

## MISTURAS SOLO-CIMENTO REFORÇADAS COM FIBRAS: PREVISÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE USANDO REDES NEURONAS ARTIFICIAIS

### FIBRE-REINFORCED SOIL-CEMENT MIXTURES: PREDICTION OF THE ELASTIC MODULUS BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Owusu-Ansah, Dominic, *Universidade do Minho*, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, *Guimarães*, Portugal, *dominic@civil.uminho.pt\**

Tinoco, Joaquim *Universidade do Minho*, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, *Guimarães*, Portugal, *jtinoco@civil.uminho.pt*

Correia, Antonio S., *Universidade do Coimbra*, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, *Guimarães*, Portugal, *aalberto@dec.uc.pt*

Venda Oliveira, Paulo, *Universidade do Coimbra*, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, *Guimarães*, Portugal, *pjvo@dec.uc.pt*

Matos, Jose, *Universidade do Minho*, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, *Guimarães*, Portugal, *jmatos@civil.uminho.pt*

\**Owusu-Ansah Dominic*

#### RESUMO

Misturas solo-cimento reforçadas com fibras são um método de estabilização química de solos onde a reduzida ou ausência de resistência à tração e/ou flexão inerente às misturas solo-cimento é superada pela incorporação de fibras. A caracterização laboratorial completa destas misturas é uma tarefa que consome tempo e muitos recursos, pois estão envolvidos muitos parâmetros no seu dimensionamento. Por conseguinte, a aplicação de uma abordagem baseada em algoritmos de inteligência artificial oferece outra forma alternativa de prever as propriedades mecânicas destas misturas de uma forma rápida e menos dispendiosa. Neste estudo, redes neurais artificiais (ANNs) foram treinadas para prever o módulo de elasticidade de misturas solo-cimento reforçadas com fibras. Foi utilizado um conjunto de 121 registos com 16 propriedades do material composto (solo, ligante e fibras) para treinar o algoritmo. O algoritmo ANN demonstrou um coeficiente de determinação promissor ( $R^2 = 0.95$ ) para a previsão do módulo de elasticidade. Além disso, os resultados do modelo proposto são consistentes com o conhecimento empírico, onde o conteúdo de fibras e ligante têm uma influência significativa no módulo de elasticidade.

#### ABSTRACT

Fibre-reinforced soil-cement mixtures are a method of chemical soil stabilisation with an inherent drawback where the low or no tensile or flexural strength is overcome by embedding fibres. These mixtures are time and resource-consuming for full laboratory characterization as many parameters are involved. Therefore, the application of an Artificial Intelligence approach offers another way of predicting the mechanical properties of such mixtures. In this study, Artificial Neural Networks (ANNs) were trained to predict the elasticity modulus of soil-cement mixtures reinforced with fibres. A dataset of 121 records with 16 properties of the composite material (soil, binder and fibres) was used to train the algorithm. The algorithm ANN demonstrated a promising coefficient of determination ( $R^2 = 0.95$ ) for predicting the elasticity modulus. Furthermore, the results

of the proposed model are consistent with the empirical knowledge, where the fibres and binder content have a significant role on the modulus of elasticity.

## 1. INTRODUÇÃO

O solo é o material de construção mais antigo, estando aplicado em quase 15% das obras arquitetónicas que constam da Lista do Património Mundial da UNESCO. As principais vantagens deste material residem no seu baixo custo, disponibilidade e reciclabilidade (Costantini Romero et al., 2021). Alguns solos podem exibir baixa resistência ao corte, elevada compressibilidade, associados por vezes a elevada susceptibilidade a alterações de volume e sensibilidade ao teor de humidade (Owusu-Ansah et al., 2022; Tinoco et al., 2021). Consequentemente, para poder ser utilizado como material de construção é necessário melhorar estas desvantagens inerentes. A estabilização química de solos é um método que tem sido utilizado durante as últimas décadas para melhorar as propriedades mecânicas dos solos em alternativa aos métodos convencionais de estabilização física do solo. O cimento é reconhecido como um dos mais importantes ligantes ou aditivos na engenharia geotécnica para a estabilização de solos, nomeadamente solos expansivos, argilas contaminadas, e lodos (Chen et al., 2018). Assim, misturas solo-cimento têm sido muito utilizadas para melhoria de fundações de estruturas, aumento da estabilidade de taludes, mitigação de liquefação, estabilização de solos contaminados, etc.

Todavia, as misturas solo-cimento têm um comportamento deficiente quando sujeitas a vibrações horizontais ou deslocamentos, havendo, portanto, a necessidade de mitigar esta limitação. Estudos realizados por diversos autores (Khattak & Alrashidi (2006), Owusu-Ansah et al., (2022), e Tinoco et al., (2021) indicaram que a inclusão de fibras na mistura solo-cimento melhora o comportamento à tração e flexão, bem como outras propriedades mecânicas, tais como a resistência à compressão não confinada (UCS), e o módulo de elasticidade ( $E_0$ ).

Os resultados acima referidos são consequência de experiências laboratoriais que consomem tempo e recursos. Portanto, um método alternativo consiste na utilização de algoritmos de Inteligência Artificial (IA) para prever as respetivas propriedades mecânicas (Owusu-Ansah et al., (2022) e Tinoco et al., (2021)) Assim, neste trabalho, é implementada uma abordagem baseada em dados laboratoriais para prever o módulo de elasticidade de misturas solo-cimento reforçadas com fibras utilizando o algoritmo Redes Neurais Artificiais (ANN).

## 2. MÉTODOS E DADOS

Os dados utilizados neste estudo foram compilados de experiências laboratoriais (Owusu-Ansah et al., 2022; Tinoco et al., 2021). O algoritmo ANN tem sido utilizado em vários trabalhos geotécnicos. ANN modela mapeamentos complexos não lineares e é robusto na exploração de dados com ruído. Neste estudo foi adotado o perceptron de várias camadas contendo ligações feedforward com uma camada oculta com  $H$  unidades de processamento, e adotada a função logística  $1/(1+e^{-x})$ . O algoritmo ANN foi implementado no software R com recurso à biblioteca rminer. Para fins de validação foi aplicada uma abordagem de validação cruzada. Todo o processo foi repetido 5 vezes. Os dados utilizados para efeitos de treino e validação do modelo contêm 121 registos e compreendem 16 variáveis de entrada:

- Percentagem de areia do solo (%) – %Sand

- Percentagem de silte do solo (%) – %Silt
- Percentagem de argila do solo (%) – %Clay
- Percentagem de matéria orgânica do solo (%) – %OM
- Limite de liquidez –  $W_{LL}$
- Limite de plasticidade –  $W_{PL}$
- Teor em água (%) –  $\omega_0$
- Teor de ligante/cimento (%) –  $a_w$
- Dosagem de cimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) –  $D_{\text{kg}/\text{m}^3}$
- Rácio entre o teor em água e o teor em cimento –  $\omega_0/a_w$
- Idade da mistura (dias) –  $t$
- Comprimento da fibra (mm) –  $L_{\text{fibra}}$
- Teor em fibra (%) –  $T_{\text{fibra}}$
- Dosagem de fibra ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) –  $F_{\text{kg}/\text{m}^3}$
- Resistência à tração da fibra (MPa) –  $FCT_{\text{fibra}}$
- Modulo de deformabilidade da fibra (GPa) -  $E_{\text{fibra}}$

Para medir o desempenho do modelo, foram utilizadas métricas como erro médio absoluto (MAE), erro quadrático médio (RMSE), e coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Tanto para o MAE como para o RMSE, quanto menor ou mais próximo de zero forem, melhor será a precisão do modelo preditivo. No caso de  $R^2$ , quanto mais próximo do valor unitário, melhor será o desempenho do modelo. Foi também realizada uma análise de sensibilidade (importância relativa) para determinar a influencia dos parâmetros de entrada na previsão de  $E_0$ .

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo por base as métricas calculadas, os resultados obtidos indicam um desempenho muito satisfatório do algoritmo ANN na previsão de  $E_0$ . Tanto o MAE como o RMSE mostram valores baixos, enquanto  $R^2$  exibe um valor próximo de 1 ( $R^2 = 0.95$ ). A Figura I ilustra a correlação entre os valores experimentais vs previstos, com a maioria dos pontos bem próximos da linha diagonal, demonstrando a qualidade do modelo. A Figura II mostra a importância relativa de cada uma das variáveis de entrada de acordo com o modelo ANN na previsão de  $E_0$ . Das 16 variáveis de entrada consideradas o teor de fibra,  $T_{\text{fibra}}=16.9\%$ ; a dosagem de ligante,  $D_{\text{kg}/\text{m}^3}=12.8\%$ ; as propriedades do solo,  $w_0=11.3\%$ , argila= $10.7\%$ ;  $w_0/a_w=10.8\%$  e a idade de cura ( $t=5.2\%$ ) são os parâmetros mais importantes na previsão de  $E_0$  (Owusu-Ansah et al., 2022; Tinoco et al., 2021).

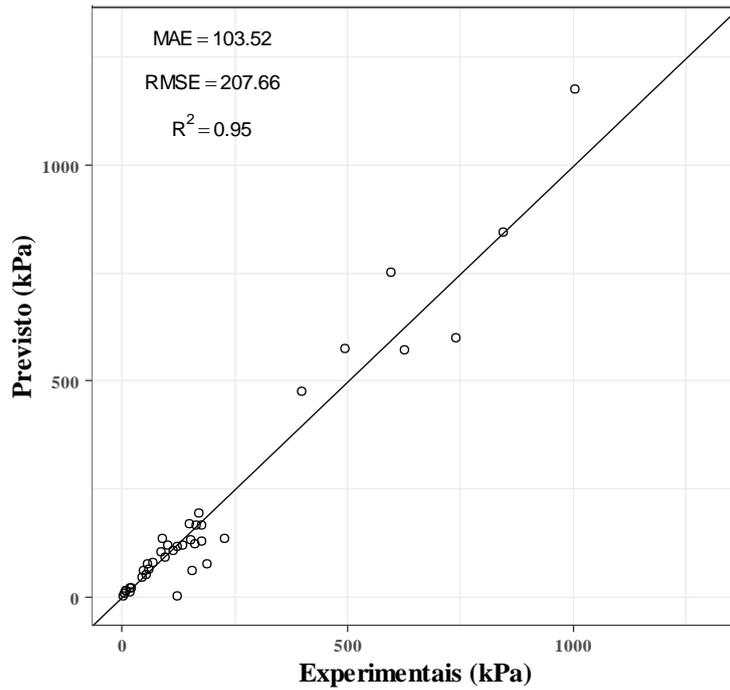


Figura I Relação entre os valores experimentais vs previstos de  $E_0$  segundo o modelo ANN

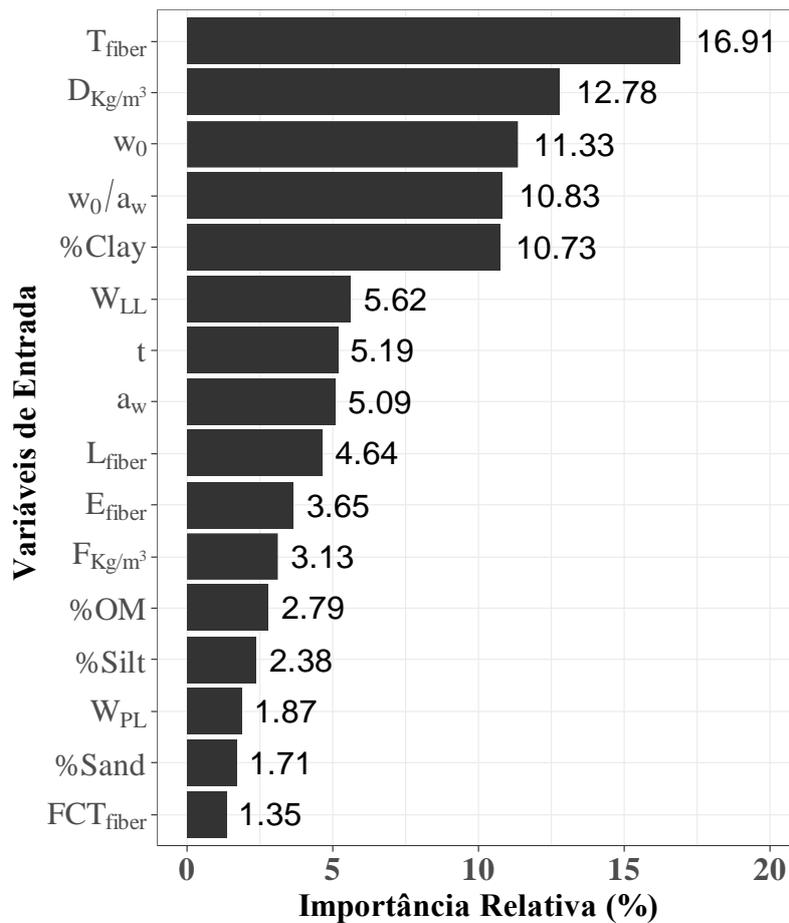


Figura II Importância relativa de cada variável de entrada segundo o modelo ANN

#### 4. CONCLUSÕES

Neste estudo, o algoritmo Rede Neuronal Artificial (ANN) foi utilizado na previsão do módulo de elasticidade ( $E_0$ ) de misturas solo-cimento reforçadas com fibras, tendo sido utilizada uma base de dados experimentais contendo 121 registos e 16 variáveis de entrada. Um  $R^2 = 0,95$ , e baixos valores do erro médio absoluto (MAE) e erro médio quadrático (RMSE) indicam um desempenho promissor do modelo ANN. Por outro lado, a importância relativa revelou que o conteúdo de fibras, a dosagem de ligante, as propriedades do solo, e o tempo de cura são as variáveis mais influentes na previsão de  $E_0$ .

O desempenho observado neste estudo na previsão do  $E_0$ , assim como a elevada capacidade de aprendizagem demonstrado no passado na resolução de problemas geotécnicos complexos, são indicativos do elevado potencial das ANN. Assim, o modelo proposto poderá ser aplicado na previsão do  $E_0$  durante a fase de conceção de trabalhos geotécnicos, uma vez que depende apenas de parâmetros que não requerem a realização de campanhas experimentais.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da unidade I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia (ISISE), com a referência UIDB / 04029/2020, e no âmbito do Laboratório Associado Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE, com a referência LA/P/0112/2020. Este trabalho foi realizado ao abrigo do Projeto “Ferrovia 4.0 (POCI-01-0247-FEDER-046111; Lisboa-01-0247-FEDER-046111), pelo Consórcio “Ferrovia”, financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Sistema de Incentivos à Investigação e Desenvolvimento Tecnológico, no âmbito do Programa Operacional para a Competitividade e Internacionalização do Portugal2020.

#### REFERÊNCIAS

- Chen, C., Zhang, G., Zornberg, J. G., Morsy, A. M., Zhu, S., & Zhao, H. (2018). Interface behavior of tensioned bars embedded in cement-soil mixtures. *Construction and Building Materials*, 186, 840–853. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.211>
- Costantini Romero, A. B., Francisca, F. M., & Giomi, I. (2021). Hygrothermal properties of soil–cement construction materials. *Construction and Building Materials*, 313, 125518. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125518>
- Khattak, M. J., & Alrashidi, M. (2006). Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil–cement mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 7(1), 53–62. <https://doi.org/10.1080/10298430500489207>
- Owusu-Ansah, D., Tinoco, J., Correia, A. A. S., & Oliveira, P. J. V. (2022). Prediction of Elastic Modulus for Fibre-Reinforced Soil-Cement Mixtures: A Machine Learning Approach. *Applied Sciences*, 12(17), 8540. <https://doi.org/10.3390/app12178540>
- Tinoco, J., Correia, A. A. S., & da Venda, P. (2021). Soil–Cement Mixtures Reinforced with Fibers: A Data-Driven Approach for Mechanical Properties Prediction. *Applied Sciences*, 11, 1–16. <https://doi.org/10.3390/app11178099>