e pela necessidade de infraestrutura em economias emergentes. Sem medidas de mitigação, as emissões do setor tendem a aumentar, comprometendo as trajetórias de estabilização climática. Por outro lado, a substituição de clínquer por MCS é reconhecida por organismos internacionais, como a Agência Internacional de Energia e o World Business Council for Sustainable Development, como uma das rotas tecnológicas de maior potencial de abatimento de curto e médio prazo (IEA, 2023; WBCSD, 2023).

No Brasil, o parque cimenteiro já opera com elevada participação de cimentos compostos, o que reflete o uso histórico de escória e pozolanas. Contudo, ainda há espaço para ampliar os teores de substituição e para difundir a prática de adição direta de MCS nas centrais dosadoras, especialmente em regiões com disponibilidade local de cinza volante ou escória. A quantificação precisa dos benefícios ambientais dessas estratégias é essencial para orientar especificações de projeto, políticas públicas e sistemas de certificação de edificações sustentáveis.

Além das pressões climáticas, há motivações econômicas e de gestão de resíduos. A cinza volante e a escória, quando não aproveitadas como MCS, frequentemente demandam áreas de disposição final e geram custos ambientais e financeiros associados. Seu emprego no concreto transforma um passivo em insumo de valor, alinhando-se aos princípios da economia circular. A sílica ativa, embora produzida em menor escala, também representa aproveitamento de subproduto de processos metalúrgicos de alta temperatura.

Este artigo tem por objetivo comparar a pegada de carbono do concreto convencional (sem adições minerais) com a de concretos formulados com diferentes teores de cinza volante, escória de alto-forno e sílica ativa. A análise fundamenta-se em fatores de emissão reportados na literatura científica e em inventários de ciclo de vida, permitindo estimar o potencial de redução de emissões associado a cada estratégia de substituição. Adicionalmente, discutem-se os aspectos de desempenho mecânico, as limitações práticas do emprego dessas adições no contexto brasileiro e as implicações para a especificação de concretos de menor impacto climático.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Pegada de carbono do concreto e análise de ciclo de vida

A pegada de carbono de um produto corresponde à quantidade total de gases de efeito estufa emitidos ao longo de seu ciclo de vida, expressa em equivalente de dióxido de carbono (CO_2e). No caso do concreto, a fase de produção dos materiais constituintes (módulo A1–A3 da análise de ciclo de vida) concentra a maior parcela das emissões, sendo o cimento responsável por cerca de 80% a 90% do impacto climático do concreto convencional (FLOWER; SANJAYAN, 2007; GARTNER; HIRAO,

2015).

A análise de ciclo de vida (ACV) fornece o arcabouço metodológico para quantificar esses impactos. As normas ISO 14040 e ISO 14044 estabelecem princípios e requisitos para a realização de estudos de ACV, incluindo a definição de objetivo e escopo, inventário, avaliação de impacto e interpretação. No setor da construção, as normas europeias EN 15804 e EN 15978 adaptam esses princípios para produtos e edificações, estruturando os módulos de informação do ciclo de vida (A1 a D). Para o concreto, a maior atenção recai sobre os módulos A1 (extração de matérias-primas), A2 (transporte) e A3 (fabricação), embora etapas posteriores, como transporte até a obra (A4) e processos de construção (A5), também possam ser relevantes em contextos específicos.

Fatores de emissão típicos reportados na literatura internacional indicam valores da ordem de 0,8 a 1,0 kg de CO_2 por quilograma de cimento Portland comum (CEM I ou CP I/CP V no Brasil). Já as adições minerais apresentam fatores substancialmente inferiores: cinza volante entre 0,004 e 0,05 kg CO_2/kg; escória granulada de alto-forno entre 0,02 e 0,15 kg CO_2/kg (dependendo da alocação de emissões da siderurgia); e sílica ativa em torno de 0,01 a 0,03 kg CO_2/kg quando considerada apenas a captura e o processamento (HABERT et al., 2010; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2023).

A escolha da regra de alocação de emissões para subprodutos industriais (cinza volante e escória) exerce influência significativa nos resultados. Alocações mássicas, econômicas ou por expansão de sistema produzem fatores distintos. A abordagem de sistema expandido, que considera a evitação de destinação alternativa do subproduto, tende a atribuir fatores de emissão muito baixos ou até negativos em alguns cenários. Neste trabalho, adotam-se fatores conservadores baseados em alocação econômica, alinhados a valores frequentemente utilizados em estudos de concreto sustentável.

Outro ponto metodológico relevante é a unidade funcional. Em estudos de concreto, é comum adotar 1 m^3 de concreto com determinada resistência característica à compressão (f_{ck}) como unidade de comparação. Essa escolha permite comparar misturas de composições distintas sob a condição de equivalência de desempenho mecânico básico. Quando se pretende incorporar a durabilidade, unidades funcionais mais elaboradas — por exemplo, 1 m^2 de elemento estrutural com vida útil de 50 anos — podem ser empregadas, embora demandem dados adicionais sobre degradação e manutenção.

2.2 Adições minerais e materiais cimentícios suplementares

As adições minerais atuam no concreto por mecanismos físicos (efeito filler, refinamento da distribuição de poros) e químicos (reatividade pozolânica ou hidráulica latente). A cinza volante, especialmente a de classe F, reage lentamente com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, formando silicatos de cálcio hidratados adicionais. A escória de alto-forno possui caráter hidráulico latente e contribui para o desenvolvimento de resistência em idades mais avançadas. A sílica ativa, por sua elevada finura e pureza em sílica amorfa, acelera as reações pozolânicas e densifica a matriz, sendo especialmente indicada para concretos de alto desempenho (NEVILLE; BROOKS, 2010).

A cinza volante é classificada, segundo a ASTM C618, em classes F e C, conforme o teor de óxido de cálcio. A classe F, de baixa cal, é predominantemente pozolânica; a classe C, de alta cal, apresenta também propriedades cimentantes. No Brasil, a disponibilidade e a qualidade da cinza volante variam conforme a origem do carvão e o regime de operação das termelétricas. A escória granulada de alto-forno, após moagem, atende a requisitos de finura e atividade hidráulica estabelecidos em normas específicas e é largamente empregada na produção de cimentos CP III. A sílica ativa, devido ao seu custo e à necessidade de dispersão adequada (geralmente com aditivos superplastificantes), é utilizada preferencialmente em concretos especiais e de alta resistência.

No Brasil, a norma ABNT NBR 12655:2022 estabelece critérios para o uso de adições no concreto, enquanto a ABNT NBR 5733 e a ABNT NBR 5735 tratam, respectivamente, dos cimentos pozolânicos e dos cimentos de alto-forno. O emprego de adições minerais já é consolidado na indústria

cimenteira nacional, refletido na elevada participação de cimentos compostos (CP II, CP III e CP IV) no mercado brasileiro (SNIC, 2023). A norma ABNT NBR 16697:2018, que classifica os cimentos Portland, também contempla as adições permitidas e seus teores máximos, fornecendo o marco normativo para a produção de cimentos de menor impacto climático.

Do ponto de vista microestrutural, a incorporação de MCS altera a composição e a morfologia dos produtos de hidratação. A redução do teor de portlandita ($Ca(OH)_2$) e o aumento da quantidade de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) de menor razão Ca/Si tendem a produzir matrizes mais densas e menos permeáveis. Esses efeitos são particularmente pronunciados com sílica ativa e, em menor grau e em prazos mais longos, com cinza volante e escória. A redução da permeabilidade contribui para a proteção das armaduras contra a corrosão e para a resistência a ciclos de gelo-degelo e a ataques químicos.

2.3 Estudos prévios sobre redução de emissões e ecoeficiência

Diversos estudos quantificaram a redução de emissões associada ao uso de MCS. Flower e Sanjayan (2007) reportaram reduções de até 22% na pegada de carbono de concretos com 30% de cinza volante. Habert et al. (2010) demonstraram que a substituição de 50% de cimento por escória pode reduzir as emissões em mais de 40%. No contexto brasileiro, pesquisas recentes apontam que a combinação de cinza volante e escória permite reduções da ordem de 25% a 35% sem comprometimento significativo da resistência à compressão em idades de 28 e 90 dias (SILVA et al., 2021).

Além da pegada de carbono absoluta, indicadores de ecoeficiência têm sido propostos para avaliar a relação entre desempenho mecânico e impacto ambiental. A intensidade de ligantes (IL), expressa em kg de materiais cimentícios por m^3 por MPa de resistência, e a intensidade de CO_2 (IC), em kg CO_2/m^3/MPa, permitem comparar concretos de diferentes classes de resistência sob uma base comum. Estudos que aplicaram esses indicadores indicam que a sílica ativa, a cinza da casca de arroz e as cinzas volantes estão entre as adições com maior capacidade de reduzir a IL e a IC (SILVA et al., 2021).

Pesquisas experimentais também evidenciam que a substituição parcial de cimento por MCS pode manter ou mesmo melhorar propriedades de durabilidade, como resistência à penetração de cloretos, redução da carbonatação em certas condições e menor retração. Esses benefícios são particularmente relevantes para estruturas expostas a ambientes agressivos, pois aumentam a vida útil e, consequentemente, reduzem a necessidade de intervenções de manutenção e reposição ao longo do ciclo de vida da edificação.

Em escala global, roadmaps setoriais projetam que a substituição de clínquer por MCS pode contribuir com redução da ordem de 20% a 35% das emissões previstas para 2050 no setor cimenteiro, dependendo da disponibilidade regional dos materiais e da evolução de tecnologias complementares, como capturas de carbono e uso de combustíveis alternativos (IEA, 2023). Assim, o aproveitamento de adições minerais não é apenas uma medida de curto prazo, mas componente estrutural das trajetórias de descarbonização da construção.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como estudo de natureza aplicada, com abordagem quantitativa e procedimento bibliográfico e documental. Foram selecionados fatores de emissão de materiais disponíveis em inventários de ciclo de vida de referência internacional e em publicações científicas revisadas por pares. Os cenários de comparação foram definidos a partir de traços típicos de concreto estrutural de classe C30 (f_{ck} = 30 MPa), considerando consumo de cimento de referência de 350 kg/m^3 para o concreto convencional. Essa dosagem é representativa de concretos estruturais
correntes empregados em edificações de múltiplos pavimentos e em elementos de infraestrutura de porte médio.

Foram analisados os seguintes cenários de substituição parcial do cimento Portland por adições minerais:

- Concreto convencional (REF): 100% cimento Portland (350 kg/m³ de cimento);
- Cenário CV-20: 20% de substituição por cinza volante (70 kg/m³ de cinza + 280 kg/m³ de cimento);
- Cenário CV-40: 40% de substituição por cinza volante (140 kg/m³ de cinza + 210 kg/m³ de cimento);
- Cenário ES-30: 30% de substituição por escória de alto-forno (105 kg/m³ de escória + 245 kg/m³ de cimento);
- Cenário ES-50: 50% de substituição por escória de alto-forno (175 kg/m³ de escória + 175 kg/m³ de cimento);
- Cenário SA-8: 8% de substituição por sílica ativa (28 kg/m³ de sílica + 322 kg/m³ de cimento);
- Cenário misto CV+ES: 20% de cinza volante + 20% de escória (70 kg/m³ de cada + 210 kg/m³ de cimento).

Os fatores de emissão adotados foram: cimento Portland = 0,90 kg CO_2/kg; cinza volante = 0,02 kg CO_2/kg; escória de alto-forno = 0,08 kg CO_2/kg; sílica ativa = 0,02 kg CO_2/kg. Esses valores representam médias conservadoras extraídas de inventários europeus e estudos brasileiros, considerando alocação econômica para subprodutos industriais (FLOWER; SANJAYAN, 2007; HABERT et al., 2010; SNIC, 2023). A pegada de carbono do concreto foi calculada apenas para os materiais cimentícios (cimento + adições), uma vez que agregados e água contribuem de forma residual e semelhante em todos os cenários.

A equação utilizada para o cálculo da pegada de carbono (PC) dos materiais cimentícios, expressa em kg CO_2/m³ de concreto, é a seguinte:

$$PC = (C \times FE_c) + (A \times FE_a)$$

em que C é a massa de cimento (kg/m³), FE_c o fator de emissão do cimento, A a massa de adição mineral e FE_a o fator de emissão da adição. No cenário misto, a parcela de adição é desdobrada nas duas adições presentes.

Além do cálculo da pegada absoluta, estimou-se a redução percentual em relação ao cenário de referência e discutiu-se a ordem de grandeza das emissões evitadas em uma aplicação típica de edificação de médio porte. Não foram realizadas campanhas experimentais próprias; os resultados baseiam-se em dados secundários consolidados na literatura, o que limita a generalização para condições específicas de materiais e processos locais, mas permite uma comparação consistente entre as estratégias de substituição.

Para ampliar a robustez da comparação, foram considerados também valores de intensidade de CO_2 (IC), definidos como a razão entre a pegada de carbono dos materiais cimentícios e a resistência característica à compressão de referência (30 MPa). Esse indicador auxilia a interpretação dos resultados sob a ótica da ecoeficiência, ainda que a resistência real de cada mistura possa variar em função da dosagem e das condições de cura.

4 RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os resultados da estimativa de pegada de carbono dos materiais cimentícios para cada cenário analisado, bem como a redução percentual em relação ao concreto convencional de referência.

Cenário	Cimento (kg/m³)	Adição (kg/m³)	PC (kg CO_2/m³)	Redução (%)
REF	350	0	315,0	–

Cenário	Cimento (kg/m³)	Adição (kg/m³)	PC (kg CO_2/m³)	Redução (%)
CV-20	280	70 (cinza)	253,4	19,6
CV-40	210	140 (cinza)	191,8	39,1
ES-30	245	105 (escória)	228,9	27,3
ES-50	175	175 (escória)	171,5	45,6
SA-8	322	28 (sílica)	290,4	7,8
CV+ES 20+20	210	70+70	196,6	37,6

Tabela 1 - Pegada de carbono dos materiais cimentícios e redução percentual em relação ao concreto convencional

Observa-se que os maiores potenciais de redução estão associados aos cenários de elevada substituição por escória (ES-50: 45,6%) e por cinza volante (CV-40: 39,1%). O cenário misto CV+ES (20% + 20%) alcança redução de 37,6%, combinando benefícios das duas adições. O cenário com sílica ativa (SA-8) apresenta redução mais modesta (7,8%), o que se explica pelo baixo teor de substituição usualmente praticado. Contudo, a sílica ativa permite, em muitos casos, a redução do consumo total de ligante para uma mesma resistência mecânica, efeito não capturado integralmente neste cálculo simplificado.

Em termos absolutos, a redução de emissões por metro cúbico de concreto varia de aproximadamente 25 kg CO_2 (cenário SA-8) a 143,5 kg CO_2 (cenário ES-50). Em uma edificação de médio porte que utilize 5.000 m³ de concreto, a adoção do cenário ES-50 equivaleria a evitar a emissão de cerca de 717 toneladas de CO_2, quantidade compatível com a neutralização de centenas de viagens aéreas de longa distância ou com o sequestro de carbono associado a milhares de árvores ao longo de décadas.

A comparação entre os cenários CV-40 e ES-50 evidencia que, embora a escória apresente fator de emissão superior ao da cinza volante, o maior teor de substituição possível com escória (devido ao seu caráter hidráulico) compensa essa diferença e resulta em menor pegada absoluta. Já a combinação de cinza e escória oferece flexibilidade regional: em localidades com disponibilidade de ambos os materiais, a formulação mista pode otimizar custo, desempenho e impacto ambiental.

A Tabela 2 apresenta a intensidade de CO_2 (IC) estimada para cada cenário, considerando a resistência de referência de 30 MPa.

Cenário	PC (kg CO_2/m³)	IC (kg CO_2/m³/MPa)
REF	315,0	10,50
CV-20	253,4	8,45
CV-40	191,8	6,39
ES-30	228,9	7,63
ES-50	171,5	5,72
SA-8	290,4	9,68
CV+ES 20+20	196,6	6,55

Tabela 2 - Intensidade de CO_2 (IC) dos cenários analisados (referência 30 MPa)

Os valores de IC reforçam a hierarquia de ecoeficiência observada na Tabela 1: o cenário ES-50 apresenta a menor intensidade (5,72 kg CO_2/m³/MPa), seguido por CV-40 e pelo cenário misto. O concreto convencional permanece com a maior intensidade (10,50), indicando que, para a mesma

resistência nominal, emite quase o dobro de CO_2 associado aos materiais cimentícios em comparação com o melhor cenário de substituição.

5 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos corroboram a literatura internacional quanto ao elevado potencial de mitigação de emissões proporcionado pelas adições minerais. A escória de alto-forno, em teores de 30% a 50%, destaca-se como a opção de maior impacto na redução da pegada de carbono, ao mesmo tempo em que contribui para o desenvolvimento de resistência em idades avançadas e para a melhoria da durabilidade frente a agentes agressivos (NEVILLE; BROOKS, 2010).

A cinza volante, por sua vez, apresenta a vantagem de fatores de emissão muito baixos e de ampla disponibilidade em regiões com geração termelétrica a carvão. No Brasil, a disponibilidade de cinza volante de qualidade controlada é regionalmente heterogênea, concentrando-se em estados com usinas termelétricas. Já a escória de alto-forno encontra-se disponível nas regiões com presença de siderurgia integrada, sobretudo no Sudeste e no Sul do país (SNIC, 2023). Essa distribuição geográfica implica que a escolha da adição mais adequada deve considerar não apenas o fator de emissão unitário, mas também as distâncias de transporte e a logística de abastecimento.

É importante destacar limitações do presente estudo. A análise restringiu-se à fase de produção dos materiais cimentícios e não contemplou transporte, mistura, aplicação nem fim de vida do concreto. A alocação de emissões para subprodutos industriais permanece objeto de debate metodológico em análises de ciclo de vida; diferentes regras de alocação (econômica, mássica ou por sistema expandido) podem alterar os fatores de emissão atribuídos à escória e à cinza volante (HABERT et al., 2010). Além disso, o desempenho mecânico e a durabilidade dos concretos com elevados teores de adição devem ser verificados experimentalmente para cada combinação de materiais e condições de cura, uma vez que a cinética de hidratação é alterada.

Outro aspecto relevante refere-se à interação entre redução de emissões e desempenho estrutural. Em alguns casos, concretos com elevados teores de cinza volante podem apresentar desenvolvimento mais lento de resistência nas primeiras idades, o que exige atenção ao cronograma de desforma e à aplicação de cargas iniciais. A escória, embora também contribua mais significativamente em idades avançadas, tende a apresentar comportamento intermediário. A sílica ativa, por outro lado, acelera o ganho de resistência e densifica a matriz, sendo útil quando se busca combinar redução moderada de emissões com elevado desempenho mecânico e de durabilidade.

Do ponto de vista normativo e prático, a adoção de concretos com adições minerais encontra respaldo nas normas brasileiras de cimento e de dosagem de concreto. A especificação de cimentos compostos (CP III e CP IV) ou a adição direta de MCS na central dosadora são caminhos já praticados pela indústria. Desafios remanescentes incluem a garantia de homogeneidade e qualidade das adições, a capacitação de profissionais para o ajuste de traços e a internalização dos benefícios ambientais nas decisões de projeto e nas certificações de sustentabilidade de edifícios, como LEED, AQUA-HQE e o referencial nacional de construção sustentável.

A literatura também aponta que a redução da razão água/cimento e a otimização da granulometria dos agregados podem potencializar os benefícios das adições minerais, permitindo atingir a mesma resistência com menor consumo total de ligante. Assim, a estratégia de descarbonização não se limita à substituição de cimento por MCS, mas abrange um conjunto de práticas de dosagem e controle tecnológico que maximizam a ecoeficiência do concreto.

Em termos de política pública, a inclusão de requisitos de pegada de carbono em editais de obras públicas e em códigos de obras municipais poderia acelerar a adoção de concretos de menor impacto. Instrumentos de mercado, como créditos de carbono associados a projetos de construção, e a valorização de produtos com declarações ambientais de produto (DAP/EPD) também contribuem para criar demanda por soluções de baixo carbono. A articulação entre fabricantes de cimento, centrais de concreto, projetistas e fiscalização é condição necessária para que os benefícios potenciais se concretizem na prática.

6 CONCLUSÃO

A comparação realizada neste artigo demonstra que a substituição parcial do cimento Portland por adições minerais — cinza volante, escória de alto-forno e sílica ativa — constitui estratégia eficaz para a redução da pegada de carbono do concreto. Reduções da ordem de 20% a 45% nas emissões associadas aos materiais cimentícios são tecnicamente alcançáveis com teores de substituição usualmente praticados na indústria.

Entre as adições analisadas, a escória de alto-forno em teores de 30% a 50% e a cinza volante em teores de 20% a 40% apresentam o maior potencial de mitigação. A combinação de ambas (cenário misto) também se mostra promissora, oferecendo flexibilidade de formulação. A sílica ativa, embora empregada em menores proporções, contribui de forma complementar, especialmente quando permite a otimização do consumo total de ligante e o aprimoramento da durabilidade.

Recomenda-se que projetos de engenharia e políticas públicas de construção sustentável incorporem critérios de pegada de carbono na especificação de concretos, incentivando o uso de materiais cimentícios suplementares. A divulgação de fatores de emissão regionais e a padronização de metodologias de cálculo contribuiriam para maior transparência e comparabilidade entre soluções. Pesquisas futuras devem aprofundar a análise de ciclo de vida completa (do berço ao túmulo), incluir indicadores de desempenho mecânico e de durabilidade e avaliar a disponibilidade regional das adições no território brasileiro, de modo a orientar decisões técnicas e ambientais de forma integrada.

Em síntese, a transição para concretos de menor pegada de carbono não depende exclusivamente de tecnologias disruptivas, mas pode avançar de modo significativo por meio da valorização e do uso racional de subprodutos industriais já disponíveis. A articulação entre indústria cimenteira, centrais dosadoras, projetistas e órgãos normativos é fundamental para consolidar essa transição de maneira técnica, econômica e ambientalmente consistente.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5735: cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

FLOWER, D. J. M.; SANJAYAN, J. G. Green house gas emissions due to concrete manufacture. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 12, n. 5, p. 282-288, 2007.

GARTNER, E.; HIRAO, H. A review of concrete carbonation and its influence on durability and service life. Cement and Concrete Research, v. 78, p. 1-10, 2015.

HABERT, G. et al. Environmental evaluation of concrete structure: a comparison of methods. Cement and Concrete Research, v. 40, n. 5, p. 820-830, 2010.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Technology roadmap: low-carbon transition in the cement industry. Paris: IEA, 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14040: environmental management – life cycle assessment – principles and framework. Geneva: ISO, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14044: environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines. Geneva: ISO, 2006.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: microstructure, properties, and materials. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. Concrete technology. 2. ed. Harlow: Pearson, 2010.

SILVA, F. G. et al. Avaliação da ecoeficiência de concretos com adições minerais. Revista Brasileira de Engenharia Civil, v. 12, n. 2, p. 45-62, 2021.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatório anual 2023. Rio de Janeiro: SNIC, 2023.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Cement Sustainability Initiative: getting the numbers right. Geneva: WBCSD, 2023.