

CONCRETO VERDE: UMA ALTERNATIVA PARA REDUÇÃO DA EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) NA CONSTRUÇÃO CIVIL E UMA ABRANGÊNCIA PARA OBTENÇÃO DA CERTIFICAÇÃO LEED**GREEN CONCRETE: AN ALTERNATIVE FOR REDUCING CARBON DIOXIDE (CO₂) EMISSIONS IN CIVIL CONSTRUCTION AND A SCOPE FOR OBTAINING LEED CERTIFICATION****HORMIGÓN VERDE: UNA ALTERNATIVA PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) EN LA CONSTRUCCIÓN CIVIL Y UNA POSIBILIDAD PARA OBTENER LA CERTIFICACIÓN LEED**

<https://doi.org/10.56238/ERR01v10n6-058>

Beatriz Quirino Santana de Lima

Graduação em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Anhembi Morumbi (UAM)

E-mail: Beatrizqsantana.15@gmail.com

Estêvão de Amorim Silva

Graduação em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Anhembi Morumbi (UAM)

E-mail: tetoamorim2001@gmail.com

João Pedro Silva Carvalhais

Graduação em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Anhembi Morumbi (UAM)

E-mail: jpcarvalhais34@gmail.com

Maria Eduarda Bonfim da Silva Gomes

Graduação em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Anhembi Morumbi (UAM)

E-mail: mariaeduardabsg@gmail.com

Pamela Pereira Araujo

Graduação em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Anhembi Morumbi (UAM)

E-mail: pamelaarauju9875@gmail.com

Ricardo Rego Akel

Graduação em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Anhembi Morumbi (UAM)

E-mail: akelricardo@gmail.com

Estevão Xavier Volpini

Professor orientador

RESUMO

Este estudo investiga o concreto verde como solução estratégica para a decarbonização da construção civil, focando na alta emissão associada à produção de cimento. Objetiva analisar a redução da pegada de carbono obtida pela substituição parcial do cimento por Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) — como Escória de Alto-Forno, Cinza Volante e Argilas Calcinadas — e estabelecer a correlação direta desta mitigação com a obtenção da certificação LEED. A pesquisa utiliza uma metodologia de revisão bibliográfica e análise de dados técnicos sobre emissões, desempenho mecânico e critérios de certificação. Os resultados demonstram que os MCS possuem emissões intrínsecas drasticamente inferiores às do cimento (reduções superiores a 90%) e, frequentemente, otimizam o desempenho mecânico e a durabilidade. O trabalho conclui que a especificação do concreto verde, validada por ferramentas como Análise do Ciclo de Vida (ACV) e Declarações Ambientais de Produto (EPD), constitui uma alternativa tecnicamente robusta e uma estratégia pragmática para atender aos créditos na categoria Materiais e Recursos (MR) do LEED.

Palavras-chave: Concreto Verde. Dióxido de Carbono. Cimento Portland. Materiais Cimentícios Suplementares (MCS). Certificação LEED.

ABSTRACT

This study investigates green concrete as a strategic solution for the decarbonization of civil construction, focusing on the high emissions associated with cement production. It aims to analyze the reduction in carbon footprint obtained by partially replacing cement with Supplemental Cementitious Materials (SCMs) — such as blast furnace slag, fly ash, and calcined clays — and to establish the direct correlation of this mitigation with obtaining LEED certification. The research uses a methodology of bibliographic review and analysis of technical data on emissions, mechanical performance, and certification criteria. The results demonstrate that SCMs have drastically lower intrinsic emissions than cement (reductions greater than 90%) and frequently optimize mechanical performance and durability. The work concludes that the specification of green concrete, validated by tools such as Life Cycle Assessment (LCA) and Environmental Product Declarations (EPDs), constitutes a technically robust alternative and a pragmatic strategy to meet the credits in the Materials and Resources (MR) category of LEED.

Keywords: Green Concrete. Carbon Dioxide. Portland Cement. Supplemental Cementitious Materials (SCM). LEED Certification.

RESUMEN

Este estudio investiga el hormigón verde como solución estratégica para la descarbonización de la construcción civil, centrándose en las elevadas emisiones asociadas a la producción de cemento. Su objetivo es analizar la reducción de la huella de carbono obtenida mediante la sustitución parcial del cemento por Materiales Cementantes Suplementarios (MCS), como la escoria de alto horno, las cenizas volantes y las arcillas calcinadas, y establecer la correlación directa de esta mitigación con la obtención de la certificación LEED. La investigación emplea una metodología de revisión bibliográfica y análisis de datos técnicos sobre emisiones, comportamiento mecánico y criterios de certificación. Los resultados demuestran que los MCS presentan emisiones intrínsecas drásticamente inferiores al cemento (reducciones superiores a 90%) y, frecuentemente, optimizan el rendimiento mecánico y la durabilidad. El trabajo concluye que la especificación del concreto verde, validada por herramientas como la Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y las Declaraciones Ambientales de Producto (EPD), constituye una alternativa técnicamente robusta y una estrategia pragmática para cumplir los créditos en la categoría Materiales y Recursos (MR) del LEED.

inferiores a las del cemento (reducciones superiores al 90%) y, con frecuencia, optimizan el comportamiento mecánico y la durabilidad. El trabajo concluye que la especificación del hormigón verde, validada mediante herramientas como el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP), constituye una alternativa técnicamente sólida y una estrategia pragmática para cumplir con los créditos de la categoría de Materiales y Recursos (MR) de LEED.

Palabras clave: Hormigón Verde. Dióxido de Carbono. Cemento Portland. Materiales Cementantes Suplementarios (SCM). Certificación LEED.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil consolida-se como um pilar estratégico para o desenvolvimento socioeconômico, exercendo impacto direto no Produto Interno Bruto (PIB) e na geração de empregos. No Brasil, dados da Pesquisa Anual da Indústria da Construção (PAIC) atestam essa relevância (IBGE, 2023). Entretanto, o setor é um dos maiores consumidores de recursos naturais e, crucialmente, um dos principais emissores de gases de efeito estufa (GEE), respondendo por uma fração significativa do consumo global de recursos (PAZ, 2019).

O desafio central desse impacto reside na dependência intrínseca do setor pelo concreto, cujo aglomerante principal, o cimento Portland, é um dos materiais mais consumidos pela humanidade. A indústria cimenteira, por si só, é responsável por aproximadamente 8% de todas as emissões globais de dióxido de carbono (CO_2) (IEA, 2021). É fundamental destacar que a maior parcela dessas emissões não provém da queima de combustíveis, mas é inerente ao processo químico de calcinação do carbonato de cálcio (CaCO_3) para a produção do clínquer (MEHTA; MONTEIRO, 2014) — o principal componente do cimento.

Neste contexto, a mitigação das emissões do setor passa, obrigatoriamente, pela redução do "fator clínquer" na matriz cimentícia. Emerge, assim, o conceito técnico de "Concreto Verde". Longe de ser uma definição genérica, o concreto verde, no escopo deste trabalho, refere-se especificamente a compósitos onde o cimento Portland é parcialmente substituído por Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), tais como a escória de alto-forno (GGBS), a cinza volante (fly ash) e as argilas calcinadas (LC3). Esta substituição ataca diretamente a fonte das emissões (o clínquer), ao mesmo tempo em que valoriza coprodutos industriais.

Entretanto, a simples aplicação de MCS requer um sistema de validação que quantifique o benefício ambiental e o reconheça no mercado. Esta é a abrangência da certificação LEED (Leadership in Energy and Environmental Design). O LEED, gerenciado pelo Green Building Council (GBC BRASIL, 2024), é o sistema de certificação de green buildings de maior reconhecimento global. A certificação evoluiu para além de estratégias prescritivas, focando na mensuração de desempenho através da Análise de Ciclo de Vida (ACV) e da redução do "carbono incorporado" (embodied carbon) dos materiais, notadamente na categoria Materiais e Recursos (MR).

2 DESENVOLVIMENTO

O presente trabalho propõe-se a analisar como a adoção do concreto verde, através da substituição do cimento Portland por MCS, constitui uma alternativa viável para a redução efetiva das emissões de dióxido de carbono. O objetivo é estabelecer a correlação direta entre as reduções



quantificáveis de CO₂ proporcionadas por estes materiais e a contribuição estratégica desta escolha para a obtenção de créditos na certificação LEED.

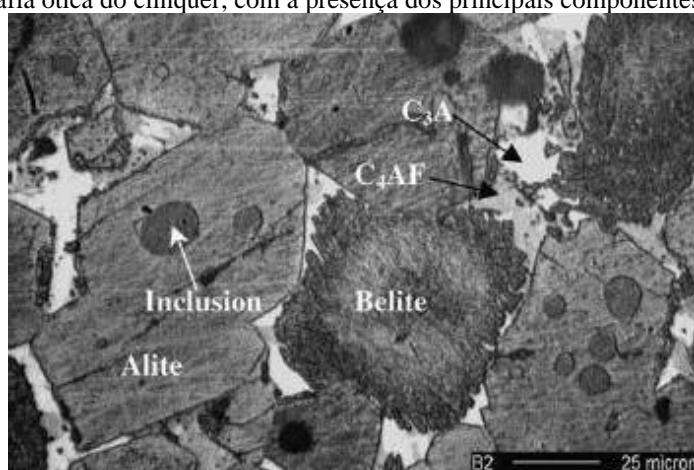
2.1 CIMENTO PORTLAND: UM PILAR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

O Cimento Portland, aglomerante hidráulico mais utilizado mundialmente (ABCP, 2023), é um material pulverulento fino obtido pela moagem do clínquer (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O clínquer, por sua vez, é um produto sintético nodular resultante da sinterização, a aproximadamente 1450°C, de matérias-primas ricas em calcário e argila (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Durante a moagem do clínquer para a produção do cimento, adiciona-se sulfato de cálcio para regular o tempo de pega (ABNT NBR 16697, 2018).

Quimicamente, o processo de clinquerização promove reações entre os óxidos das matérias-primas, formando as fases cristalinas que conferem ao cimento suas propriedades hidráulicas. As fases principais são a Alita (Silicato Tricálcico – C₃S) responsável pela resistência inicial; a Belita (Silicato Dicálcico – C₂S), que contribui para a resistência em idades avançadas; o Aluminato Tricálcico (C₃A), controlador da pega; e o Ferroaluminato Tetracálcico (C₄AF), que atua como fundente no processo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A produção deste material, contudo, possui um significativo impacto ambiental, sendo a indústria cimenteira responsável por cerca de 8% das emissões globais de CO₂ (IEA, 2021). Essas emissões derivam de duas fontes: as emissões térmicas (responsáveis por ~40% das emissões), oriundas da combustão para aquecimento dos fornos; e, majoritariamente, as emissões de processo (responsáveis por ~60% das emissões), intrínsecas à reação de calcinação do carbonato de cálcio (CaCO₃) em óxido de cálcio (CaO), (MEHTA & MONTEIRO, 2014; SCRIVENER; GARTNER, 2018).

Imagen 1 - Micrografia ótica do clínquer, com a presença dos principais componentes do cimento Portland.



Fonte: Ballim & Graham (2004)

Dado que a maior parcela das emissões é inerente à química do processo, a principal estratégia de mitigação adotada pela indústria é a redução do "fator clínquer" (SCRIVENER, 2018). Esta abordagem baseia-se na substituição parcial do clínquer por Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) — ou *Supplementary Cementitious Materials (SCMs)* — que possuam menor pegada de carbono, baixo custo e ampla disponibilidade.

2.2 CONCRETO VERDE

O fomento à construção sustentável, conforme Moriconi (s.d.), pauta-se na utilização racional dos recursos naturais, o que pode ser alcançado pelo emprego de subprodutos industriais e materiais reutilizáveis. Esta abordagem reduz a demanda por extração de matérias-primas virgens, mitigando o impacto ambiental e as emissões de dióxido de carbono associadas.

Nesse contexto, insere-se o conceito de "concreto verde" (ou concreto sustentável), que visa reduzir o impacto ambiental da construção por meio do uso eficiente de recursos e da valorização (reaproveitamento) de resíduos. O principal desafio para sua implementação reside no consumo intensivo de cimento Portland, o maior contribuinte para a pegada de carbono do concreto. De acordo com Toma (2021), a produção do cimento é responsável por mais de 80% das emissões totais de CO₂ no processo de fabricação do concreto.

A estratégia central para a mitigação deste impacto é a redução do "fator clínquer" através da substituição parcial do cimento Portland por Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), também referidos como pozolanas. A produção do clínquer, via calcinação do calcário, é a principal fonte das emissões de processo (ISAIA; GASTALDINI, 2009).

Diversos MCS de origens distintas são investigados para este fim. Isaia e Gastaldini (2009) destacam o potencial da utilização de altos teores de escória de alto-forno granulada moída (GGBFS) e cinza volante (CV). De forma análoga, Toma (2021) aponta o potencial de pozolanas como a própria cinza volante (CV), a sílica ativa (SA), a escória de alto forno e a cinza de casca de arroz (CCA) como substitutos viáveis para diminuir o impacto ambiental do cimento.

2.3 ANÁLISE DOS MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND – MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES (MCS)

A substituição parcial do cimento Portland por Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) constitui uma estratégia primordial para a mitigação da pegada de carbono do concreto. Estes materiais, majoritariamente advindos de resíduos industriais ou fontes naturais, promovem a sustentabilidade na construção civil ao diminuírem a demanda por clínquer, principal agente responsável pelas emissões de CO₂ no processo de fabrico do cimento.



A escória granulada de alto-forno (GGBS), por exemplo, é um subproduto da indústria siderúrgica., que quando beneficiada (moída) e incorporada ao concreto, ela otimiza a durabilidade da estrutura e mitiga significativamente as emissões de dióxido de carbono associadas à produção de clínquer (ISAIA; GASTALDINI, 2009). Adicionalmente, sua aplicação contribui para a redução da permeabilidade e eleva a resistência a ataques químicos.

Outro material amplamente empregado é a cinza volante (fly ash), proveniente da queima de carvão mineral. Dotada de propriedades pozolânicas, ela reage com o hidróxido de cálcio (portlandita) liberado na hidratação do cimento, formando compostos cimentícios secundários que incrementam a resistência mecânica em idades avançadas (TOMA, 2021). Essa substituição também otimiza a demanda energética do processo produtivo, promovendo ganhos ambientais e econômicos.

A sílica ativa (microssílica), obtida da produção de silício metálico, é outro MCS de elevada reatividade. Sua incorporação ao concreto resulta em uma microestrutura de elevada compacidade, com notória redução de porosidade e superior resistência à compressão e à abrasão (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Tal característica é particularmente relevante em obras submetidas a ambientes agressivos, como estruturas marítimas ou industriais.

O filer calcário, embora não apresente atividade pozolânica, atua como material de enchimento (filler). Otimiza a trabalhabilidade do concreto em estado fresco, reduz o consumo de cimento e contribui para a uniformidade da mistura (NEVILLE, 2016). Já o metacaulim, derivado da calcinação controlada da caulinita, exibe alta reatividade pozolânica e é eficaz na mitigação da Reação Álcali-Agregado (RAA), além de otimizar a resistência inicial do concreto (ABNT NBR 16697, 2018).

Dentre os principais MCS supracitados, a presente análise aprofunda as características, mecanismos de reação e impactos ambientais de três materiais de destaque:

2.3.1 Escória Granulada de Alto-Forno (GGBS, ou Ground-Granulated Blast-Furnace Slag)

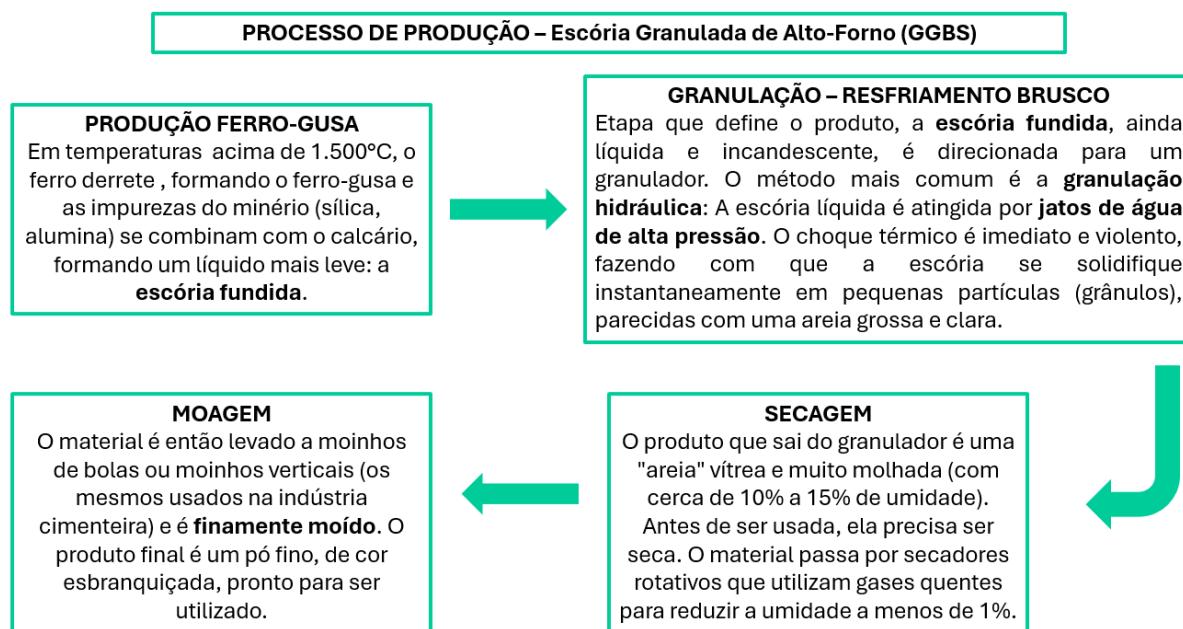
A utilização da Escória Granulada de Alto-Forno (GGBS), um coproduto da indústria siderúrgica, consolida-se como uma das principais estratégias da engenharia civil para a mitigação das emissões de dióxido de carbono (CO₂). Este material, que pode apresentar características pozolânicas ou cimentícias, atua como um substituto parcial do Cimento Portland (OPC), reduzindo a demanda por clínquer — componente primário do cimento, cuja produção é altamente intensiva em carbono. Dessa forma, a aplicação da GGBS não apenas valoriza um resíduo industrial, alinhando-se aos preceitos da economia circular, mas também contribui diretamente para a descarbonização da matriz cimentícia.

A magnitude dessa redução é quantificada em um estudo da Universidade de Limerick, Irlanda. A pesquisa demonstrou que, por tonelada de material, a produção de Cimento Portland (OPC) emite aproximadamente 970 kg de CO₂, ao passo que a GGBS gera um valor drasticamente inferior: apenas

55 kg de CO₂. O estudo analisou, ainda, os benefícios ambientais na aplicação final. Os resultados indicam que, na produção de concreto dosado em central, a substituição de uma porcentagem do OPC por GGBS pode mitigar a taxa de emissão de dióxido de carbono em até 70% (HIGGINS; CURRAN; SPILLANE, 2020, n. p.).

Adicionalmente ao impacto ambiental positivo, a literatura técnica converge ao apontar que o uso de GGBS pode conferir ao concreto melhorias significativas em propriedades de longo prazo, como o incremento da durabilidade e maior resistência a ataques químicos, notadamente por sulfatos e cloreto.

Imagen 2 – Fluxograma do processo de produção da Escória Granulada de Alto Forno (GGBS)



Fonte: Elaborado pelos autores (2025), com base nos dados obtidos nas pesquisas indicadas na revisão bibliográfica

2.3.2 Cinza Volante (Fly Ash) em misturas de Concreto de Alto Desempenho (HPC)

A cinza volante (fly ash) é um conhecido subproduto mineral proveniente da queima de carvão pulverizado em usinas termelétricas. Originalmente tratada como um resíduo industrial, cuja disposição em aterros representa um significativo passivo ambiental, a cinza volante é amplamente valorizada na construção civil devido às suas propriedades pozolânicas.

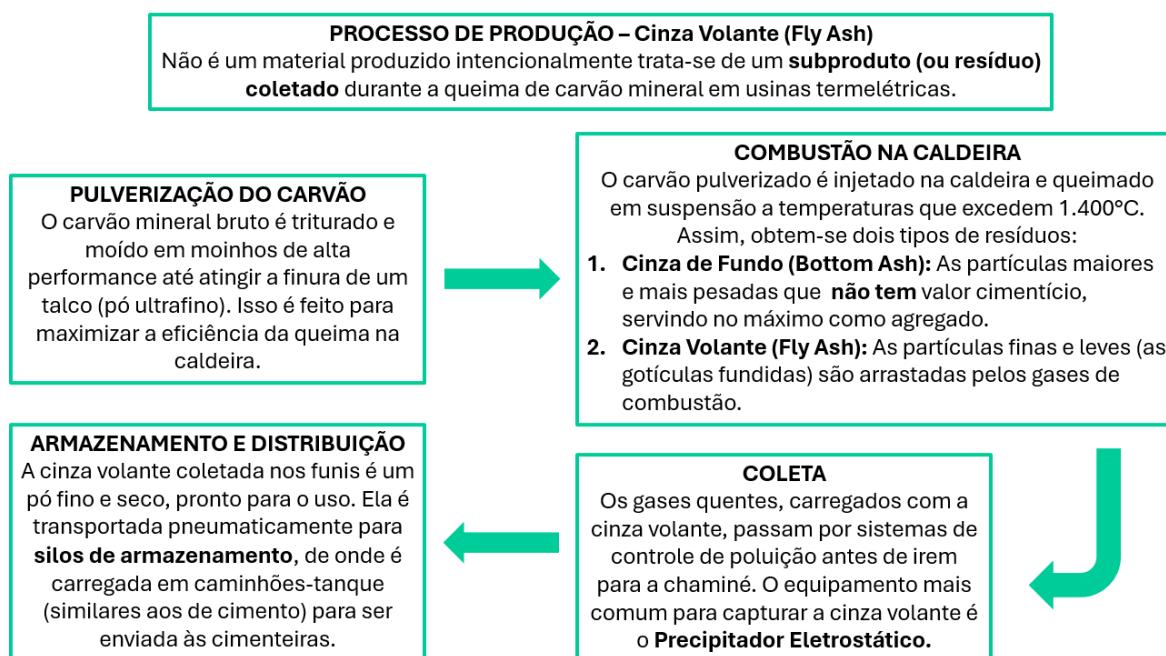
Este termo indica que o material não possui capacidade cimentícia intrínseca. Contudo, a cinza volante reage quimicamente com os subprodutos da hidratação do cimento Portland, mormente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂). Essa reação pozolânica forma compostos cimentícios secundários, similares aos da hidratação primária do cimento (como o C-S-H), que contribuemativamente para o

refinamento da microestrutura, auxiliando na melhoria da resistência mecânica e na durabilidade do compósito.

Corroborando seu potencial de sustentabilidade, Helali et al. (2025) investigaram, através de modelagem para a otimização de misturas de Concreto de Alto Desempenho (HPC), o impacto da substituição parcial do cimento por subprodutos industriais. Os resultados demonstraram ser possível reduzir as emissões de CO₂ em 60-80% sem comprometimento da resistência do concreto, tendo em vista que, conforme a UK Cement and Sustainable Concrete Association (UKCSMA), a cinza volante possui um teor de emissão de 4 kg CO₂ por tonelada.

Especificamente, os resultados da otimização indicaram reduções expressivas na emissão de carbono, atingindo patamares de 77,3% a 80,7% para concretos de classe C30 (30 MPa) e de 76,9% a 81,3% para a classe C50, quando comparados a misturas convencionais.

Imagem 3 – Fluxograma do processo de produção da Cinza Volante (Fly Ash)



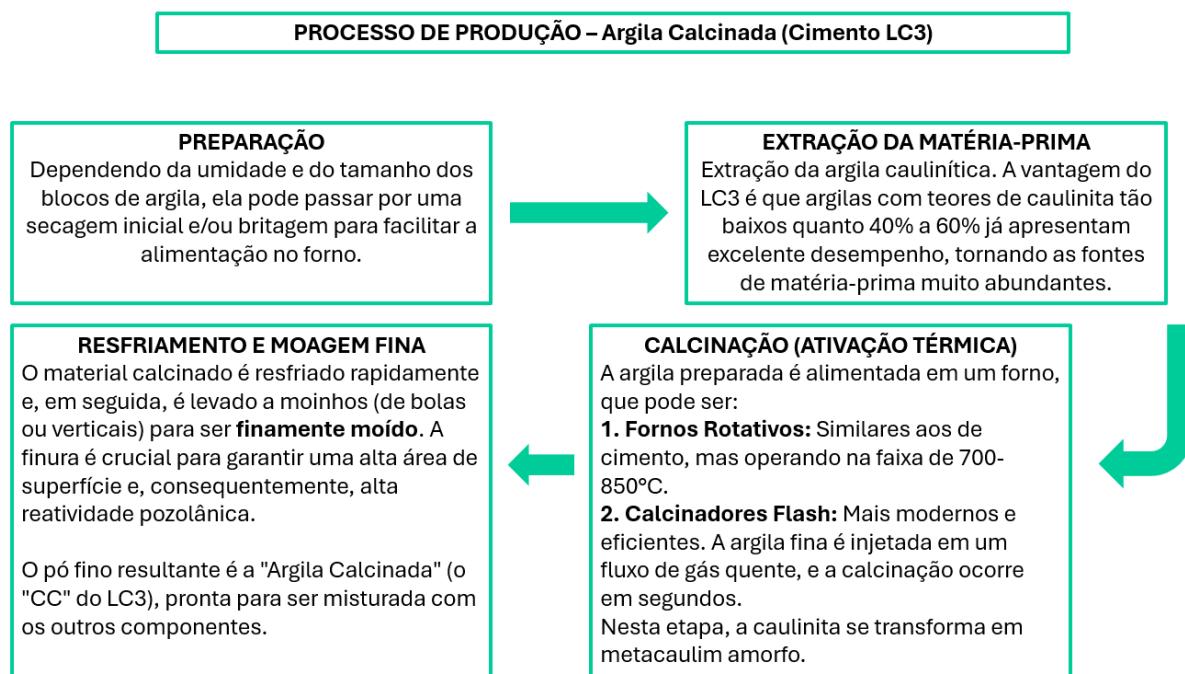
Fonte: Elaborado pelos autores (2025), com base nos dados obtidos nas pesquisas indicadas na revisão bibliográfica

2.3.3 Argilas Calcinadas – Cimento LC3 (Limestone Calcined Clay Cement)

A substituição parcial do clínquer por argilas calcinadas e calcário é o princípio fundamental do Cimento de Argila Calcinada e Calcário, internacionalmente designado pela sigla LC3 (Limestone Calcined Clay Cement). Esta tecnologia emerge como uma solução estratégica de elevado impacto para a indústria cimenteira, visto que possibilita uma redução drástica na proporção de clínquer. Consequentemente, viabiliza-se uma diminuição significativa da pegada de carbono do concreto.

Corroborando essa perspectiva, o estudo de Bheel (2023) analisa o uso da argila calcinada (CC – Calcined Clay) como MCS e seu efeito no "carbono incorporado" (embodied carbon). O autor reitera que a argila calcinada é uma pozolana de elevada reatividade e baixa pegada de carbono. Isso se deve, em parte, ao seu processamento em temperaturas significativamente inferiores (700-850 °C) às requeridas para a produção do clínquer (cerca de 1450 °C), reduzindo o consumo energético e as emissões oriundas da descarbonatação. A pesquisa aponta que sua utilização pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa em até 30% em comparação à produção do OPC. Ademais, o banco de dados do CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism), conforme reportado pela plataforma Climatiq (2023), indica que a taxa de emissão de dióxido de carbono na fabricação da argila calcinada é de aproximadamente 80 kg por tonelada.

Imagen 4 – Fluxograma do processo de produção da Argila Calcinada (cimento LC3)



Fonte: Elaborado pelos autores (2025), com base nos dados obtidos nas pesquisas indicadas na revisão bibliográfica

2.4 DESEMPENHO MECÂNICO DO CONCRETO VERDE

A transição para o "concreto verde", impulsionada pela incorporação de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), levanta questionamentos pertinentes sobre o eventual comprometimento do seu desempenho estrutural em comparação ao concreto Portland convencional (OPC).

Contudo, contrariando a percepção de que a sustentabilidade implica um sacrifício de performance, a literatura técnica demonstra que a substituição parcial do clínquer por escória de alto-forno (GGBS), cinza volante (fly ash) ou argilas calcinadas (LC3) pode, sob condições controladas, otimizar diversas propriedades mecânicas do compósito.

2.4.1 Cinética de reação e desenvolvimento da resistência

Uma característica fundamental dos concretos formulados com GGBS e cinza volante é a cinética de suas reações. Diferente da hidratação rápida do clínquer (especialmente do C₃S), as reações pozolânicas (no caso da cinza volante) ou cimentícias latentes (no caso da GGBS) são mais lentas.

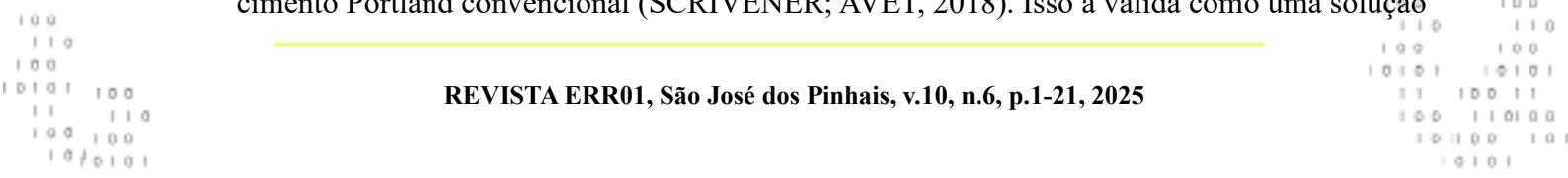
Isso frequentemente resulta em uma resistência mecânica inicial (aos 3 ou 7 dias) inferior à de um concreto OPC de referência. No entanto, essa reação prolongada promove um refinamento contínuo da microestrutura da pasta de cimento, consumindo o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) — um subproduto da hidratação do cimento e considerado um ponto de menor resistência na matriz — para formar C-S-H (silicato de cálcio hidratado) secundário (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O resultado direto é um desempenho mecânico superior em idades avançadas (tipicamente medido aos 28, 56 ou 90 dias), levando a um concreto de maior resistência final e, crucialmente, de maior durabilidade.

2.4.2 Impacto específico dos MCS no desempenho

O impacto no desempenho varia conforme o MCS utilizado:

- a) **Cinza Volante (Fly Ash):** Além de promover as reações pozolânicas de longo prazo, a morfologia esférica das partículas de cinza volante (conhecido como "efeito ball-bearing") melhora a trabalhabilidade do concreto no estado fresco. Isso pode permitir uma redução na relação água/cimento (a/c) para uma mesma consistência (slump), o que, por si só, é um fator direto para o aumento da resistência à compressão e redução da porosidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).
- b) **Escória de Alto-Forno (GGBS):** A GGBS possui propriedades cimentícias latentes, significando que ela reage e forma produtos de hidratação (C-S-H) muito similares aos do próprio cimento Portland. Níveis de substituição usuais (30% a 50%) são vastamente documentados por produzirem concretos com resistências finais equivalentes ou superiores às do OPC, além de melhorarem drasticamente a resistência a ataques químicos (como sulfatos e cloretos) devido a uma matriz mais densa e refinada (O'FLYNN et al., 2020).
- c) **Argilas Calcinadas (LC3):** O sistema LC3 (Cimento de Argila Calcinada e Calcário) apresenta um comportamento distinto e vantajoso. A elevada reatividade da argila calcinada (metacaulim), combinada com a reação sinérgica do filer calcário, acelera as reações de hidratação. A formação de carboaluminatos preenche os poros da matriz mais rapidamente. Diferente da GGBS e da cinza volante, os concretos LC3 são capazes de atingir um desenvolvimento de resistência inicial (3 e 7 dias) comparável, e por vezes superior, ao do cimento Portland convencional (SCRIVENER; AVET, 2018). Isso a valida como uma solução



que não exige concessões no cronograma de desforma, mantendo um desempenho mecânico robusto com uma redução de clínquer que pode chegar a 50%.

Em síntese, o desempenho mecânico do concreto verde não apenas é comparável, como pode ser superior ao do concreto tradicional. A seleção adequada do MCS permite um "design" do traço que otimiza o ganho de resistência (seja em curto ou longo prazo), ao mesmo tempo que atende aos imperativos de sustentabilidade.

É fundamental salientar que, para atingir esse desempenho otimizado, fatores como o controle rigoroso da relação água/cimento e, especialmente, um processo de cura adequado (úmida e, por vezes, mais prolongada, para garantir a ocorrência das reações pozolânicas tardias) são indispensáveis.

2.5 FERRAMENTAS DE MENSURAÇÃO: A CALCULADORA DE CARBONO

Para que a substituição do cimento Portland pelos Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) transcendia a teoria e se converta em um benefício ambiental validado, é imperativo o uso de ferramentas de quantificação. A "calculadora de carbono" emerge como um instrumento pragmático, fundamentado nos princípios da Análise do Ciclo de Vida (ACV), para mensurar objetivamente a pegada de carbono de diferentes composições de concreto.

Essas ferramentas permitem modelar e quantificar o "carbono incorporado" (embodied carbon) de um traço de concreto. Conforme Paz (2019), a mensuração eficaz depende da definição de uma "fronteira do sistema" (system boundary) clara — comumente a análise "do berço ao portão" (cradle-to-gate). Este escopo considera as emissões desde a extração da matéria-prima, o transporte e o processo de fabrico de cada componente (cimento, agregados e os próprios MCS).

A precisão dessas calculadoras está diretamente ligada à qualidade dos dados de entrada, que idealmente provêm de Declarações Ambientais de Produto (DAP) — em inglês, *Environmental Product Declarations (EPD)*. As DAPs fornecem os fatores de emissão específicos (ex: kg CO₂-eq por tonelada de cimento ou por tonelada de GGBS), permitindo uma análise comparativa fidedigna (ABNT NBR ISO 14025, 2017).

Na prática, a calculadora de carbono funciona como uma ferramenta de tomada de decisão projetual. Ela possibilita ao engenheiro ou projetista modelar cenários: é possível comparar um traço de concreto convencional (100% OPC) com diversas misturas binárias (ex: 30% de cinza volante) ou ternárias (ex: LC3) e visualizar, em tempo real, a redução percentual de CO₂-equivalente (CO₂-eq) por metro cúbico de concreto.

Dessa forma, a ferramenta não serve apenas para comprovar ganhos ambientais *a posteriori*, mas para otimizar o traço na fase de concepção, equilibrando os requisitos de desempenho mecânico (analisados na seção anterior) com metas claras de redução de carbono. O uso desses instrumentos

promove, portanto, uma migração da sustentabilidade prescritiva (baseada apenas na *inclusão* de MCS) para uma sustentabilidade baseada em desempenho (baseada na *quantificação* do impacto evitado).

2.6 CERTIFICAÇÃO LEED E A CONTRIBUIÇÃO DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES

A certificação LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), desenvolvida pelo U.S. Green Building Council (USGBC), é o sistema internacional de maior reconhecimento para a classificação de green buildings. Sua finalidade principal é prover um framework de verificação por terceira parte, validando que uma edificação foi projetada e construída para otimizar o desempenho em métricas cruciais de sustentabilidade.

Para além do reconhecimento ambiental, os benefícios da certificação englobam a redução de custos operacionais (via eficiência energética e hídrica), a melhoria da Qualidade Ambiental Interna (QAI) — impactando a saúde e produtividade dos ocupantes — e a valorização do ativo no mercado (GBC BRASIL, 2024).

A metodologia é baseada na acumulação de créditos (pontos) em categorias-chave, como Localização e Transporte (LT), Eficiência Hídrica (WE), Energia e Atmosfera (EA), e, de particular relevância para este estudo, Materiais e Recursos (MR).

2.6.1 Foco na categoria MR – Materiais e recursos

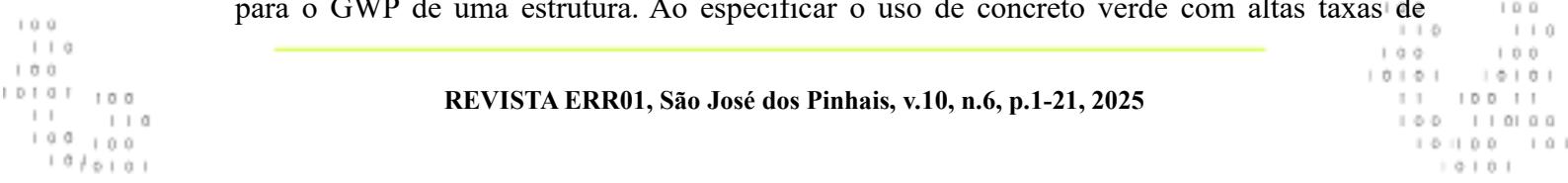
Esta categoria incentiva o uso de materiais e produtos de forma consciente, focando na minimização do "carbono incorporado" (*embodied carbon*) e na promoção de uma economia circular. Para o escopo deste trabalho, que analisa a substituição do cimento por escória de alto-forno (GGBS), cinza volante e argilas calcinadas (LC3), dois créditos principais da categoria MR são diretamente impactados:

I. Crédito: Redução do Impacto do Ciclo de Vida (Building Life-Cycle Impact Reduction)

Este crédito foca na mitigação dos impactos associados ao ciclo de vida dos materiais. A principal via para pontuação, além da reutilização de edifícios, é a Análise de Ciclo de Vida (ACV) da edificação inteira.

A ACV é usada para comparar o projeto proposto com um projeto de referência (*baseline*). Para obter os pontos, o projeto deve demonstrar uma redução percentual mínima em múltiplos indicadores de impacto ambiental, sendo o Potencial de Aquecimento Global (GWP) — medido em kg CO₂-eq — o mais crítico.

Aqui, a conexão é direta: o cimento Portland é, frequentemente, o maior contribuinte individual para o GWP de uma estrutura. Ao especificar o uso de concreto verde com altas taxas de



substituição por MCS (que possuem uma pegada de carbono drasticamente menor, como citado anteriormente, o impacto total da edificação é substancialmente reduzido. A ACV, fundamentada pelas ferramentas de mensuração, como a calculadora de carbono, é o método formal para quantificar essa redução e, assim, reivindicar os pontos deste crédito.

II. Crédito: Divulgação e Otimização de Produtos (Building Product Disclosure and Optimization - EPDs)

Este crédito atende ao pilar de fomento à transparência. O LEED incentiva a especificação de materiais cujos fabricantes divulgaram transparentemente seus impactos ambientais através de uma Declaração Ambiental de Produto (DAP) — ou *Environmental Product Declaration (EPD)*, conforme a ISO 14025.

O concreto verde contribui de duas formas neste crédito:

- **Opção 1 (Divulgação):** O simples uso de um concreto cujo fornecedor disponibilize uma EPD específica para aquele traço (ex: um traço com 40% de GGBS) já contribui para a meta de produtos com transparência declarada, garantindo pontos.
- **Opção 2 (Otimização):** Se a EPD do concreto verde demonstrar que seu impacto (GWP) é inferior ao de uma média da indústria (um *baseline* para o concreto), o projeto pode ganhar pontos adicionais por usar um produto "otimizado".

Em suma, a especificação de concretos com GGBS, cinza volante ou LC3 não é apenas uma decisão ambiental, mas uma estratégia técnica robusta para a obtenção de múltiplos créditos na certificação LEED, atacando tanto a frente da transparência (EPDs) quanto a da redução de impacto efetiva (ACV).

3 METODOLOGIA

3.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

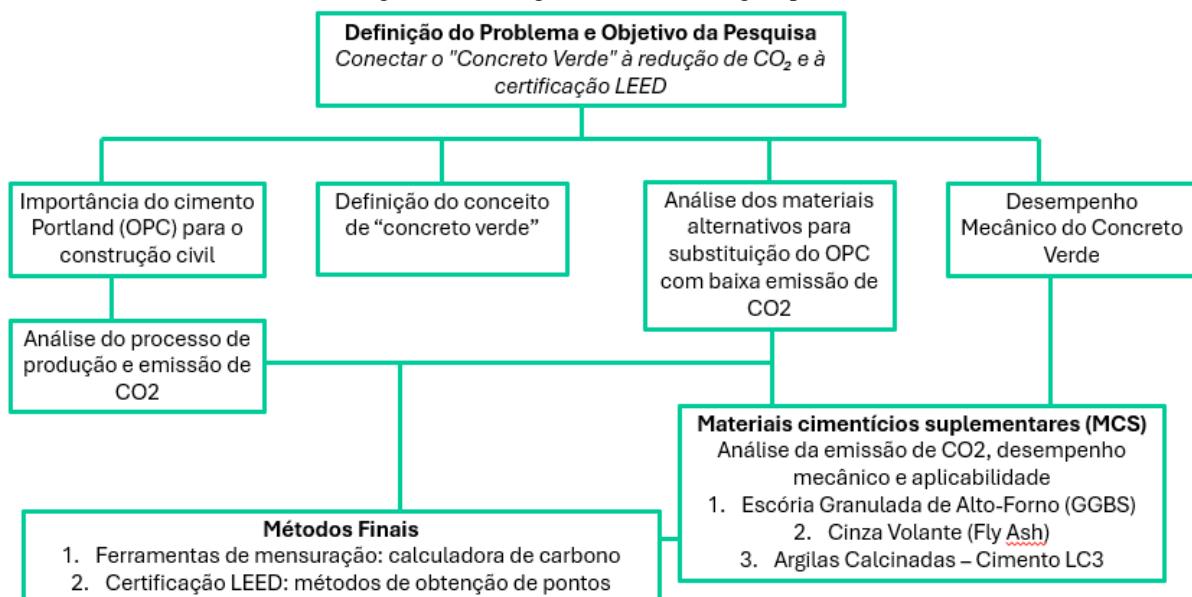
O presente Trabalho de Conclusão de Curso foi desenvolvido com base em uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo e natureza exploratória-descritiva. O objetivo principal foi investigar e sintetizar a literatura científica existente para estabelecer a conexão entre o uso do "concreto verde", a redução de emissões de CO₂ e a obtenção da certificação LEED na construção civil.

3.2 FLUXOGRAMA DA PESQUISA

O fluxograma abaixo sintetiza o processo metodológico de caráter exploratório-descritivo adotado nesta pesquisa. Ele ilustra a sequência lógica da revisão bibliográfica, que parte da identificação de um problema central (o impacto do cimento) e avança para a análise de uma solução

(concreto verde), sua validação técnica (desempenho), os métodos para sua quantificação (ferramentas) e, finalmente, sua aplicação prática no contexto da certificação LEED.

Imagen 5 – Fluxograma da metodologia aplicada



Fonte: Elaborado pelos autores (2025), com base nos dados obtidos nas pesquisas indicadas na revisão bibliográfica

3.3 ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA

Após a seleção, os materiais foram lidos e fichados criticamente. A análise não se limitou a resumir os conceitos, mas buscou ativamente interligar os pontos indicados no tema. O trabalho foi estruturado para: (1) definir o concreto verde e suas propriedades; (2) quantificar ou descrever seu impacto na redução de emissões de CO₂ em comparação ao concreto convencional; e (3) analisar como essa redução de impacto e o uso de materiais inovadores são avaliados e pontuados dentro dos pré-requisitos e créditos do sistema de certificação LEED.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente pesquisa, de natureza bibliográfica, fundamenta seus resultados na compilação e análise crítica dos dados levantados na literatura técnica e científica. A análise metodológica permitiu a estruturação de resultados que respondem diretamente ao objetivo deste trabalho, estabelecendo a correlação entre os Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), a efetiva redução de CO₂, o desempenho técnico e a certificação LEED.

Os resultados quantitativos da investigação sobre a pegada de carbono dos principais MCS, em comparação com o Cimento Portland (OPC), são sintetizados na Gráfico 1.

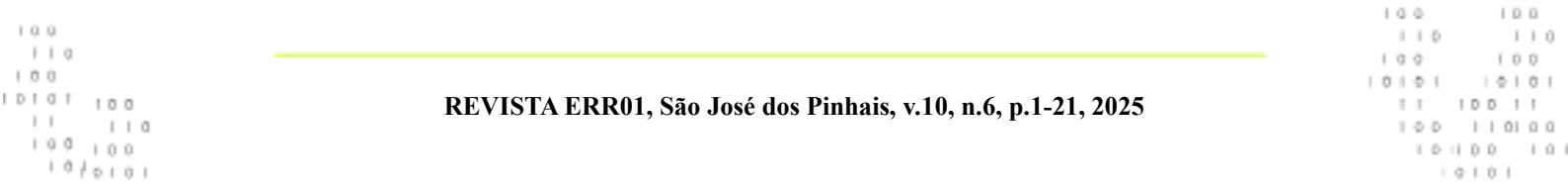
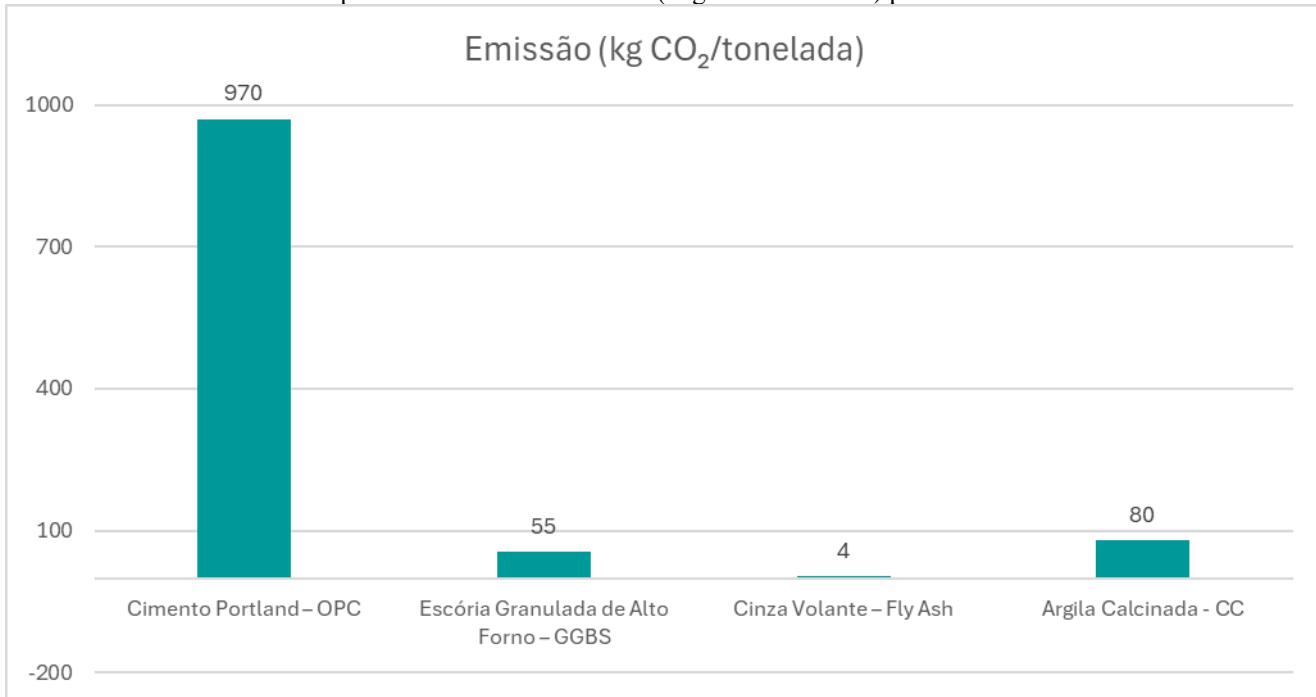


Gráfico 1 - Comparativo de Emissões de CO₂ (Pegada de Carbono) por Material Cimentício

Fonte: Elaborado pelos autores (2025), com base nos dados obtidos na metodologia

O gráfico 1 é o resultado central da investigação, quantificando o pilar fundamental do tema: a drástica redução de dióxido de carbono. Os dados demonstram que a pegada de carbono dos MCS é, em média, 90% a 95% inferior à do Cimento Portland. A substituição do clínquer (OPC) por estes materiais não é, portanto, uma mitigação marginal, mas a principal estratégia viável para a descarbonização efetiva do concreto. A discussão, partindo deste resultado, foca em como essa redução é validada e capitalizada no contexto da construção civil, especificamente através da certificação LEED.

Naturalmente, a viabilidade desta substituição depende da manutenção do desempenho técnico. A análise desmistifica a percepção de que a sustentabilidade implica um sacrifício de performance. Embora a cinética de reação dos MCS (como GGBS e Cinza Volante) seja mais gradual, resultando em um ganho de resistência inicial mais lento, o fenômeno leva a um refinamento microestrutural. Isso resulta em um compósito final mais denso e, como benefício agregado, de maior durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O sistema LC3, por sua vez, já demonstra um desempenho inicial comparável ao OPC (SCRIVENER; AVET, 2018). Fica estabelecido, portanto, que o desempenho mecânico não é um impedimento para a descarbonização, permitindo que a discussão se concentre no impacto ambiental e sua certificação.

A discussão se desloca, então, para a mensuração, com base na calculadora de carbono. Este ponto é crucial, pois representa uma transição da engenharia de uma abordagem prescritiva (ex: "usar 20% de MCS") para uma abordagem baseada em desempenho (ex: "demonstrar uma redução de 30%").

no GWP"). Os resultados mostram que a sustentabilidade deixou de ser um conceito abstrato para se tornar uma métrica quantificável. As ferramentas de AVC – Análise do Ciclo de Vida, validadas por Declarações Ambientais de Produto (EPD), são os instrumentos que permitem essa quantificação. Este é o elo que conecta a redução de CO₂ do material à certificação LEED.

Finalmente, a análise da Certificação LEED solidifica a discussão, abordando a "abrangência" citada no tema do trabalho. Os resultados indicam uma sinergia direta entre o uso de concreto verde e a obtenção de pontos na categoria "Materiais e Recursos" (MR). O concreto verde deixa de ser apenas um componente estrutural e passa a ser um ativo documentado para a pontuação. A especificação de um concreto com 40% de GGBS, cuja redução de Potencial de Aquecimento Global (GWP) é comprovada por uma EPD, atende aos requisitos de duas formas: (1) pela transparência, ao utilizar um produto com EPD (Opção 1 do crédito), e (2) pela otimização, ao comprovar que esse produto é ambientalmente superior ao "baseline" da indústria (Opção 2 do crédito).

Em síntese, os resultados e a subsequente discussão confirmam que o concreto verde, viabilizado por MCS, é uma alternativa focada primariamente na (1) drástica redução quantitativa de emissões de CO₂, que é (2) diretamente capitalizada como estratégia pragmática para a obtenção de créditos na certificação LEED e, (3) sendo tecnicamente viável e, por vezes, superior em durabilidade, não apresenta barreiras de desempenho.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo investigar a aplicação do concreto verde, notadamente pela substituição do cimento Portland por Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), como estratégia para a redução da emissão de dióxido de carbono (CO₂) na construção civil e sua abrangência na obtenção da certificação LEED.

Constatou-se que a indústria cimenteira é um dos principais emissores de CO₂ globais, sendo a descarbonatação do clínquer a fonte majoritária dessas emissões (MEHTA; MONTEIRO, 2014; IEA, 2021). A principal estratégia de mitigação identificada é a redução do "fator clínquer".

O estudo demonstrou que a substituição parcial do cimento por MCS – como a Escória Granulada de Alto-Forno (GGBS), a Cinza Volante (Fly Ash) e as Argilas Calcinadas (sistema LC3) – é a solução mais viável e de maior impacto atualmente. Foi verificado que esses materiais, muitos dos quais são coprodutos industriais, possuem uma pegada de carbono intrínseca drasticamente inferior à do cimento Portland (reduções que podem superar 90% por tonelada de material).

Além do benefício ambiental, a pesquisa atestou que o uso desses materiais não compromete o desempenho estrutural. Pelo contrário, as reações pozolânicas e cimentícias latentes dos MCS

promovem um refinamento microestrutural que resulta em concretos de maior durabilidade, maior resistência a ataques químicos e desempenho mecânico superior em idades avançadas.

O elo entre a aplicação do material e a validação de seu benefício foi estabelecido através das ferramentas de Análise de Ciclo de Vida (ACV), como as calculadoras de carbono, e formalizado pelas Declarações Ambientais de Produto (EPDs).

Por fim, conclui-se que o uso de concreto verde impacta direta e positivamente a obtenção da certificação LEED. A redução quantificável do Potencial de Aquecimento Global (GWP) permite ao projeto pleitear créditos valiosos na categoria Materiais e Recursos (MR), especificamente nos créditos de Redução do Impacto do Ciclo de Vida e de Otimização de EPDs.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi alcançado. O concreto verde não deve ser visto apenas como uma alternativa "ecológica", mas como uma solução de engenharia superior, tecnicamente robusta e comercialmente inteligente, que alinha a integridade estrutural com as demandas urgentes de descarbonização do setor e os critérios de valorização de mercado estabelecidos por certificações como o LEED.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a análise da viabilidade econômica e logística da aplicação destes MCS em diferentes regiões do Brasil, considerando a disponibilidade local de resíduos (como cinza de casca de arroz ou bagaço de cana) e os custos de processamento e transporte.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, aos nossos entes queridos — pais, cônjuges, filhos, irmãos e amigos próximos. O vosso apoio incondicional, a compreensão nos momentos de ausência, o incentivo e o apoio foram fundamentais durante toda a graduação.

A autora Beatriz, em especial, agradece e dedica este trabalho aos seus pais e sua irmã, por sempre acreditarem em seus sonhos e serem os maiores apoiadores nessa trajetória, fazendo o impossível para que se tornasse realidade, ao seu esposo Marcelo, que desde o início foi o seu porto seguro nos momentos difíceis e nunca a deixou desistir, e por fim, a sua filha Lívia, que surgiu no meio dessa trajetória e por ser a inspiração para novas conquistas todos os dias.

O autor João, agradece à sua avó, Maria de Lourdes, por sempre acreditar nele e torcer pelo seu sucesso. Seu amor e apoio foram fundamentais nesta caminhada.

A autora Pamela, agradece em especial, a sua irmã Evyllen Araújo, que foi seu grande apoio durante essa trajetória e nunca a deixou desistir.



Expressamos nossa profunda gratidão ao nosso orientador, Prof. Estevão, pela orientação precisa, paciência inestimável e por acreditar no potencial deste trabalho, mesmo quando as adversidades surgiram.

Por fim, um agradecimento mútuo entre nós, autores. Pelo companheirismo, pelo apoio moral que aliviou a pressão e pelo incentivo recíproco que nos permitiu concluir esta jornada juntos.

REFERÊNCIAS

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa Anual da Indústria da Construção (PAIC). Rio de Janeiro, [s.d.]. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9018-pesquisa-anual-da-industria-da-construcao.html>. Acesso em: [21.10.2025]

PAZ, Diogo Henrique Fernandes de. *Produção de material cimentício a base de resíduo de construção e demolição para aplicação em bloco estrutural.* Recife, 2019. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/34491/1/TESE%20Diogo%20Henrique%20Fernandes%20de%20Paz.pdf>. Acesso em: [21.10.2025]

LARIA, V.; MAROCHI, R. *Alternativas de concreto sustentável para redução dos impactos ambientais.* Artigo Científico (Engenharia Civil) - Faculdade Anhanguera de Caxias do Sul, Caxias do Sul, [s.d.]. Acesso em: 21 out. 2025

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL. *Conheça a Certificação LEED.* [Barueri, 2025]. Disponível em: <https://www.gbcbrasil.org.br/certificacao/certificacao-leed/>. Acesso em: 21 out. 2025.

MORICONI, G. Recyclable materials in concrete technology: sustainability and durability. Department of Materials and Environment Engineering and Physics, Universita Politecnica delle Marche, Ancona, Italy <https://www.semanticscholar.org/paper/Recyclable-materials-in-concrete-technology-%3A-and-Moriconi/0a0ae3ffe66cdf300416f808096840084da3be01> Acesso em: 21 out. 2025.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Sustentabilidade do concreto com altos teores de escória e cinzas volantes. **REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS**, v. 2, n. 3, p. 244-253, set. 2009.

TOMA, Nataly Ayumi. *DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO FLEXÍVEL COM REDUZIDO CONSUMO DE CIMENTO (GREEN ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE).* 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, 2021.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.*

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*

ABNT NBR 16697:2018 - Cimento Portland — Requisitos.

CECARBON. Calculadora de consumo energético e emissões de carbono para edificações. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://www.ceccarbon.com.br>. Acesso em: 21 out. 2025.

Higgins, Brendan; Curran, Michael; and Spillane, John P., "Maximising the Potential Use of Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBS) in Cement: An Irish Investigation" (2020). *Civil Engineering Research in Ireland 2020*. 2.

HELALI, S.; ALBALAWI, S.; ALANAZI, M.; ALANAZI, B.; BEL HADJ ALI, N. Optimizing Carbon Footprint and Strength in High-Performance Concrete Through Data-Driven Modeling. ***Sustainability***, v. 17, art. 7808, 2025[cite: 4, 5, 6, 13]. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17177808> [cite: 13]. Acesso em: 26 out. 2025.

Naraindas Bheel, Omrane Benjeddou, Hamad R. Almuqibah, Suhail Ahmed Abbasi, Samiullah Sohu, Mahmood Ahmad, Mohanad Muayad Sabri Sabri, Effect of calcined clay and marble dust powder as cementitious material on the mechanical properties and embodied carbon of high strength concrete by using RSM-based modelling, *Heliyon*, Volume 9, Issue 4, 2023, e15029, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15029>. Acesso em: 26 out. 2025.

U.S. GREEN BUILDING COUNCIL. LEED v4.1 Building Design and Construction Reference Guide. Washington, D.C.: U.S. Green Building Council, 2021. Disponível em: <<https://www.usgbc.org/leed/v41>>. Acesso em: 26 out. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Cement**: Tracking Clean Energy Progress. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/industry/cement>. Acesso em: 8 nov. 2025.

SCRIVENER, Karen L.; GARTNER, Ellis M. Eco-efficient cements. In: GIANNINI, E. (ed.). **RILEM Technical Letters**, v. 3, p. 154-162, 2018.

GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION (GCCA). **Concrete Future**: GCCA 2050 Net Zero Concrete Roadmap. London: GCCA, 2021.

Banco de dados do **CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism)**, conforme reportado pela plataforma Climatiq (dados de 2023).

O'FLYNN, D. et al. (2020). Mechanical and durability properties of GGBS concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 235.

ABNT NBR ISO 14025. (2017). *Rótulos e declarações ambientais – Declarações ambientais do Tipo III – Princípios e procedimentos*. Rio de Janeiro: ABNT.