cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

EXPLICABILIDADE EM MODELOS DE APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA PREVISÃO DA CARBONATAÇÃO NO CONCRETO

Tatiana Aparecida Rodrigues Costa[1]; Júnia Nunes de Paula[1]; Daniel Hasan Dalip[1]
1.Universidade Federal de Ciência e Inovação de Minas Gerais (UFCI-MG)

Introdução

A carbonatação é um dos principais mecanismos que podem comprometer a durabilidade das estruturas de concreto. Tal fenômeno ocorre quando o dióxido de carbono presente no ar reage com o hidróxido de cálcio ($CaOH_2$) do concreto, formando carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Essa reação modifica a microestrutura do material e reduz o pH dos poros, criando um ambiente propício à corrosão das armaduras. (Malami, 2021).

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$

As proporções de CO_2 na atmosfera têm aumentado a cada ano, em níveis superiores que os meios naturais podem resolver. Em 2023 a média global de CO_2 chegou a 419,3 ppm (Lindsey, 2024).
As aplicações dos modelos de aprendizado de máquina oferecem maior precisão nos resultados, entretanto os usuários não têm conhecimento sobre o raciocínio adotado para realização das previsões, nem sobre a relevância de cada variável de entrada. Esse comportamento de ausência de transparência recebe o nome de “caixa-preta” (Ekanayake et al., 2022).

Objetivos

Objetivo Geral:
Analisar os parâmetros da equação de Ekolu (2018) para previsão da profundidade de carbonatação das estruturas de concreto com o uso da explicabilidade em modelos de aprendizado de máquina.
Objetivos Específicos:
1. Adaptar o algoritmo de Couto (2025) ao modelo de Ekolu (2018), para geração da base de dados sintética;
2. Utilizar o algoritmo com a nova base de dados sintética, usando técnicas de aprendizado da máquina (AM), aplicando o modelo de Ekolu (2018);
3. Prever profundidade de carbonatação do concreto com o algoritmo ajustado ao modelo de Ekolu (2018);
4. Usar a explicabilidade para análise dos resultados.

Metodologia

O estudo baseia-se na equação determinística de Ekolu (2018), derivada de 10 anos de exposição natural:

$$d_{(f,t)} = e_h . e_s . e_{co} . cem . (F_{c(t)})^g . \sqrt{t}$$

Atributos modelados: concentração de CO_2 (0,020 a 0,20%), Resistência à compressão fc (25, 35 e 50MPa), Umidade relativa (50 a 80%), Tipos de Cimento, Condição de exposição (ao ar livre protegida – ALP e sem abrigo – ALS) e tempo (0 a 100 anos).
Calibração: Divisão entre 8.000 instâncias para validação (*Grid Search* com Validação Cruzada) e 12.000 instâncias para teste cego.
Interpretabilidade: Aplicação do método SHAP (*Shapley Additive Explanations*), derivado da teoria dos jogos cooperativos, para estimativa das contribuições locais e globais:

$$g(x') = \phi_0 + \sum_{i=1}^{M} \phi_i x_i'$$

Resultados e Discussão

- Dominância da Resistência: Espera-se que a explicabilidade SHAP confirme a resistência à compressão (fc) como parâmetro mais influente na restrição da profundidade de carbonatação, atestando conformidade física do modelo.
- Sensibilidade Ambiental: Validação da faixa crítica da umidade relativa (pico entre 60% e 65%) e do impacto das emissões urbanas de dióxido de carbono.
- Transferência Tecnológica: Consolidação dos parâmetros no aprimoramento da ferramenta gratuita *carbuAI,* permitindo sua aplicação prática no dimensionamento do cobrimento e manutenção preventiva de estruturas (alinhamento com os ODS 9 e 11 da ONU).

Conclusões

A incorporação da formulação de Ekolu (2018) aliada à explicabilidade por SHAP permite superar o paradigma da “caixa-preta”, unindo o poder computacional do aprendizado de máquina à física dos materiais, garantindo decisões de engenharia mais seguras e transparentes.

Referências e Agradecimentos