Random Forest aplicada à predição do módulo de elasticidade de concretos com RCD

Random forest to predict the elasticity modulus of concretes made with CDW

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

Breno de Melo Lavinicki
Universidade Federal da Integração Latino-Americana | Foz do Iguaçu, Paraná | brenolavinicki0@gmail.com

Edna Possan
Universidade Federal da Integração Latino-Americana | Foz do Iguaçu, Paraná | epossan@gmail.com

Resumo

O emprego de resíduos de construção e demolição na produção de concretos, tornou-se uma alternativa recorrente devido aos benefícios que apresentam, a exemplo da redução do custo, redução das emissões de CO_2 e menor poluição ao meio ambiente. Entretanto, no que se refere ao comportamento mecânico do concreto com agregado reciclado, sabe-se que sua capacidade mecânica é inferior ao de concretos com agregado natural, tornando imprescindível prever as propriedades mecânicas do material, a fim de determinar o proporcionamento em que se maximizam as propriedades mecânicas e minimizam-se os impactos ambientais. Neste trabalho avalia-se o uso de florestas aleatórias *para mapear o módulo de elasticidade do concreto com agregado reciclado, que a partir deste, poderá auxiliar na formulação de concretos com baixo impacto ambiental. Os resultados encontrados demonstram a viabilidade da aplicação da técnica de aprendizado de máquina utilizada na modelagem, obtendo um modelo com coeficiente de determinação de 93,5%.*

Palavras-chave: Concreto com agregado reciclado; Otimização; Aprendizado de máquina; Florestas aleatórias.

ABSTRACT

The use of construction and demolition waste in concrete production has become a recurring alternative due to their benefits, such as cost reduction, reduction of CO_2 emissions, and less environmental pollution. However, regarding the mechanical behavior of concrete with recycled aggregate, it is known that its mechanical capacity is lower than that of natural aggregate concrete, making it essential to predict the mechanical properties of the material to determine the mix in which the mechanical properties are maximized, and the environmental impacts are minimized. Thus, this work evaluates the use of random forests to model the modulus of elasticity of concrete with recycled aggregate and, from that, determine traces of low environmental impact. The results pointed out the feasibility of applying the machine learning technique in the modeling, obtaining a model with a coefficient of determination of 93.5%.

Keywords: Recycled aggregate concrete; Optimization; Machine learning; Random Forest.

1 INTRODUÇÃO

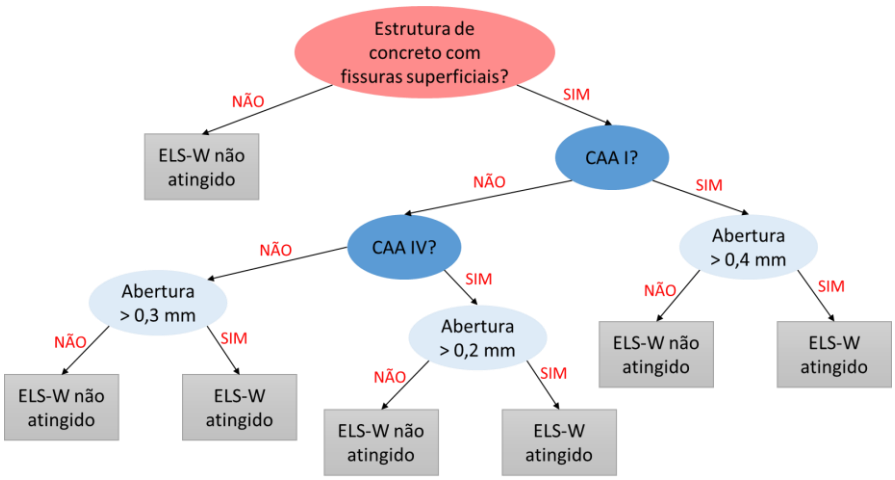
O concreto com agregado reciclado oriundo de resíduos de construção e demolição (RCD) difere do convencional devido à sua maior porosidade, resultando em maior absorção de água e influenciando a quantidade de aglomerante (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A camada de argamassa afeta propriedades mecânicas como resistência à compressão e módulo de elasticidade (PADMINI *et al.*, 2009). O módulo de elasticidade é essencial para medir a rigidez de materiais na construção, porém, no concreto com agregado reciclado, o módulo de elasticidade é usualmente inferior ao do concreto produzido com agregado natural.

A determinação experimental do módulo de elasticidade do concreto, sendo conhecida por demandar tempo, quando considerada a determinação de forma destrutiva. Deste modo, é crescente o uso de técnicas não destrutivas para a predição das propriedades do concreto (OMRAN *et al.*, 2016), ou até mesmo, o emprego de modelos teórico-numéricos ou analíticos. São diversos os modelos existentes na literatura, no entanto, a maioria possui parâmetros que necessitam de dados coletados experimentalmente, com ensaios do tipo destrutível, como é o caso da resistência à compressão, que faz a formulação ser inviável em muitas aplicações. Muitos dos modelos existentes não possuem aplicabilidade no concreto com agregado reciclado. Neste contexto, o emprego do aprendizado de máquina, torna-se uma alternativa viável e eficaz para contornar as dificuldades impostas no processo de modelagem do módulo de elasticidade do concreto.

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 técnicas possibilitam trabalhar com problemas de regressão, descrição e classificação. As florestas aleatórias e as redes neurais artificiais se destacam por possibilitarem trabalhar com os diferentes tipos de problemas e apresentam bons resultados frentes a problemas multivariáveis e complexos.

As florestas aleatórias são definidas pela composição de várias árvores de decisão. Árvore de decisão é uma técnica de aprendizado de máquina que utiliza uma estrutura de árvore para tomar decisões com base em condições lógicas, sendo amplamente utilizadas em problemas de classificação e regressão (BREIMAN, et al., 1984). Uma árvore de decisão é composta por nós e arestas. O nó raiz representa a variável de entrada inicial, e cada nó interno representa uma decisão baseada em uma condição específica. As arestas conectam os nós e representam o fluxo de decisão. Os nós representam as saídas ou as decisões finais (HASTIE, et al., 2009). Assim, considerando o funcionamento de uma árvore de decisão, na Figura 1 é apresentado um exemplo ilustrativo de uma árvore construída para a avaliação do estado limite de abertura de fissuras em estruturas de concreto armado (ELS-W).

Figura 1: Modelo de uma árvore de decisão para avaliação do ELS-W em estruturas de concreto armado.



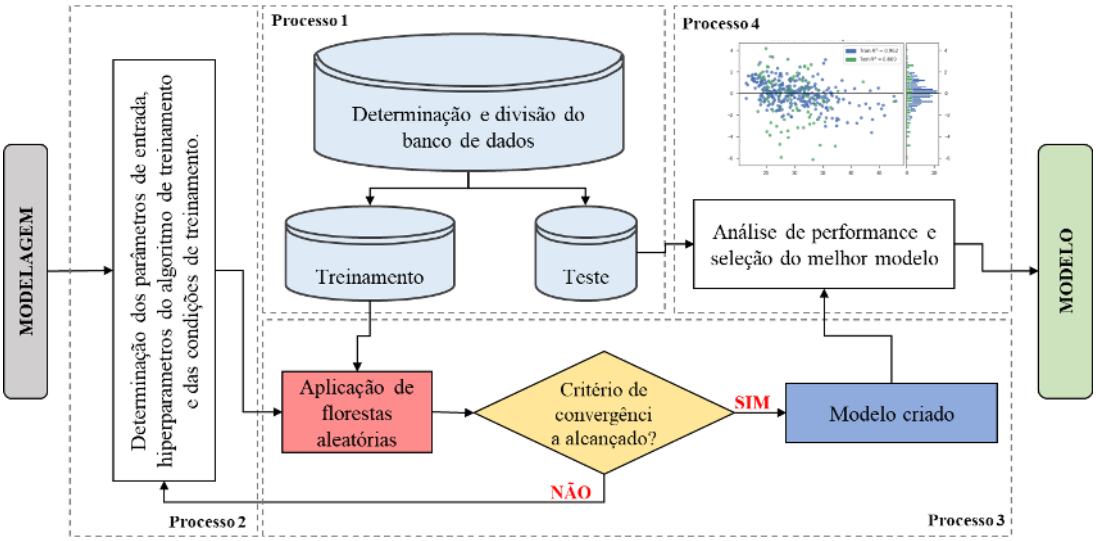
Fonte: Própria autoria.

Assim, considerando a necessidade de se ter modelos de fácil manipulação para a predição do módulo de elasticidade de concretos com agregados graúdos de RCD, o presente trabalho investiga a capacidade de aprendizado de florestas aleatórias para prever o referido parâmetro mecânico, desconsiderando em sua formulação dados de entrada que não exijam a realização, à priori, de ensaios laboratoriais.

2 MODELAGEM

Com o objetivo de criar um modelo preditivo para o módulo de elasticidade (EC) em concretos que contenham agregados naturais e/ou agregados de RCD, seguiu-se a metodologia delineada no fluxograma apresentado na Figura 2. De forma sintetizada indica-se que a primeira etapa do processo consistiu na coleta e compilação de um banco de dados. Para isso, foram coletadas e condensadas informações provenientes de resultados experimentais previamente publicados na literatura. Esse banco de dados serviu de base para as análises e modelagem da pesquisa. Na segunda etapa, análises estatísticas foram desenvolvidas com o banco de dados. O objetivo da análise consistiu em avaliar as possíveis correlações existentes entre os diferentes atributos contidos no conjunto de dados. Isso nos permitiu entender melhor como as variáveis se relacionavam entre si e com o módulo de elasticidade. A terceira fase do processo envolveu o desenvolvimento de modelos preditivos utilizando a técnica de Florestas Aleatórias. Essa etapa consistiu na criação de modelos estatísticos que pudessem estimar o módulo de elasticidade com base nos atributos selecionados do banco de dados. Em sequência, na quarta e última etapa, realizaram-se análises de desempenho para avaliar quão bem esses modelos se saíram na previsão do módulo de elasticidade, sendo também determinado o modelo que com melhor performance. Essa etapa foi crucial para garantir a eficácia do modelo.

Figura 2: Fluxo de processos conduzidos no presente estudo.



Fonte: Própria autoria.

O banco de dados, empregado no desenvolvimento do modelo, foi definido fazendo o levantamento de resultados de campanhas experimentais disponíveis na literatura. Ao todo, foram coletados 528 dados, A montagem do banco de dados foi realizada através da busca de resultados experimentais em 31 trabalhos da literatura (RAVINDRARAJAH; TAM, 1987; AJDUKIEWICZ; KLISZCZEWICZ, 2002; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002; JUAN, 2004; KOU *et al*., 2007; ETXEBERRIA *et al*., 2007a; ETXEBERRIA *et al*., 2007b; KOU; POON, 2008; KOU *et al*., 2008; CASUCCIO *et al.,* 2008; DOMINGO-CABO *et al*., 2009; DOMINGO *et al.,* 2010; CARINALDESI, 2011; GONZÁLEZ-FONTEBOA *et al*., 2011; VIERA *et al.,* 2011; RAO *et al.,* 2011; ZEGA; DI MAIO, 2011; CHEN *et al*., 2011; MANZI *et al.,* 2012; GONZÁLEZ-FONTEBOA *et al.,* 2012; KOTRAYOTHAR, 2012; KOU; POON, 2013; DUAN *et al.,* 2013; BUTLER *et al.,* 2014; DUAN; POON, 2014; DILBAS *et al.,* 2014; FOLINO; XARGAY, 2014; PEPE *et al.,* 2014; SHI et *al.,* 2017; HAYLES *et al.,* 2018; BUI et al., 2018).

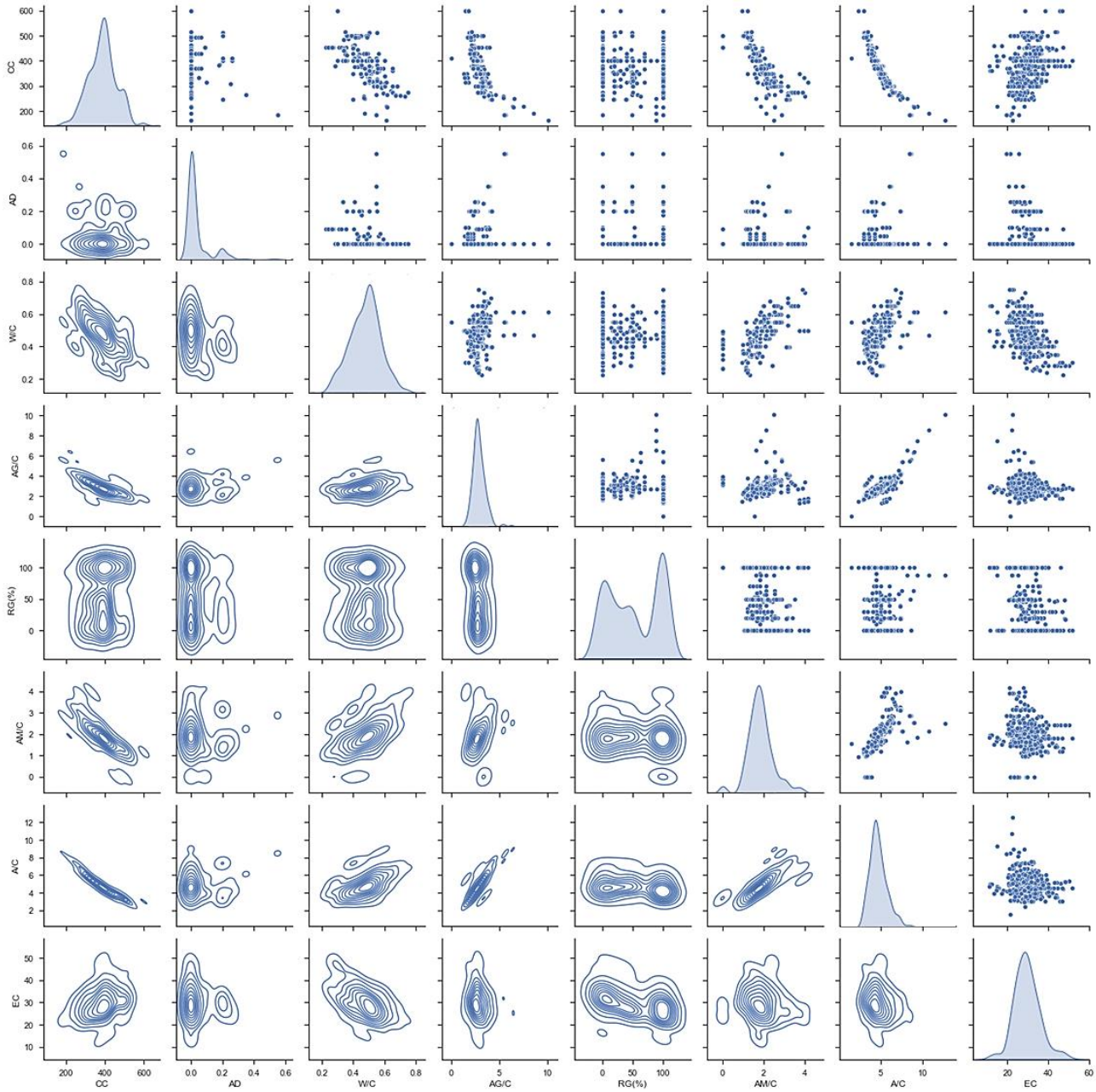
A aplicação da regressão utilizando o algoritmo de Florestas Aleatórias foi conduzida uma abordagem sequencial. Inicialmente, foi feita a coleta, preparação e análise dos dados de acordo com a metodologia delineada em Felix *et al.* (2021). Para avaliar a capacidade de generalização do modelo, os dados foram divididos em dois subconjuntos, empregando uma partição de 80% para treinamento e 20% para teste. Em seguida, criaram-se florestas composta por múltiplas árvores de decisão (de 2 a 100 árvores). Cada árvore foi construída de maneira aleatória, selecionando subconjuntos de dados e atributos em cada divisão, gerando uma agregação das previsões individuais das árvores. O desempenho dos modelos foi avaliado utilizando o erro médio quadrático (MSE) e o coeficiente de determinação (R^2).

Para avaliação do desempenho dos modelos, adotou-se a validação cruzada durante o treinamento, além da utilização de um conjunto de teste independente, visando assegurar uma avaliação imparcial do modelo, bem como avaliar sua capacidade de generalização.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o desenvolvimento do modelo, fez-se uma avaliação no banco de dados, analisando a dispersão dos atributos em relação ao módulo de elasticidade *EC* (em GPa). Os atributos explorados foram: consumo de cimento em kg/m³ (*CC*); teor de adições em substituição ao cimento (*AD*); relações entre o consumo de agregados graúdo e miúdo com o consumo de cimento (AG/C e AM/C); relação água-cimento (W/C); porcentagem de substituição do agregado graúdo natural pelo de RCD (RG%) e; a relação entre o consumo total de agregados com o consumo de cimento (A/C). A Figura 3 apresenta gráficos da distribuição, mapas de concentração e dispersão dos dados, enquanto a Figura 4 apresenta um mapa de cores da matriz de correlação cruzada dos atributos.

Figura 3: Histogramas, mapas de contorno da concentração e gráficos de dispersão dos dados.

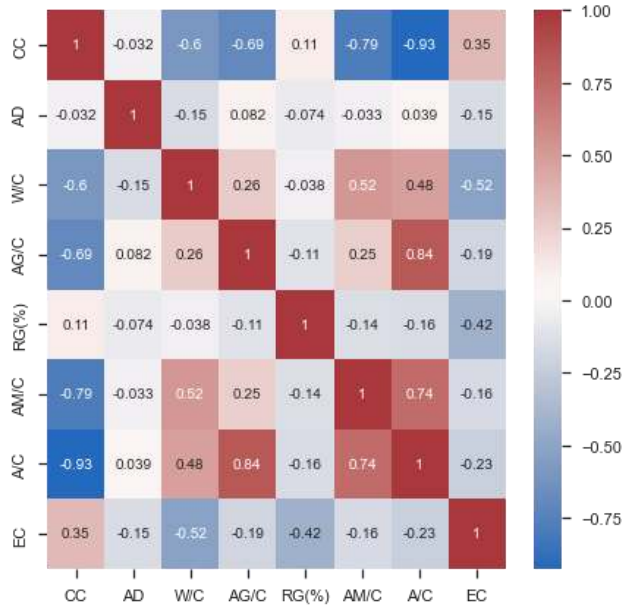


Fonte: Própria autoria.

Da figura 3, observa-se que dentre todos os atributos do banco de dados, apenas o consumo de cimento (CC) possui uma correlação positiva com EC, indicando que para os demais atributos, um aumento em seus valores acarreta uma redução no módulo de elasticidade. W/C, AD e AG/C apresentam relações não lineares com EC, porém, com comportamento exponencial. AM/C e por conseguinte, A/C apresentam correlações altamente não lineares, não sendo possível aferir por meio da Figura 3 qual o perfil correlação desses atributos com EC.

Avaliando as Figuras 3 e 4, observa-se que existe uma penalização de 42% (valor definido pelo cruzamento da coluna RG% com a linha EC) no módulo de elasticidade do concreto ao aumentar a proporção de RG%. Ademais, observa-se que existe uma correlação negativa entre o aumento RG% e EC, que é da mesma ordem da relação existente entre W/C e EC, resultado semelhante ao observado em Bui *et al*. (2018). Deste modo, estes resultados demonstram que não é possível desenvolver um modelo de regressão linear múltipla para o módulo de elasticidade, tornando-se necessário empregar uma técnica de regressão mais eficiente e capaz de captar relações não lineares.

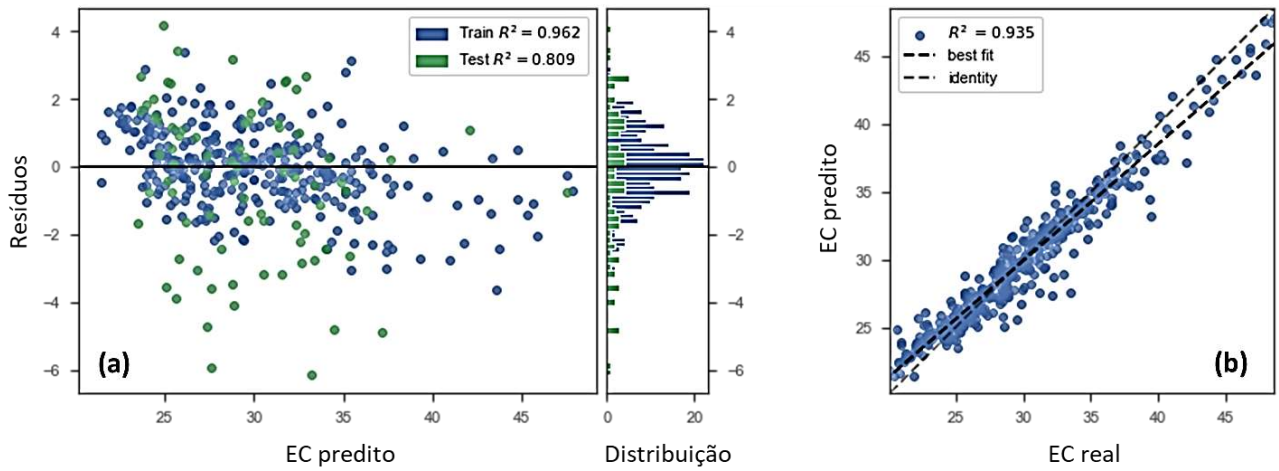
Figura 4: Matriz de correlação cruzada dos atributos do banco de dados.



Fonte: Própria autoria.

Para a determinação de um modelo não linear, realizou-se o treinamento com Florestas aleatórias. Foram treinadas 99 florestas, variando o número de árvores entre 2 e 100. O desempenho de cada modelo foi avaliado determinando a melhor a combinação da melhor *Floresta*. O melhor desempenho foi obtido com a *Floresta* com 100 árvores, cuja performance é apresentada na Figura 5, onde constam a distribuição dos erros residuais obtidos na fase de treinamento e teste, além da dispersão dos valores preditos em relação aos valores reais, incluindo o coeficiente de determinação (R^2).

Figura 5: Performance do modelo: (a) distribuição dos resíduos e (b) dispersão entre valores reais e preditos.



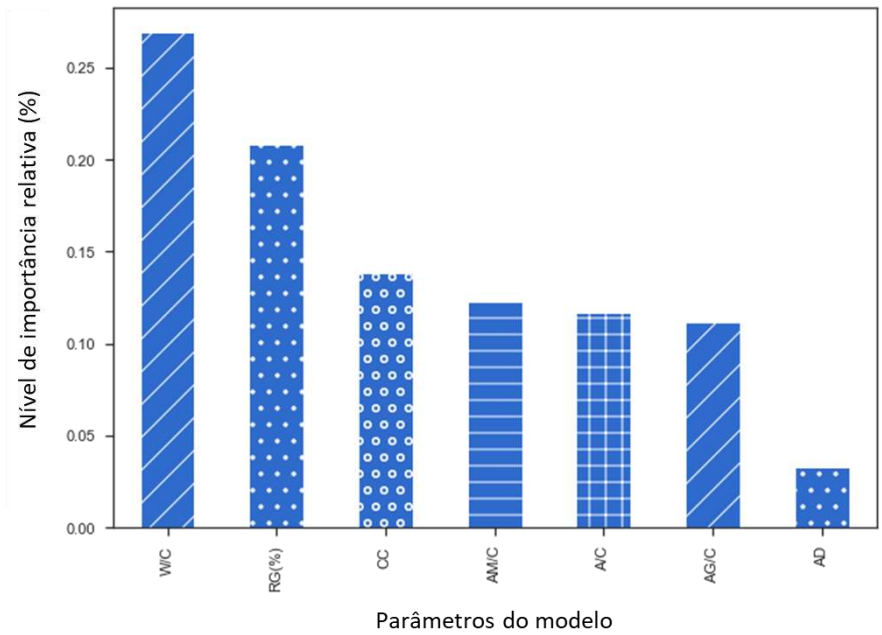
Fonte: Própria autoria.

Da Figura 5 é possível observar que os resíduos obtidos na fase de teste são inferiores aos do processo de treinamento, mesmo que R^2 de teste seja inferior ao de treinamento. Ademais, observa-se que o modelo superestimou o módulo de elasticidade em 4 GPa e subestimou em 6 GPa. Considerando que os concretos testados apresentam módulos de elasticidade de no máximo 46 GPa, o erro máximo percentual de predição

foi de 13%, com nível geral de acurácia de 93,5%, indicando boa capacidade de generalização na previsão do módulo de elasticidade.

Por fim, com o propósito de avaliar o nível de importância de cada parâmetro do modelo na capacidade de predição do módulo de elasticidade, desenvolveu-se uma análise de importância, no qual os resultados são dispostos na Figura 6.

Figura 6: Nível de importância dos parâmetros de entrada do modelo na predição do módulo de elasticidade.



Fonte: Própria autoria.

Os resultados da Figura 6 indicam que a relação água-cimento (W/C) e a proporção de agregados graúdos naturais substituídos por RCD (RG%), são os atributos mais relevantes na previsão do módulo de elasticidade, com níveis de importância superiores a 20%. O consumo de cimento (CC) e os consumos de agregados total (A/C), miúdo (AM/C) e graúdo (AG/C) também demonstraram significativa importância na predição de EC, com importância de 13%. O único atributo que não se mostrou relevante para a previsão foi o teor de adições (AD).

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, elencam-se as seguintes conclusões:

- A substituição do agregado graúdo natural pelo agregado de RCD, resulta em uma penalização significativa no módulo de elasticidade, gerando reduções de até 42%. Isso sugere que a performance do concreto, em termos de rigidez, é afetada negativamente quando se utiliza maiores teores de RCD;
- O modelo de Florestas aleatórias foi treinado e avaliado, considerando várias combinações de árvores. O melhor desempenho foi obtido com uma floresta de 100 árvores. O modelo demonstrou boa capacidade de generalização, com acurácia 93,5% na predição do módulo;
- A análise de importância dos parâmetros de entrada revelou que a relação água-cimento e a proporção de substituição de agregados graúdos naturais por RCD são os atributos mais importantes na predição do módulo de elasticidade. Isso destaca a influência significativa desses fatores na qualidade do concreto. Além disso, o consumo de cimento e os consumos de agregados (total, miúdo e graúdo) também desempenharam papéis relevantes na predição, enquanto o teor de adições mostrou-se ser insignificante, considerando o banco de dados explorado.

Deste modo, o modelo desenvolvido neste trabalho apresenta boa performance, apontando sua aplicabilidade na otimização de formulações de concreto sustentáveis, corroborando com o desenvolvimento sustentável da construção civil. Além disso, os resultados comprovam a aplicabilidade das Florestas aleatórias no mapeamento do módulo de elasticidade do concreto, e que o modelo desenvolvido possibilita fácil aplicação, já que não requer o conhecimento de dados de difícil coleta, a exemplo da resistência à compressão.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o auxílio concedido pelo Programa de Incentivo e Estímulo à Pesquisa do edital 06/2023 PROPe da UNESP e fomento associado ao projeto de pesquisa regular com processo nº 2023/04364-9, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

REFERÊNCIAS

AJDUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. **Cement & Concrete Composites**. Vol. 24, pp. 269-279, 2002.

BEHNOOD, A.; OLEK, J.; GLINICKI, M. A. Predicting modulus elasticity of recycled aggregate concrete using M50 model tree algorithm. **Construction and Building Materials**. Vol. 94, pp. 137-147, 2015.

BREIMAN, L.; FRIEDMAN, J.; STONE, C. J.; OLSHEN, R.A. **Classification and regression trees**. CRC Press, 1984.

BUI., N. K.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**. Vol 163, pp. 496-507, 2018.

BUTLER, L.; WEST, J. S.; TIGHE, S. L. Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength. **Construction and Building Materials**. Vol 47, pp. 1292-1301, 2013.

CASUCCIO, M.; TORRIJOS, M. C.; GIACCIO, G.; ZERBINO, R. Failure mechanism of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. Vol 22, pp. 1500-1506, 2008.

CHEN, A.; WANG, J.; GE, Z. Experimental study on the fundamental characteristics of recycled concrete. **Advanced Materials Research**. Vol. 295-297, pp. 958-961, 2011.

CORINALDESI, V. Structural concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate: from investigation to design. **Advances in Civil Engineering**. Vol. 2011, pp. 1-6, 2011.

DILBAS, H.; ŞIMŞEK, M.; ÇAKIR, Ö. An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. **Construction and Building Materials**. Vol 61, pp. 50-59, 2014.

DUAN, Z. H.; KOU, S. C.; POON, C. S. Using artificial neural networks for predicting the elastic modulus of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. Vol 44, pp. 524-532, 2013.

DUAN, Z. H.; POON, C. S. Properties of recycled aggregate concrete made with reclycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. **Materials and Design**. Vol. 58, pp. 19-29, 2014.

DOMINGO-CABO, A.; LÁZARO, C.; LÓPEZ-GAYARRE, F.; SERRANO-LÓPEZ, M. A.; SERNA P.; CASTAÑO-TABARES J. O. Creep and shrinkage on recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. Vol 23, pp. 2545-2553, 2009.

DOMINGO-CABO, A.; LÁZARO, C.; LÓPEZ-GAYARRE, F.; SERRANO-LÓPEZ, M. A.; LÓPEZ-COLINA, C. Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete. **Materials and Structures**. Vol. 43, pp. 1147-1160, 2010.

DUAN, Z.; POON, C. S.; XIAO, J. Using artificial neural networks to assess the applicability of recycled aggregate classification by different specifications. **Materials and Structures**. Vol. 50, pp. 1-14, 2017.

ETXEBERRIA, M.; MARÍ, A. R.; VÁZQUEZ, E. Recycled aggregate concrete as structural material. **Materials and Structures**. Vol. 40, pp. 529-541, 2007.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A. R.; BARRA, M. Influence of amount of recycle coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**. Vol. 37, pp. 735-742, 2007.

FELIX, Emerson Felipe; POSSAN, Edna; CARRAZEDO, Rogério. 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.

FOLINO, P.; XARGAY, H. Recycled aggregate concrete – Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression. **Construction and Building Materials**. Vol 56, pp. 21-31, 2014.

GOLAFSHANIA, E. M.; BEHNOOD, A. Automatic regression methods for formulation of elastic modulus of recycled aggregate concrete. **Applied Soft Computing**. Vol. 64, pp. 377-400, 2018.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. **Shrinkage of concrete with replacement of aggregate with recycled aggregate concrete**. In: ACI SP-209: Innovations in Design with Emphasis on Seismic, Wind, and Environmental Loading; Quality Control and Innovations in Materials/Hot-Weather Concreting, American Concrete Institute, 2002.

HAYLES, M.; SANCHEZ, L. F. M.; NOËL, M. Eco-efficient low cement recycled aggregate mixtures for structural applications. **Construction and Building Materials**. Vol 169, pp. 724-732, 2018.

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. H. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. New York: Springer, 2009.

JUAN, M. S. **Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural**. Tesis. Departamento de Ingeniería Civil: Construcción. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 2004.

KOTRAYOTHAR, D. Recycled Aggregate Concrete for Structural Applications. Thesis. School of Computing, **Engineering and Mathematics**. University of Western Sydney. Penrith, 2012.

KOU, S-C.; POON, C.-S. CHAN, D. Influence of fly ash as cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete. **Materials and Structures**. Vol. 41, pp. 1191-1201, 2008.

KOU, S-C.; POON, C.-S. CHAN, D. Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol. 19, pp. 709-717, 2007.

KOU, S-C.; POON, C.-S. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. **Cement & Concrete Composites**. Vol. 37, pp. 12-19, 2013.

KOU, S-C.; POON, C.-S. Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources. **Magazine of Concrete Research**. Vol. 60, pp. 57-64, 2008.

MANZI, S.; MAZZOTTI, C.; BIGNOZZI, M. C. Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 37, pp. 312-318, 2013.

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

OMRAN, B. A.; CHEN, Q.; JIN R. Comparison of Data Mining Techniques for Predicting Compressive Strength of Environmentally Friendly Concrete. **Journal of Computing in Civil Engineering**. Vol. 30, pp. 1-13, 2016.

PADMINI, A. K.; RAMAMURTHY, K.; MATHEW, M. S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. Vol. 23, pp. 829-836, 2009.

PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D.; KOENDERS, E. A. B.; MARTINELLI, E. Alternative processing procedures for recycled aggregate in structural concrete. **Construction and Building Materials**. Vol 69, pp. 124-132, 2014.

RAO, M. C.; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, S. V. Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load. **Construction and Building Materials**. Vol 25, pp. 69-80, 2011.

RAVINDRARAJAH, R. S. TAM, C. T. Recycling concrete as fine aggregate in concrete. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete.** Vol. 9, pp. 235-241, 1987.

SHI, X.; MUKHOPADHYAY, A.; LIU, K-W. Mix design formulation and evaluation of portland cement concrete paving minxture containing reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**. Vol 152, pp. 756-768, 2017.

VIEIRA, J. P. B.; CORREIA, J. R.; BRITO, J. Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled aggregate concrete coarse aggregates. **Cement and Concrete Research**. Vol. 41, pp. 533-541, 2011.

ZEGA, C. J.; DI MAIO, A. A. Use of recycled fine aggregate in concrete with durable requirements. **Waste Management**. Vol. 31, pp. 2336-2340, 2011.