

# Earth Friendly Concrete (EFC): ligantes alcalinamente ativados para aplicações estruturais e pré-fabricadas

HOLGER SCHMIDT - ENG. DR. — MC-Bauchemie  
KAI MARKIEFKA - M.Sc. — MC-Bauchemie

## RESUMO

A NECESSIDADE DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO NA CONSTRUÇÃO CIVIL TEM IMPULSIONADO O DESENVOLVIMENTO DE LIGANTES ALTERNATIVOS AO CIMENTO PORTLAND, DESTACANDO-SE OS CONCRETOS À BASE DE ATIVAÇÃO ALCALINA. NESTE CONTEXTO, O *EARTH FRIENDLY CONCRETE* (EFC) UTILIZA MATERIAIS DE ORIGEM INDUSTRIAL, COMO ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO E CINZAS VOLANTES, ATIVADOS QUIMICAMENTE PARA FORMAR UMA MATRIZ LIGANTE COM PROPRIEDADES DISTINTAS DO CONCRETO CONVENCIONAL. O PRESENTE ARTIGO TEM COMO OBJETIVO APRESENTAR OS FUNDAMENTOS TÉCNICOS DO EFC E DISCUTIR SUA APLICABILIDADE EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS E PRÉ-FABRICADOS, COM BASE NA ANÁLISE DE LITERATURA TÉCNICA, EXPERIÊNCIAS INDUSTRIAIS E EVIDÊNCIAS NORMATIVAS. OS RESULTADOS INDICAM QUE O EFC PODE ATINGIR CLASSES DE RESISTÊNCIA EQUIVALENTES ÀS DO CONCRETO CONVENCIONAL COM RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO SUPERIORES A 40 MPa, ALÉM DE APRESENTAR ELEVADA DURABILIDADE EM AMBIENTES AGRESSIVOS, ESPECIALMENTE EM SISTEMAS DE SANEAMENTO. EVIDÊNCIAS NORMATIVAS RECENTES CORROBORAM A VIABILIDADE DE

SUA APLICAÇÃO EM CONDIÇÕES REAIS. CONCLUI-SE QUE O EFC REPRESENTA UMA ALTERNATIVA TÉCNICAMENTE VIÁVEL PARA A DESCARBONIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO CIVIL, CONDICIONADA À EVOLUÇÃO NORMATIVA E AO CONTROLE TECNOLÓGICO ADEQUADO.

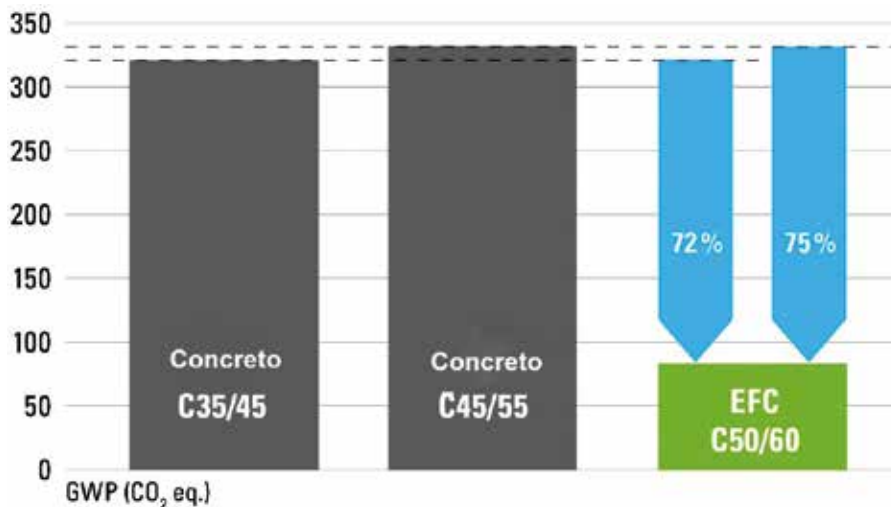
**PALAVRAS-CHAVE:** LIGANTES ALTERNATIVOS, CONCRETO GEOPOLIMÉRICO, ATIVAÇÃO ALCALINA, DURABILIDADE, EARTH FRIENDLY CONCRETE (EFC), PRÉ-FABRICADO.

## 1. INTRODUÇÃO

A produção de cimento Portland é amplamente reconhecida como uma das principais fontes de emissões de dióxido de

carbono da construção civil. Esse impacto decorre tanto da calcinação do calcário, processo intrinsecamente emissor de CO<sub>2</sub>, quanto do elevado consumo energético associado à produção do clínquer. Estima-se que a indústria cimenteira seja responsável por aproximadamente 5 a 8 % das emissões globais de CO<sub>2</sub>, o que confere ao setor papel central nas estratégias globais de mitigação das mudanças climáticas.

Nas últimas décadas, diferentes abordagens têm sido adotadas para reduzir o impacto ambiental do concreto, incluindo a substituição parcial do clínquer por adições minerais, o aumento da eficiência energética dos fornos e a otimização das formulações de concreto. Embora essas estratégias tenham proporcionado avanços relevantes, elas apresentam limites técnicos claros, uma vez que não eliminam a dependência do clínquer como principal responsável pelas emissões. Nesse cenário, os ligantes alternativos surgem como uma rota tecnológica complementar, com potencial de redução significativamente



**FIGURA 1**

COMPARAÇÃO DO POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (GWP) ENTRE DIFERENTES MISTURAS DE CONCRETO

FONTE: BFT - INTERNATIONAL (2023)

mais elevado da pegada de carbono.

Os concretos à base de ativação alcalina constituem uma das alternativas mais discutidas nesse contexto. Diferentemente do concreto convencional, no qual a resistência mecânica é obtida por meio da hidratação do cimento Portland, os sistemas alcalinamente ativados utilizam materiais ricos em silício e alumínio, ativados por soluções alcalinas, para formar uma matriz ligante com características químicas e microestruturais distintas. O *Earth Friendly Concrete* (EFC) representa uma abordagem industrialmente estruturada dessa tecnologia, concebida para atender às exigências da prática da engenharia estrutural e da produção em escala industrial. (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014; PROVIS, 2020).

Além disso, o EFC contribui de forma significativa para a redução de *Global Warming Potential* (CO<sub>2</sub> equivalente) conforme mostra a Figura 1.

Embora os concretos alcalinamente ativados e sistemas do tipo EFC apresentem avanços relevantes em aplicações internacionais, especialmente na Europa e Austrália, sua utilização no Brasil ainda é limitada e predominantemente restrita ao meio acadêmico e a estudos experimentais. Aspectos relacionados à normalização, disponibilidade de matérias-primas, adaptação tecnológica, custos logísticos e consolidação da cadeia produtiva ainda representam desafios para a ampla inserção desses sistemas no mercado nacional.

## 2. FUNDAMENTOS DO EARTH FRIENDLY CONCRETE (EFC)

O endurecimento do EFC baseia-se em mecanismos de ativação alcalina de materiais latentemente hidráulicos e pozolânicos, como a escória granulada de alto-forno e as cinzas volantes. Esses materiais, quando submetidos a um ambiente altamente alcalino, sofrem processos de dissolução das fases vítreas, liberando espécies ricas em silício, alumínio e cálcio.



### FIGURA 2

MATERIAIS PARA EFC - MC-POWERFLOW 4104,  
LIGANTE COMPOSTO POR ESCÓRIA + CINZA VOLANTE  
E ATIVADOR

FONTE: MC - BAUCHEMIE (2022)

Essas espécies se reorganizam progressivamente, formando uma matriz ligante de natureza alumino-silicática, distinta dos produtos de hidratação típicos do cimento Portland. (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014; PROVIS, 2020). Como mostrado na Figura 2, os principais materiais necessários para o EFC: aditivo redutor de água tipo 2 com funcionamento em ambientes altamente alcalinos, escória de alto-forno, cinza volante e o ativador alcalino.

Enquanto no concreto convencional a resistência mecânica está associada majoritariamente à formação do silicato de cálcio hidratado e à presença de hidróxido de cálcio livre, no EFC a matriz resultante apresenta menor teor de hidróxidos livres e maior estabilidade química. Essa diferença fundamental explica, em grande medida, o comportamento diferenciado do EFC em ambientes agressivos, bem como sua boa resistência a ataques químicos e microbiológicos.

A cinética das reações de ativação alcalina é influenciada por diversos fatores, incluindo a composição química dos precursores, sua finura, a natureza e a concentração do ativador alcalino e a

relação água/ligante. O controle adequado desses parâmetros é essencial para garantir desempenho mecânico previsível, trabalhabilidade adequada no estado fresco e estabilidade volumétrica ao longo do tempo. Em aplicações industriais, a padronização desses fatores é condição indispensável para a repetitividade dos resultados e a confiabilidade do material. (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014; PROVIS, 2020).

## 3. DESEMPENHO MECÂNICO E DURABILIDADE

Do ponto de vista da engenharia estrutural, o *Earth Friendly Concrete* (EFC) apresenta propriedades mecânicas compatíveis com aplicações estruturais correntes. Ensaios experimentais e experiências industriais demonstram que o EFC pode atingir classes de re-

sistências à compressão compatíveis com aplicações estruturais correntes, frequentemente superiores a 40 MPa, mediante formulações adequadas e controle rigoroso do processo produtivo.

A viabilidade estrutural de concretos à base de ativação alcalina é corroborada por aprovações técnicas oficiais, como a autorização do *Deutsches Institut für Bautechnik* (DIBt) para tubos de concreto geopolimérico com resistências à compressão superiores a 45 MPa, aplicáveis em sistemas de saneamento e dimensionados conforme normas estruturais europeias (DIBt, 2024a; 2024b).

Além da resistência à compressão, valores de módulo de elasticidade e resistência à tração compatíveis com o dimensionamento estrutural são observados, permitindo a aplicação de modelos de cálculo já consolidados. É importante destacar, contudo, que a evolução da resistência ao longo do tempo pode apresentar características distintas daquelas observadas no concreto Portland, especialmente em idades iniciais, o que reforça a necessidade de critérios específicos de controle tecnológico e de liberação de peças em processos industriais.

Um aspecto particularmente relevante do EFC é o seu baixo calor de reação. Essa característica reduz significativamente a probabilidade de fissuração térmica em elementos de grande volume, como fundações, blocos de coroamento e paredes estruturais espessas. Em estruturas maciças, nas quais os gradientes térmicos internos podem comprometer a durabilidade e a integridade estrutural, o uso do EFC representa uma vantagem técnica significativa.

A durabilidade constitui uma característica técnica relevante do EFC. A matriz alumino-silicática formada no processo de ativação alcalina apresenta elevada resistência à ação de sulfatos, ácidos e ambientes microbiologicamente agressivos. A reduzida presença de hidróxidos de cálcio livres limita a formação de produtos expansivos e reduz a suscetibilidade a processos de degradação química. (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014; PROVIS, 2020).

Em sistemas de saneamento, a corrosão biogênica é uma das principais causas de deterioração prematura de estruturas de concreto. Nesse contexto, o EFC apresenta desempenho particularmente favorável, uma vez que sua matriz química é menos suscetível à ação de ácidos formados por processos microbiológicos. Essa característica contribui diretamente para o aumento da vida útil de tubos de concreto, galerias e estações de tratamento, reduzindo custos de manutenção e intervenção ao longo do ciclo de vida.

A existência de aprovações normativas para aplicações estruturais demonstra que esses materiais já atingiram nível de maturidade tecnológica

compatível com o uso em infraestrutura, incluindo exigências de desempenho mecânico, durabilidade e controle de produção (DIBt, 2024a).



**FIGURA 3**  
APLICAÇÃO EFC EM 4HÖFE

Fonte: MC - BAUCHEMIE (2024)



**FIGURA 4**  
APLICAÇÃO EFC EM 4HÖFE

Fonte: MC - BAUCHEMIE (2025)

#### 4. APLICAÇÕES EM EDIFICAÇÕES E ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS

A aplicação do EFC em sistemas construtivos reais tem evoluído de forma consistente, com destaque para edificações estruturais e elementos pré-fabricados de infraestrutura. Em ambos os contextos, o material tem demonstrado capacidade de atender aos requisitos de desempenho mecânico, durabilidade e viabilidade de produção, mantendo compatibilidade com os métodos executivos convencionais da construção civil.

Em edificações, o EFC tem sido aplicado em fundações, lajes e paredes estruturais moldadas in loco, sem necessidade de alterações significativas nos processos de lançamento, adensamento e acabamento. Experiências de obra indicam comportamento reológico adequado, com boa trabalhabilidade e acabamento superficial compatível com exigências arquitetônicas correntes. Projetos realizados com EFC também evidenciam reduções expressivas no potencial de aquecimento global, decorrentes principalmente da eliminação do clínquer na composição do ligante.

Em aplicações de maior escala, experiências industriais internacionais demonstram a viabilidade do uso do EFC em volumes elevados de produção, como no

empreendimento West Wellcamp, na Austrália, no qual concretos alcalinamente ativado foram utilizados em larga escala em projetos de infraestrutura e edificações de grande porte (PROVIS, 2020; IEA, 2023; GCCA, 2023).

Entre os casos de aplicação em edificações, destaca-se o empreendimento residencial 4Höfe, em Norderstedt, Alemanha, no qual o EFC foi empregado em elementos estruturais moldados in loco, incluindo



**FIGURA 5**  
 APLICAÇÃO EFC EM PRÉ-FABRICADO  
 FONTE: MC - BAUCHEMIE (2022)

fundações e paredes estruturais, totalizando aproximadamente 3.000 m<sup>3</sup> de concreto. A adoção do EFC permitiu uma redução estimada de cerca de 600 toneladas de CO<sub>2</sub>, mantendo os requisitos estruturais



**FIGURA 6**  
 INSTALAÇÃO DE PEÇAS PRÉ-FABRICADAS  
 FONTE: BFT - INTERNATIONAL (2023)

repetitividade do desempenho mecânico, fatores essenciais para sistemas alcalinamente ativados. Nesse contexto, plantas de pré-fabricação têm operado com volumes diários superiores a 100 m<sup>3</sup> de EFC, sem prejuízo da estabilidade do processo produtivo e da qualidade final dos elementos produzidos. Na Figura 5, pode ser observado o lançamento do EFC em moldes para os painéis estruturais e, na Figura 6, a instalação destes painéis.

No segmento de infraestrutura, destacam-se aplicações do EFC na produção de tubos de concreto para sistemas de saneamento. Em plantas industriais, a utilização do material tem permitido a fabricação de tubos com diâmetros variando de DN 300 a DN 2400, mantendo desempenho mecânico compatível com as exigências normativas e elevada

e de durabilidade previstos em projeto, além de compatibilidade com os processos construtivos convencionais conforme pode ser visto na Figura 3 e na Figura 4.

Os elementos pré-fabricados representam um campo particularmente favorável à aplicação do EFC, em função do elevado grau de controle do processo produtivo. A produção industrial permite maior padronização das matérias-primas, controle das variáveis de dosagem e

resistência à corrosão biogênica. A eliminação de revestimentos internos poliméricos, frequentemente necessários em soluções convencionais, resulta em simplificação do sistema construtivo, redução de custos e ganhos ambientais ao longo do ciclo de vida (DIBt, 2024b). Um exemplo dos tubos em EFC é mostrado na Figura 7.

De forma geral, a aplicação do EFC evidencia que a tecnologia já atingiu um nível de maturidade compatível com a prática da engenharia, permitindo sua utilização tanto em elementos moldados *in loco* quanto em sistemas pré-fabricados, com desempenho técnico adequado e benefícios ambientais relevantes.

## 5. CONTROLE TECNOLÓGICO, ADITIVOS E ENQUADRAMENTO NORMATIVO

O controle tecnológico do EFC exige abordagens distintas daquelas tradicionalmente aplicadas ao concreto à base de cimento Portland, uma vez que o desempenho do sistema alcalinamente ativado depende fortemente da composição química dos precursores, da dosagem e da estabilidade do ativador, do controle reológico e das condições de cura. Esses fatores tornam o processo mais sensível a variações de matéria-prima e de produção, exigindo maior rigor no controle dos parâmetros de dosagem e execução.

Embora ensaios convencionais de consistência, resistência mecânica e durabilidade permaneçam aplicáveis, a interpretação



**FIGURA 7**  
 TUBOS EM EFC NA NEXT-BETON  
 FONTE: BFT - INTERNATIONAL (2023)

dos resultados deve considerar as particularidades do sistema alcalinamente ativado. A compatibilidade com aditivos químicos constitui um aspecto crítico, uma vez que produtos desenvolvidos para matrizes cimentícias convencionais apresentam eficácia limitada nesse contexto, sendo necessária a utilização de soluções especificamente adaptadas a ambientes de elevada alcalinidade (RILEM, 2021-2024).

A maturidade tecnológica desses sistemas é evidenciada por aprovações técnicas oficiais que abrangem não apenas aplicações específicas, mas também o próprio sistema ligante. Destaca-se a aprovação do *Deutsches Institut für Bautechnik* (DIBt) para o ligante geopolimérico "*Wagners EFC Binder*", cuja utilização é permitida em concretos submetidos a diferentes classes de exposição, incluindo ambientes agressivos até XA3, com comportamento equivalente a cimentos de alta resistência a sulfatos, conforme normas europeias (DIBt, 2024a).

Nesse contexto, o sistema requer controle tecnológico específico, incluindo a formulação da solução ativadora, a sequência de mistura e as condições de cura, evidenciando que o desempenho do EFC está diretamente associado ao rigor do processo produtivo, diferentemente do concreto Portland convencional.

Do ponto de vista normativo, embora os concretos alcalinamente ativados ainda não sejam plenamente contemplados por normas prescritivas tradicionais, sua aplicação tem sido viabilizada por meio de

aprovações técnicas específicas e abordagens baseadas em desempenho. Aprovações oficiais, como as emitidas pelo *Deutsches Institut für Bautechnik* (DIBt), demonstram que esses materiais já atendem aos requisitos estruturais e de durabilidade exigidos para aplicações reais. A evolução das normas, com maior ênfase em critérios de desempenho e sustentabilidade, tende a ampliar o espaço para a consolidação desses materiais na prática da engenharia.

Apesar dos avanços observados nas aplicações internacionais, os sistemas baseados em ativação alcalina ainda enfrentam desafios técnicos e mercadológicos importantes. A variabilidade química dos precursores industriais, a sensibilidade do sistema às condições de cura e à composição dos ativadores, bem como a limitada padronização normativa, representam fatores que dificultam a ampla disseminação da tecnologia. Adicionalmente, a disponibilidade regional e a variabilidade de matérias-primas, como escória granulada de alto-forno, cinzas volantes e outras pozolanas industriais, podem limitar a escalabilidade desses sistemas em determinados mercados, especialmente diante das transformações industriais e energéticas em curso.

Aspectos relacionados à compatibilidade com aditivos químicos convencionais, à estabilidade reológica, ao controle da retração e à variabilidade de desempenho em diferentes condições de produção ainda demandam aprofundamento técnico

e maior consolidação experimental em determinadas aplicações estruturais.

Do ponto de vista de mercado, a limitada familiaridade dos profissionais da construção civil com sistemas alcalinamente ativados, associada à ausência de normas prescritivas específicas em diversos países, incluindo o Brasil, ainda constitui uma barreira relevante para sua adoção em larga escala.

Nesse contexto, embora o EFC apresente elevado potencial para aplicações sustentáveis e de alto desempenho, a consolidação da tecnologia depende da continuidade de pesquisas, da evolução normativa e do desenvolvimento de cadeias produtivas adaptadas às condições regionais.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O EFC apresenta potencial relevante como solução técnica complementar no contexto dos ligantes alternativos, apresentando desempenho mecânico, durabilidade e viabilidade industrial compatíveis com as exigências da engenharia estrutural contemporânea. Embora desafios normativos e de padronização ainda persistam, os avanços tecnológicos e as experiências industriais já acumuladas indicam que o EFC pode desempenhar papel relevante na descarbonização da construção civil, atuando como solução complementar ao concreto Portland e contribuindo de forma efetiva para a transição do setor rumo a sistemas construtivos de menor impacto ambiental (AİTCIN, 2019; IEA, 2023; GCCA, 2023). ◉

## ▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. *Alkali Activated Materials*. Springer, 2014.
- [2] PROVIS, J. L. (Ed.). *Recent Advances in Alkali-Activated Materials*. Springer, 2020.
- [3] AİTCIN, P.-C. *Cements of Tomorrow*. CRC Press, 2019.
- [4] IEA - International Energy Agency. *Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Paris, 2023.
- [5] GCCA - Global Cement and Concrete Association. *Cement and Concrete Roadmap to Net Zero Concrete*. London, 2023.
- [6] RILEM TC 247-DTA; TC 281-CCC. *Performance-based specifications for alternative binders*. 2021-2024.
- [7] MC-BAUCHEMIE. *Geopolymer - Was ist das?* Bottrop, 2022.
- [8] MC-BAUCHEMIE. *Klimafreundlicher Beton - Ein wichtiger Baustein für die Dekarbonisierung*. Bottrop, 2023.
- [9] BFT-INTERNATIONAL. *Klimafreundliches Bauen mit Beton - Betonwerk Fertigteiltbau*. Gütersloh, 2023.
- [10] MC-BAUCHEMIE. *MC aktiv - Earth Friendly Concrete*. Bottrop, 2024.
- [11] MC-BAUCHEMIE. *Geopolymerbeton für klimaschonenden Wohnungsbau*. Bottrop, 2025.
- [12] DIBt. *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.15-2157 - Komponenten für Geopolymer 'Wagners EFC Binder' für Beton*. Deutsches Institut für Bautechnik, 2024a.
- [13] DIBt. *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-42.1-606 - Geopolymerbetonrohre für Abwasserleitungen und -kanäle in mit der Bezeichnung „next.beton“*. Deutsches Institut für Bautechnik, 2024b.