ENARC
FOZ DO IGUAÇU-2023

ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE CO_2 ASSOCIADAS À PRODUÇÃO DO CONCRETO VIA TÉCNICAS DE APRENDIZADO DE MÁQUINA

Machine Learning applied to estimate the CO_2 emissions in concrete production

Renan Alves Cândido
Universidade Estadual Paulista| Guaratinguetá, São Paulo | ra.candido@unesp.br

Emerson Felipe Felix
Universidade Estadual Paulista| Guaratinguetá, São Paulo | emerson.felix@unesp.br

Resumo

Ao incorporar adições minerais à produção do concreto em substituição a parte do cimento Portland, reduz-se consideravelmente as emissões de dióxido de carbono (CO_2). Isso se deve ao fato de que a produção de cimento representa aproximadamente 8% das emissões globais de CO_2. Além da substituição do cimento, os agregados naturais também vêm sendo substituídos por resíduos de construção e demolição (RCD), garantindo menor impacto ambiental ao concreto. Neste contexto, o presente trabalho surge com o propósito de compilar valores de emissões de CO_2, de trabalhos da literatura, atrelados à concretos com diferentes adições e distintos teores de substituição de agregados naturais por RCD, e propor modelos numéricos desenvolvidos com regressão linear múltipla e Florestas Aleatórias. Os resultados alcançados demonstraram a eficiência das Florestas Aleatórias, gerando um modelo com 89,0% de acurácia. O proposto apresentou um erro médio de 24,22 kgCO_2/m³ de concreto, representando um erro percentual médio de 5,68%.

Palavras-chave: Emissões de CO_2; Adições minerais; Resíduos de construção e demolição*; Aprendizado de Máquina; Florestas Aleatórias*.

ABSTRACT

By incorporating mineral additions into the production of concrete, replacing part of the Portland cement, carbon dioxide (CO2) emissions are considerably reduced. This is because cement production represents approximately 8% of global CO2 emissions. In addition to replacing cement, natural aggregates have also been replaced by construction and demolition waste (RCD), ensuring a lower environmental impact on concrete. In this context, the present work arises with the purpose of compiling values of CO2 emissions, from works in the literature, linked to concrete with different additions and different replacement levels of natural aggregates by RCD, and proposing numerical models developed with multiple linear regression and Random Forests. The results demonstrated Random Forests' efficiency, generating a model with 89.0% accuracy. The proposal presented an average error of 24.22 kgCO2/m³ of concrete, representing an average percentage error of 5.68%.

Keywords: CO_2 emissions; Mineral admixtures; Construction and demolition waste; Machine learning; Random forests.

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil desempenha um papel crucial no desenvolvimento econômico das cidades, mas também é uma das principais fontes de resíduos e poluição ambiental. Isso levou a uma busca por soluções e materiais alternativos para mitigar esses impactos, incluindo o uso de resíduos para substituir agregados naturais e a substituição do cimento por adições minerais no concreto (BEHNOOD *et al.,* 2015). Atualmente, as mudanças climáticas representam uma das principais preocupações globais, afetando uma ampla gama de áreas, incluindo a sociedade (THOMAS *et al.*, 2019; TAM *et al.*, 2021; PETERSEN-ROCKNEY, 2022).

O aumento da urbanização global tem impulsionado a demanda por concreto, mas também gerou preocupações em relação às emissões de gases poluentes, ao consumo de energia e à obtenção de matérias-primas para a construção civil (SINGH *et al.*, 2011). O processo de fabricação de cimento, utilizado no concreto, é uma das principais fontes de emissões de dióxido de carbono (CO_2) no planeta, contribuindo com cerca de 8% das emissões totais causadas pelo homem (LEHNE; PRESTON, 2018*).* Para enfrentar essa problemática, diversos autores sugerem estratégias, como o uso de materiais com baixa emissão de carbono, a otimização de processos para reduzir a poluição e o reuso de materiais, com foco nos resíduos de construção e demolição e na incorporação de adições minerais em concretos (AKBARNEZHAD; XIAO, 2017; ZHANG *et. al*., 2023).

O relatório anual do Sindicato Nacional da Indústria do cimento (SNIC, 2021) destaca o uso de materiais como escórias siderúrgicas, cinzas volantes, fíler calcário e argilas calcinadas na produção de cimentos como uma prática ecologicamente sustentável que reduz as emissões e o consumo de combustíveis, ao mesmo tempo em que contribui para a conservação de recursos naturais não renováveis. Além disso, a aplicação de métodos numéricos tem se mostrado uma abordagem eficaz para otimizar o desenvolvimento de materiais ecoeficientes e reduzir as emissões de carbono, principalmente no contexto da produção de concreto (NUKAH *et al.*, 2022).

Neste contexto, técnicas de aprendizado de máquina surgem como poderosas ferramentas de modelagem capazes de abordar complexidades inerentes aos processos de emissão de CO_2, considerando a influência de múltiplas variáveis, muitas vezes interdependentes. São diversas as técnicas de aprendizado de máquina: árvore de decisão, florestas randômicas, redes neurais artificiais, máquinas de vetor de suporte, algoritmos de agrupamento e regressão linear. As Florestas Aleatórias são definidas pela composição de várias árvores de decisão. As árvores de decisão são modelos de aprendizado que utilizam uma estrutura de árvore para tomar decisões com base em condições lógicas. Elas são amplamente utilizadas em problemas de classificação e regressão (BREIMAN, *2001*).

Considerando que a busca por soluções e alternativas sustentáveis é fundamental para equilibrar o desenvolvimento urbano e econômico, levando em consideração a preservação do meio ambiente, o presente trabalho surge com o propósito de compilar valores de emissões de CO_2, de trabalhos da literatura, atrelados à concretos com diferentes adições e distintos teores de substituição de agregados naturais por RCD, para propor modelos de estimativa da emissão de CO_2, baseando-se nas técnicas de regressão linear múltipla e Florestas Aleatórias.

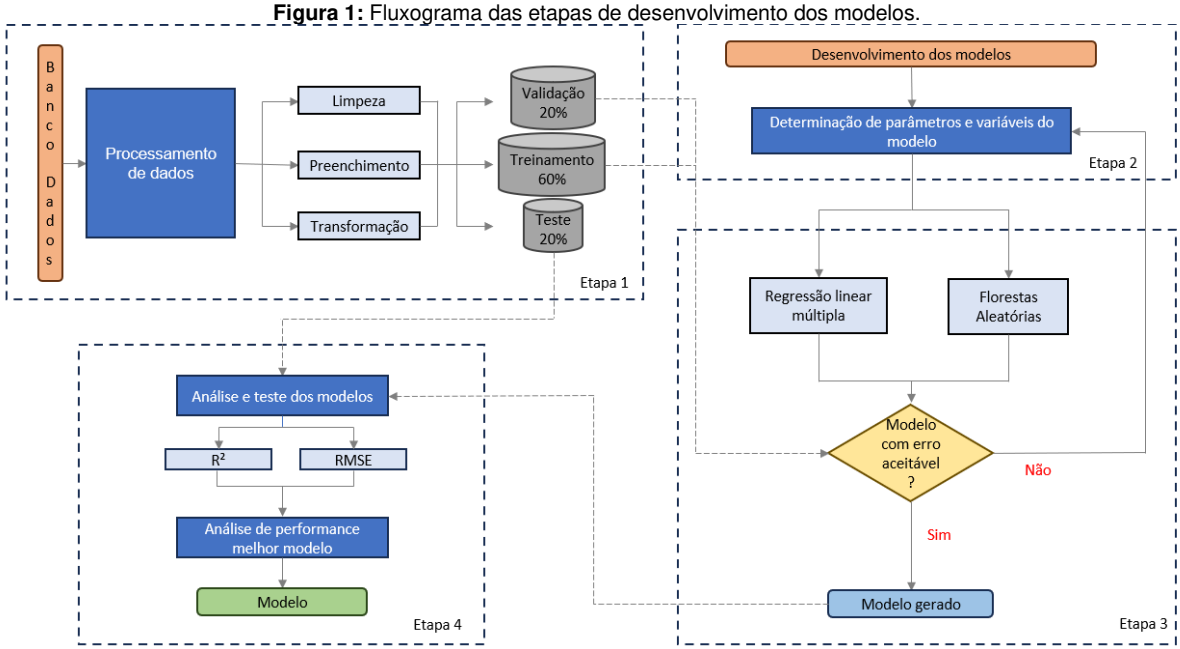
2 METODOLOGIA

Com a finalidade de estabelecer um modelo de previsão para as emissões CO_2 provenientes da produção de concretos que utilizam adições minerais, agregados naturais e/ou diferentes proporções de substituição de agregados originados de resíduos de construção e demolição, empregou-se neste estudo a abordagem delineada na Figura 1. Nesse contexto, foram criados modelos de regressão linear múltipla e árvores de decisão.

Em síntese, o processo começou com a coleta e compilação de dados, utilizando resultados experimentais disponíveis na literatura. Os dados foram tratados, de modo a preencher dados faltantes, verificar os domínios das variáveis e fazer a limpeza e a transformação de dados descritivos em dados numéricos contínuos. A manipulação dos dados foi feita de acordo com os preceitos da Mineração de Dados. Na segunda fase, foram realizadas análises de dados para examinar se existiam correlações lineares entre os diferentes atributos do conjunto de dados, permitindo avaliar os parâmetros necessários para o modelo. A terceira etapa envolveu o desenvolvimento de modelos usando Florestas Aleatórias e o ajuste de hiperplanos por meio de regressão linear múltipla. Após isso, todos os resultados foram analisados, e o modelo criado com árvores de decisão,

que apresentou o melhor desempenho, foi selecionado. Na quarta etapa, foram avaliadas as performances dos modelos mais promissores gerados por cada uma das técnicas de modelagem.

Figura 1: Fluxograma das etapas de desenvolvimento dos modelos.



A montagem do banco de dados foi realizada através da busca na literatura de resultados experimentais referente a taxa de emissão de CO_2 de concretos com agregados naturais ou de RCD e diferentes tipos de adições (pozolana, fíler calcário, escória de alto forno, cinza volante e cinza de casca de arroz) como substituição ao cimento (SILVA BARBOZA, 2016; SILVA BARBOZA; ALMEIDA FILHO, 2015; SILVA BARBOZA; ALMEIDA FILHO, 2018; CÂNDIDO, 2018; EVANGELISTA; DE BRITO, 2007; FEDUMENTI, 2013; GUIMARÃES, 2009; ISAIA; GASTALDINI, 2004; LEITE, 2001; MATOS *et al.*, 2019; NEHDI *et al.*, 2003; NUKAH *et al.*, 2022; REAL, 2018; RIGO, 2019; SOUZA *et al.*, 2019; DE SOUZA *et al.*, 2022). Ao todo, 232 dados foram coletados, tratados e processados. A análise, processamento e tratamento dos dados foram desenvolvidos conforme metodologia descrita em Felix *et. al.* 2021a e Felix *et al.* 2021b. A regressão com as Florestas Aleatórias foi conduzida considerando os seguintes processos: (i) divisão dos dados, empregando conjuntos de treinamento (80%) e teste (20%); (ii) modelagem com Florestas Aleatórias, considerando o número de árvores variando entre 2 e 100; (iii) Treinamento das florestas, fazendo a busca pela configuração das árvores da floresta. A determinação das árvores considerou a minimização do erro médio quadrático (MSE); (iv) avaliação de performance dos modelos, para garantir uma avaliação imparcial do modelo, a validação cruzada foi aplicada durante o treinamento, sendo também, empregado um conjunto de teste para avaliar a performance e capacidade de generalização do modelo.

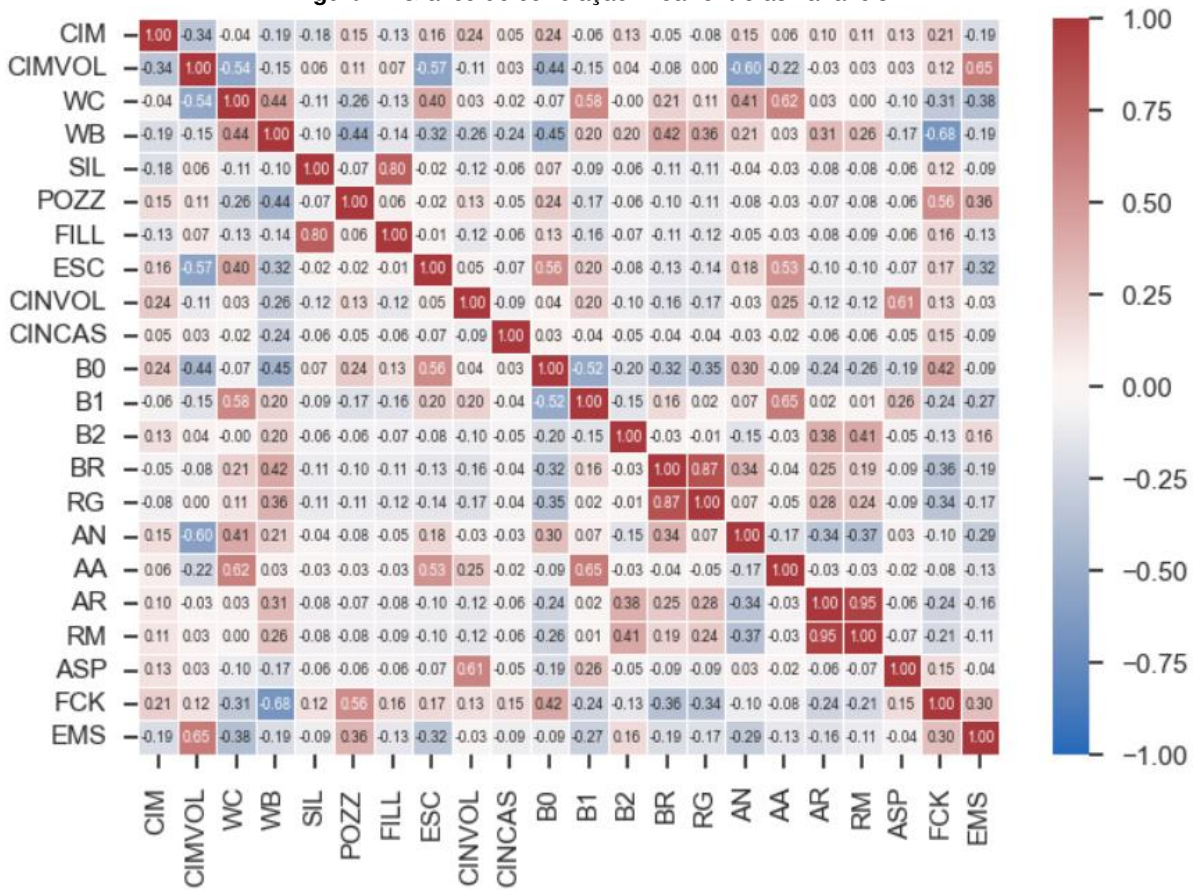
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme observado em Felix *et al.* (2018), a seleção das variáveis do modelo desempenha um papel crucial em todo o processo de modelagem. A escolha inadequada das variáveis pode representar um desafio significativo ou até mesmo tornar as técnicas de Aprendizado de Máquina incapazes de processar informações, o que comprometeria a capacidade de estabelecer uma relação entre os dados de entrada e saída. Portanto, tendo em mente essa consideração, inicialmente, procedeu-se a uma análise de dispersão do banco de dados em relação às emissões de CO_2, expressas em kg/m³ de concreto produzido. Essa análise levou em consideração o impacto dos atributos conhecidos e disponíveis no conjunto de dados, tais como: o teor médio de clínquer mais sulfato de cálcio do cimento em % (CIM), o consumo de cimento em kg/m³ (CIMVOL), a relação água/cimento (WC), a relação água/aglomerantes (WB), a relação sílica ativa/cimento (SIL), a relação pozolana/cimento (POZZ), a relação fíler calcário/cimento (FILL), a relação escória de alto forno/cimento (ESC), a relação cinza volante/cimento (CINVOL), a cinza de casca de arroz/cimento (CINCAS), a relação brita 0/cimento (B0), a relação brita 1/cimento (B1), a relação brita 2/cimento (B2), a relação brita reciclada/cimento (BR), a proporção de agregados graúdos naturais substituídos por reciclados em % (RG), a relação agregado miúdo natural/cimento (AN), a relação agregado miúdo artificial/cimento (AN), a proporção de agregados graúdos naturais substituídos por reciclados em % (RM), a relação aditivo superplastificante/cimento (ASP), a resistência à compressão aos 28 dias em Mpa (FCK). Para cada análise,

calculou-se os coeficientes de correlação de Pearson (Equação 1), conforme mostrado na Figura 1. Na Equação 1, x_i e y_i referem-se às variáveis analisadas, x_m e y_m representam a média dos valores.

$$p = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_m)(y_i - y_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_m)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - y_m)^2}} \quad \text{(Equação 1)}$$

Figura 2: Gráfico de correlação linear entre as variáveis.



Considerando os resultados dispostos na Figura 2, existem correlações lineares significativas entre a emissão e CIM, CIMVOL, WC, POZZ, B1, BR, RG e AN. As variáveis que se referem a adições minerais ou à substituição de algum agregado convencional por reciclado, tendem a diminuir a emissão de CO_2, devido ao fato de estar diminuído a quantidade de cimento e, consequentemente, a quantidade de clínquer, agente principal das emissões associados à produção do concreto.

Da Figura 3, ao considerar os gráficos de dispersão, observa-se que existem correlações não lineares entre as emissões de CO_2 e o tipo de cimento, relação água-cimento e os consumos de agregado graúdo natural ou reciclado. Ao avaliar os mapas de contorno da concentração das amostras, observa-se que as emissões são maiores nos concretos com baixo consumo de agregados e baixa relação água-cimento, conforme observado em Nukah *et al.* (2022). Além disso, a Figura 3 apresenta histogramas com os dados de cada parâmetro de entrada, que indica que as emissões de CO_2 dos concretos avaliados situa-se entre 250 e 400 $kgCO_2/m^3$, indicando que os concretos avaliados neste trabalho já possuem em suas formulações, a preocupação na redução das emissões.

A Figura 4 exibe os gráficos referentes à distribuição dos resíduos e à dispersão entre os valores previstos e reais. Os resultados mostram que as emissões não podem ser mapeadas com um modelo linear. O gráfico de resíduos aponta a deficiência do modelo com regressão linear múltipla em generalizar as predições, já os resíduos da fase de teste não seguem uma distribuição normal em torno de zero. Uma avaliação adicional, considerando R^2 de 0,57, indicando que o modelo com regressão linear múltipla possui uma capacidade preditiva limitada.

Figura 3: Gráfico de dispersão e histograma das principais variáveis.

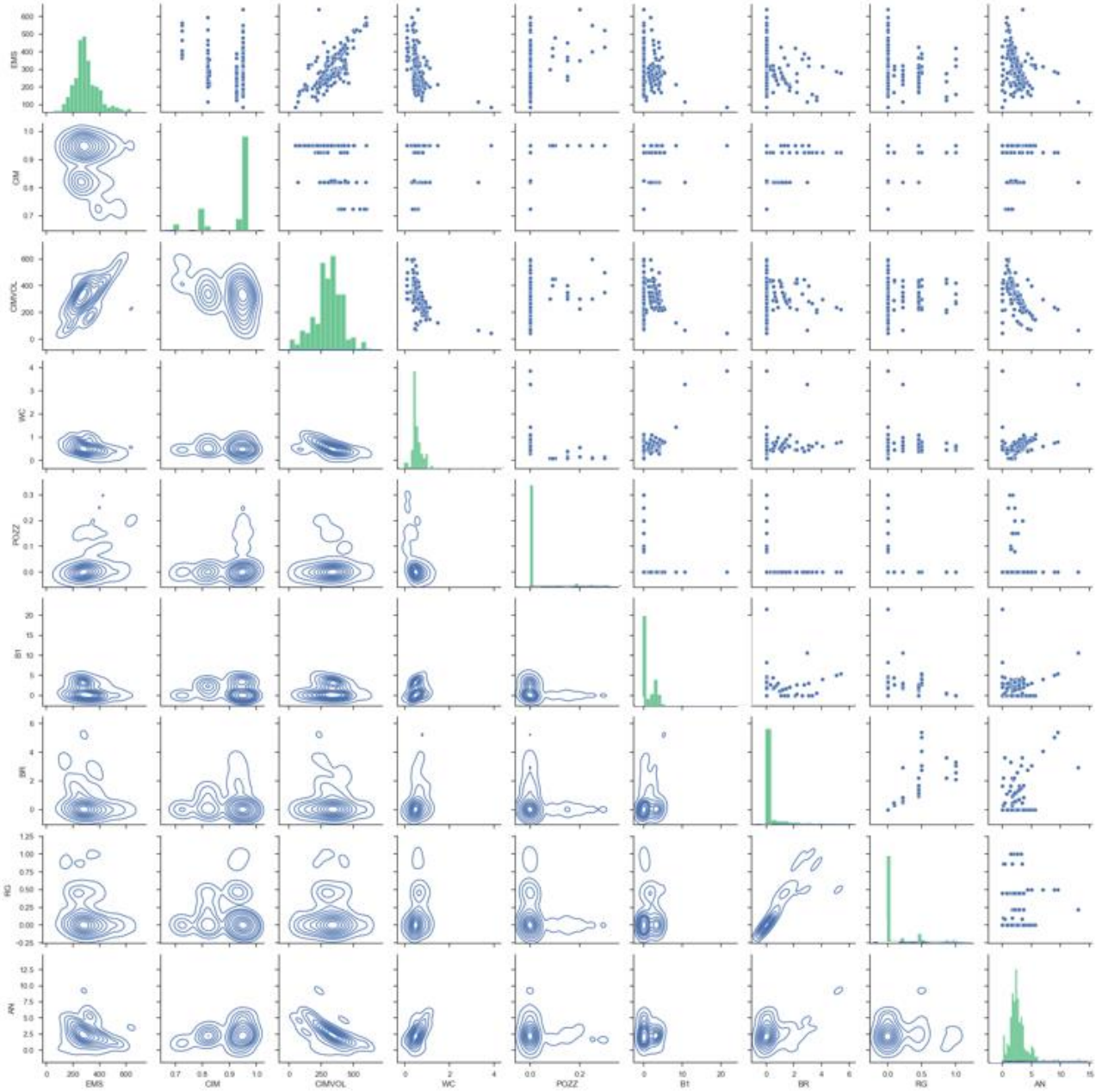
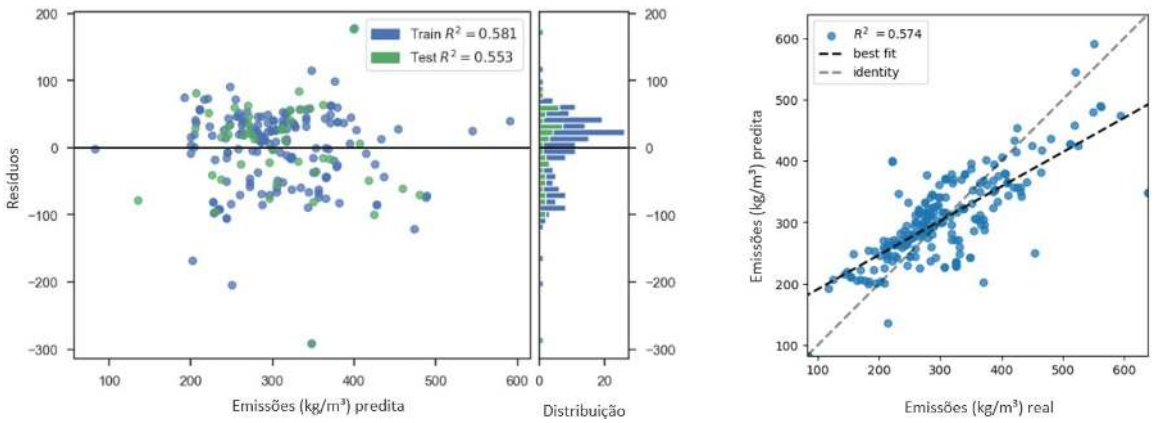


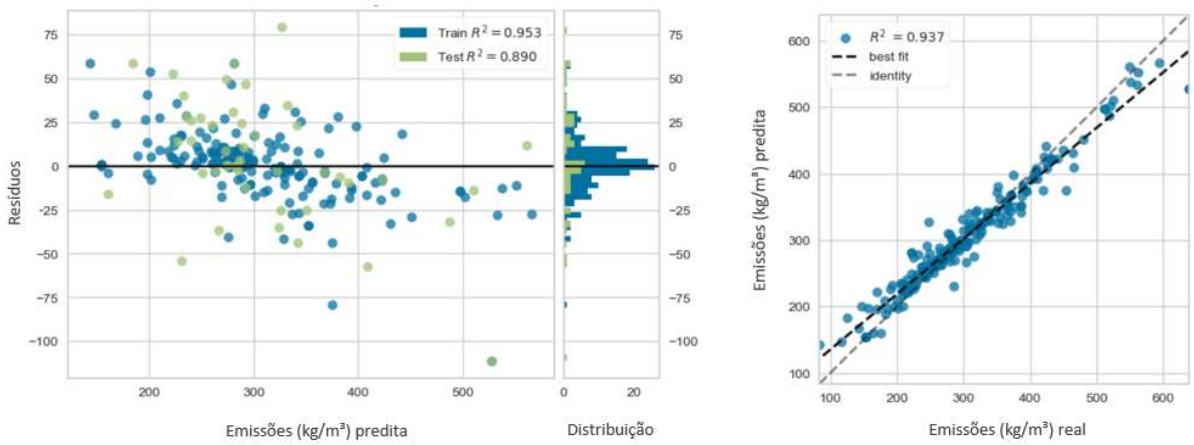
Figura 4: Análise de performance do modelo obtido com regressão linear.



O uso de Florestas Aleatórias produziu modelos com desempenho superior em comparação com a regressão linear múltipla. Conforme explicado na seção anterior, as árvores foram construídas considerando profundidades máximas variando de 2 a 100. A árvore que demonstrou o melhor desempenho incorporou seis

atributos (CIMVOL, WB, POZZ, ESC, B0 e RG) e resultou em um modelo com um coeficiente de determinação de 0,95 para o conjunto de treinamento e 0,89 para o conjunto de teste, como ilustrado na Figura 5. O erro máximo obtido com a utilização desse modelo foi de 127,96 kgCO_2/m³ de concreto. A raiz do erro médio quadrático foi de 24,22 kg de CO_2/m³ de concreto. Esses resultados indicam alta acurácia na predição, com R^2 de 0,94. Além disso, observa-se a existência de uma tendência normal na distribuição dos resíduos, com média zero, apontando a potencialidade do modelo e sua capacidade de generalização na predição.

Figura 5: Análise de performance do modelo obtido com árvore de decisão.



4 CONCLUSÃO

A seguir, listam-se as principais inferências derivadas da análise dos dados e da modelagem com as técnicas exploradas:

- Influência dos parâmetros: de modo geral, todas as adições apresentaram uma correlação negativa com a emissão de CO_2, somente a pozolana que não, isso pois, com as adições minerais, diminui a quantidade de cimento e consequentemente, a de CO_2. Alguns fatores apresentaram uma correlação positiva, tais como: teor de clínquer mais sulfatos, o qual está ligado diretamente ao tipo de cimento, consumo de cimento, consumo de brita 2 e resistência à compressão.
- Desempenho dos modelos: foi possível concluir que o modelo gerado utilizando Florestas Aleatórias, apresentou maior capacidade de aprendizado que a técnica de regressão linear múltipla. Todos os 100 modelos criados com Florestas Aleatórias apresentaram níveis de acurácia superiores à 60%, indicando maior eficiência que a regressão múltipla. Os resultados obtidos com o melhor modelo gerado com as Florestas Aleatórias indicam alto nível de acurácia na predição das emissões, 94%. Além disso, os erros residuais apresentaram uma distribuição normal, com média zero, apontando a aplicabilidade do modelo proposto.

Diante do exposto, a aplicação de técnicas de Aprendizado de Máquina, exploradas neste trabalho, apresenta-se como uma abordagem promissora e atual, para corroborar com o desenvolvimento de materiais ecoeficientes e de estratégias de redução das emissões de CO_2.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os apoios cedidos pelo Programa de Incentivo e Estímulo à Pesquisa do edital 06/2023 PROPe e o auxílio acadêmico associado ao Edital 05/2023 PROGRAD da UNESP.

REFERÊNCIAS

AKBARNEZHAD, A; XIAO, J. Estimation and minimization of embodied carbon of buildings: A review. **Buildings**, v. 7, n. 1, p. 5, 2017.

BEHNOOD, A.; OLEK, J.; GLINICKI, M. A. Predicting modulus elasticity of recycled aggregate concrete using M5′ model tree algorithm. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 137-147, 2015.

BREIMAN, L. Random forests. **Machine learning**, v. 45, p. 5-32, 2001.

CÂNDIDO, T. G. **Desempenho de concretos com baixo consumo de ligante.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba, 2018.

DA SILVA BARBOZA, L.; DE ALMEIDA FILHO, F. M. **Concreto autoadensável com baixo consumo de cimento: impacto da redução do consumo de cimento na resistência à compressão. Matéria (Rio de Janeiro),** v. 23, 2018.

DA SILVA BARBOZA, L. **Estudo sobre o impacto da redução do consumo de cimento no comportamento mecânico do concreto autoadensável.** Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de São Carlos, 2016.

DA SILVA BARBOZA, L.; DE ALMEIDA FILHO, F. M. **Estudo sobre redução do consumo de cimento e emissão de CO2 para concreto de alto desempenho.** 2015.

DE MATOS, P. R.; JUNCKES, R.; PRUDÊNCIO, L. R. Influência do uso de cinza volante na elevação adiabática de temperatura e resistência à compressão de concretos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, 2019.

DE SOUZA, R. M.; MAGALHÃES, R. R.; CAMPOS, A. T.; VELOSO, A. V. Modelo neuro-fuzzy para predição das emissões de CO2 de dosagens de concreto para biodigestores na suinocultura. **Ambiente Construído**, v. 22, p. 321-334, 2022.

DE SOUZA, M. C.; DA SILVA BARBOZA, L.; SARTORI, A. L. Estudo da viabilidade econômica do concreto autoadensável com baixo consumo de cimento. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 11, n. 4, 2019.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and concrete composites**, v. 29, n. 5, p. 397-401, 2007.

FEDUMENTI, M. B. **Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloreto.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2013.

FELIX, E. F.; POSSAN, E.; CARRAZEDO, R. A new formulation to estimate the elastic modulus of recycled concrete based on regression and ANN. **Sustainability**, v. 13, n. 15, p. 8561, 2021.

FELIX, E. F.; POSSAN, E.; CARRAZEDO, R. **Artificial Intelligence Applied in the Concrete Durability Study**. Hygrothermal Behaviour and Building Pathologies, p. 99-121, 2021.

GUIMARAES, J. P. F. Sílica Ativa e sua contribuição para a sustentabilidade. **Artigo Tecnosil,** 2009.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. **Ambiente Construído**, v. 4, n. 2, p. 19-30, 2004.

LEHNE, J; PRESTON, F. Making concrete change. **Innovation in Low-carbon Cement and Concrete**, 2018.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo, 4a edição. Ed. Ibracon, 2014.

NEHDI, M.; DUQUETTE, J.; EL DAMATTY, A. Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. **Cement and concrete research**, v. 33, n. 8, p. 1203-1210, 2003.

NUKAH, P. D.; ABBEY, S. J.; BOOTH, C. A.; NOUNU, G. Optimisation of embodied carbon and compressive strength in low carbon concrete. **Materials**, v. 15, n. 23, p. 8673, 2022.

PETERSEN-ROCKNEY, M. Social risk perceptions of climate change: a case study of farmers and agricultural advisors in northern California. **Global Environmental Change**, v. 75, p. 102557, 2022.

REAL, R. P. Avaliação da utilização da cinza da casca de arroz como adição mineral em concreto de alto desempenho. Diss.-Cent. Fed. Educ. Tecnológica Minas Gerais. Programa Pós Grad. em Eng. Civil. Belo Horizonte, p. 76, 2018.

RIGO, E. **Avaliação do potencial de captura de CO_2 de concretos com resíduos de construção e demolição devido à carbonatação**. Dissertação de Mestrado, 2019.

SINGH, A.; BERGHORN, G.; JOSHI, S.; SYAL, M. Review of life-cycle assessment applications in building construction. **Journal of architectural engineering**, v. 17, n. 1, p. 15-23, 2011.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Relatório Anual**. Rio de Janeiro, 2021.

TAM, K.; LEUNG, A. K.-y; CLAYTON, S. Research on climate change in social psychology publications: A systematic review. **Asian Journal of Social Psychology**, v. 24, n. 2, p. 117-143, 2021.

THOMAS, K.; HARDY, R. D.; LAZRUS, H.; MENDEZ, M.; ORLOVE, BEN.; COLLAZO, I. R.; ROBERTS, J. T.; ROCKMAN, M.; WARNER, B. P.; WINTHROP, R. Explaining differential vulnerability to climate change: A social science review. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 10, n. 2, p. e565, 2019.

ZHANG, Y.; CHEN, X.; ZHOU, J.; WANG, Q.; LIU, Z.; MA, Z.; HUANG, J. Meso-scale damage characteristics of low carbon concrete with recycled aggregate based on in-situ CT test. **Construction and Building Materials**, v. 365, p. 130014, 2023.