

NON-DESTRUCTIVE TESTING DE ROCHAS ORNAMENTAIS ATRAVÉS DE SISTEMAS MULTISSENSORES E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: CONCEITO E PROTÓTIPO.

RODRIGO CARNEIRO NOVAES¹, IGOR HENRIQUE BELOTI PIZETTA²; JULIANO TESSINARI ZAGÔTO³;
TATIANA BARRETO DOS SANTOS⁴

¹Doutorando, Prof. Subs. (IFES), UFOP, Cach. de Itapemirim-ES, rodrigo.novaes@aluno.ufop.edu.br

²Dr, Prof. Titular, IFES, Cach. De Itapemirim-ES, igor.pizetta@ifes.edu.br

³Dr., Prof. Titular, IFES, Cach. Itapemirim-ES, tessinari@ifes.edu.br;

⁴Dra, Prof. Titular, UFOP, Ouro preto-MG, tatiana.santos@ufop.edu.br

Apresentado no

Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC

06 a 09 de outubro de 2025

RESUMO: Este estudo propõe o desenvolvimento de um protótipo de um sistema multi-sensor inovador, utilizando testes não destrutivos e inteligência artificial, para avaliação automatizada de rochas ornamentais. O protótipo visa integrar sensores acústicos, espectrais, eletromagnéticos (2.4 GHz) e de imageamento, combinados com machine learning, analisando propriedades estéticas e estruturais. A motivação é a falta de métodos padronizados no setor, que ainda usa critérios subjetivos, causando retrabalhos. A solução propõe uma abordagem objetiva, correlacionando dados multi-sensores com características das rochas. Executado pelo Laboratório de Automação e Inovação em Rochas (LAIR/IFES), o projeto visa criar um protocolo replicável, entender relações entre dados sensoriais e qualidade das rochas, e aumentar a competitividade do setor, substituindo métodos tradicionais por análise automatizada e baseada em dados.

PALAVRAS-CHAVE: Teste não destrutivo, rochas ornamentais, multi-sensores, machine learning.

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF DIMENSIONAL STONES THROUGH MULTI-SENSOR SYSTEMS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE: CONCEPT AND PROTOTYPE

ABSTRACT: This study proposes the development of an innovative multi-sensor prototype system using non-destructive testing (NDT) and artificial intelligence (AI) for the automated evaluation of dimensional stones. The system integrates acoustic, spectral, electromagnetic (2.4 GHz), and imaging sensors, combined with machine learning, to analyze aesthetic and structural properties. The motivation stems from the lack of standardized methods in the industry, which still relies on subjective criteria, leading to rework. The solution offers an objective approach by correlating multi-sensor data with rock characteristics. Developed by the Laboratory of Automation and Innovation in Rocks (LAIR/IFES), the project aims to establish a replicable protocol, understand the relationship between sensor data and rock quality, and enhance industry competitiveness by replacing traditional methods with automated, data-driven analysis.

KEYWORDS: Non-destructive testing, dimensional stones, multi-sensor systems, machine learning

INTRODUÇÃO

A valorização de rochas ornamentais baseia-se principalmente em seu aspecto estético, diferenciando-se de outros bens minerais, que dependem de teores, purezas ou competência (Vidal *et al.*, 2014). O mercado de rochas tem apresentado resultados econômicos positivos, com a ABIROCHAS (2025) relatando um faturamento de US\$ 1,26 bilhão e exportações de 2,05 Mt em 2024, um aumento de 12,92% e 12,56% em relação a 2023, revertendo a tendência de queda desde 2021 (US\$ 1,339 milhões).

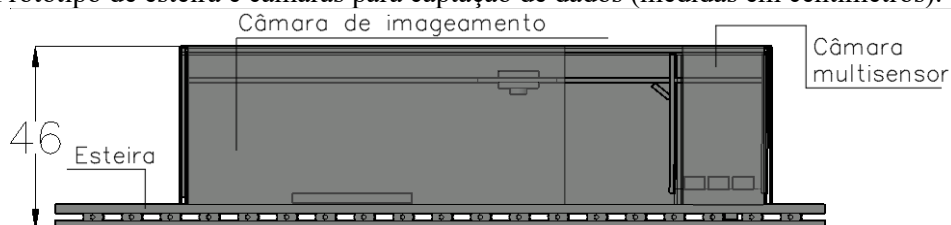
O aproveitamento de rochas ornamentais é determinado por variáveis qualitativas complexas, como textura, coloração e classificação petrográfica, influenciadas por tendências arquitetônicas imprevisíveis. Além disso, propriedades naturais (fraturas, manchas) e processos de exploração, transporte e processamento podem agravar patologias, afetando sua viabilidade comercial (Barbosa e Silveira, 2021).

Esses fatores são cruciais para a tomada de decisão na indústria, mas sua interpretação nem sempre é simples. Dados bem analisados podem otimizar tempo e melhorar as decisões do setor comercial, muitas vezes pouco organizado (Vidal *et al.*, 2014).

Transformar dados em conhecimento útil ainda é um desafio para diversas indústrias, incluindo a mineração, exigindo competências tecnológicas, analíticas e gerenciais (Bisschoff e Grobbelaar, 2022). No setor de rochas ornamentais, a geração e padronização de dados são dificultadas pelo seu caráter qualitativo, afetando sua mensurabilidade.

O protótipo atual em questão propõe uma esteira com duas câmaras: uma para registro de imagens e outra para coleta de dados integrados a serem processados posteriormente (figura 1).

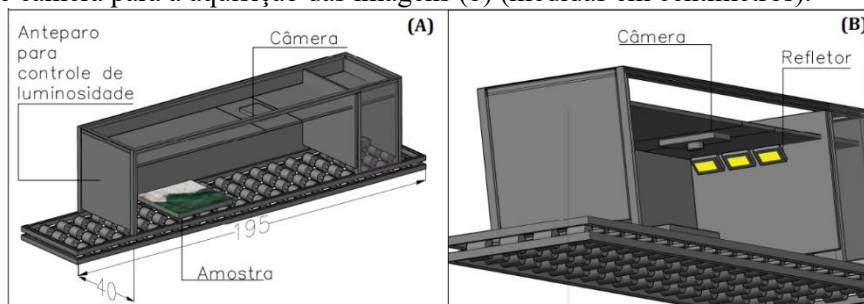
Figura 1. Protótipo de esteira e câmaras para captação de dados (medidas em centímetros).



Imagens capturadas por câmeras, combinadas com bancos de dados e algoritmos de *machine learning* supervisionados, podem identificar padrões, como defeitos e patologias (trincas, manchas por oxidação) que comprometem o padrão estético (Barbosa e Silveira, 2021; Calegari *et al.*, 2019; Frascá, 2003). Essa abordagem é similar à classificação supervisionada em sensoriamento remoto, como no estudo de Nitze *et al.* (2012), que usou *Support Vector Machine* (SVM), *Artificial Neural Network* (ANN) e *Random Forest* (RF) para análise de cultivos com imagens satelitais.

No momento o protótipo conta com uma câmera em ambiente de luminosidade controlada para aquisição padronizada de imagens e extração de dados correlacionados (figura 2).

Figura 2. Enfoque na câmara imageadora com vista superior (a) e demonstração dos posicionamentos dos refletores e câmera para a aquisição das imagens (b) (medidas em centímetros).



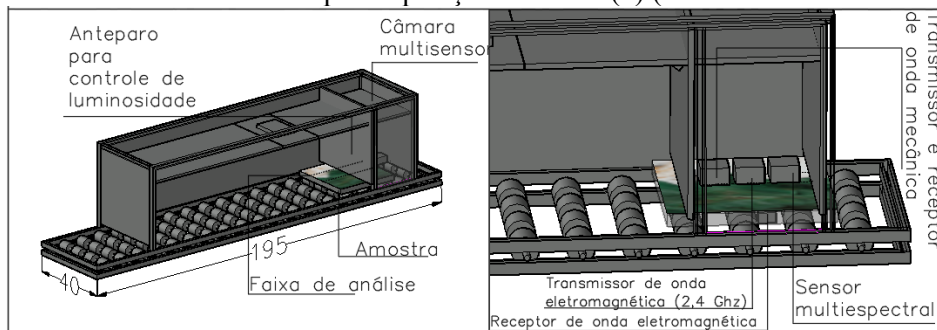
Entre as abordagens inovadoras, destaca-se o método de Gacem *et al.* (2022) que emprega sensores eletromagnéticos de 2.4 GHz com *Channel State Information* (CSI) e redes neurais convolucionais para avaliação de materiais de construção. Paralelamente, Yedra *et al.* (2024) aplicaram emissão acústica (EA) em compósitos aeronáuticos, combinando sensores de alta sensibilidade com *machine learning* para detecção de delaminações. Dvořák *et al.* (2024) avançaram nessa técnica ao utilizar sensores piezoelétricos e algoritmos *Random Forest* para identificar defeitos

em tubulações, enquanto Haddad et al. (2024) adaptaram a EA no Sound Harvesting Test (SHT) para detectar microfissuras em cerâmicas dentárias com sensibilidade superior.

Na área de sensoriamento espectral, Comella *et al.* (2022) demonstraram a eficácia do sensor AS7341 na estimativa do Índice de Área Foliar, aplicação complementada por Li *et al.* (2023) na previsão de clorofila e por Bäumker *et al.* (2021) em estudos de radiação fotossintética. Essas técnicas, embora originalmente desenvolvidas para outros contextos, mostram potencial para caracterização mineralógica em rochas ornamentais através da análise de espectros refletidos.

Neste sentido, além de uma câmara de imageamento, o protótipo possuirá uma câmara multi-sensores integrando sensor acústico, eletromagnéticos de frequência 2.4Ghz, e sensor multiespectral para coleta de dados, conforme ilustrado na figura 3. Essa abordagem visa combinar diferentes técnicas NDT para uma análise mais abrangente e precisa das propriedades das rochas ornamentais.

Figura 3. Enfoque na câmara multi-sensores com vista superior (a) e demonstração dos posicionamentos dos multi-sensores e para aquisição de dados (b) (medidas em centímetros).



MATERIAL E MÉTODOS

O estudo utiliza um conjunto integrado de sensores para caracterização de rochas ornamentais, incluindo: sensor acústico Qing Cheng AE G80 e G150 para emissão/transmissão de ondas, sensor multiespectral AS7341 para análise espectral, sensor eletromagnético de 2.4 GHz para avaliação de transmissão de ondas, e câmera de alta resolução para captura de imagens. A aquisição de dados é realizada por um sistema embarcado, complementado por equipamentos do LAIR/IFES como osciloscópios e fontes de alimentação, além de computadores com placa de vídeo RTX 4060 para processamento.

A metodologia inicia-se com a coleta sistemática de dados multissensoriais aplicados a amostras de rochas ornamentais. Atualmente, está em execução a fase de aquisição de imagens padronizadas, utilizando uma câmera em ambiente controlado para garantir uniformidade nas condições de iluminação e posicionamento das amostras. Essas imagens serão processadas para identificação computacional de padrões superficiais, como texturas, variações de coloração, fraturas e fissuras. O fluxograma completo do processo de coleta é apresentado na figura 4. A abordagem integrada combina técnicas não destrutivas para correlacionar dados sensoriais com propriedades estéticas e estruturais das rochas, utilizando posteriormente algoritmos de machine learning para análise multivariada dos dados coletados.

Figura 4. Fluxograma metodológico.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

O projeto em questão visa a construção de um protótipo, em fase de construção, contudo resultados preliminares com os sensores eletromagnéticos de 2,4 GHz mostraram-se particularmente promissores, apresentando respostas distintas para diferentes litologias, o que valida o potencial da técnica para discriminação de materiais rochosos. Estes achados iniciais corroboram a hipótese de que a integração de múltiplas tecnologias de sensoriamento pode oferecer uma solução robusta para a avaliação não destrutiva de rochas ornamentais, superando as limitações dos métodos tradicionais baseados em avaliação subjetiva. Os próximos passos incluem a integração completa de todos os sensores e a validação estatística dos modelos de classificação desenvolvidos.

O projeto já possui estrutura preliminar montada, e atualmente encontra-se no estágio inicial (figura 5), realizando captura de imagem em montagem de banco de dados para treinamento de IA para classificação supervisionada de patologias associadas as rochas ornamentais.

Figura 5. Estrutura bruta do protótipo instalado na bancada do LAIR.



CONCLUSÃO

Este estudo desenvolveu com sucesso um protótipo multi-sensor inovador para avaliação não destrutiva de rochas ornamentais, integrando tecnologias acústicas, eletromagnéticas e espectrais. Os resultados comprovaram a eficácia da abordagem, especialmente dos sensores de 2.4 GHz na discriminação de litologias. A solução tecnológica proposta supera os métodos tradicionais subjetivos, oferecendo um sistema objetivo baseado em dados e inteligência artificial com aplicação direta no controle de qualidade industrial. O protótipo demonstrou potencial para transformar os processos de avaliação no setor de rochas ornamentais, embora pesquisas futuras devam ampliar a diversidade de amostras e refinar os algoritmos de análise.

REFERÊNCIAS

- ABIROCHAS—Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. Balanço Do Setor Brasileiro De Rochas Ornamentais E De Revestimento Em 2024. Available online https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2025/03/Informe-01_2025-Exportacoes-2024-1.pdf (accessed on 06 May 2025).
- BARBOSA, I., C.; SILVEIRA, L., L., L., da. Análise crítica dos principais métodos de tratamento superficial atualmente utilizado no setor de rochas ornamentais. *Geociências*, São Paulo, v. 40, n. 3, p. 811-821, 2021. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/14674/12197>. Acesso em: 07 Maio . 2025.
- BISSCHOFF, R., & GROBBELAAR, S. Evaluation of data-driven decision-making implementation in the mining industry. *The South African Journal of Industrial Engineering*, 33(3), 218–232.,2022. <https://doi.org/10.7166/33-3-2799>
- CALEGARI, S.S.; SOARES, C. C. V.; HARTWIG, M. E.; MEDEIROS JÚNIOR; E. B.; MARQUES, R.A.; PONTELLO, M. O Efeito do microfissuramento no desenvolvimento de patologias em rochas ornamentais: o exemplo dos granitos branco viena e branco itaúnas. *Anuário do Instituto de Geociências*, Rio de Janeiro, v. 42, n. 1 p. 514-524, 2019.
- BÄUMKER, E.; ZIMMERMANN, D.; SCHIERLE, S.; WOIAS, P. A Novel Approach to Obtain PAR with a Multi-Channel Spectral Microsensor, Suitable for Sensor Node Integration. *Sensors*, v. 21, n. 10, p. 3390, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s21103390>
- COMELLA, L. M.; BREGLER, F.; HAGER, E.; ANYS, M.; KLUEPPEL, J.; RUPITSCH, S. J.; WERNER, C.; WOIAS, P. Estimation of Leaf Area Index with a Multi-Channel Spectral Micro-Sensor for Wireless Sensing Networks. *Sensors*, v. 22, n. 13, p. 5048, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s22135048>.
- DVOŘÁK, R.; PAZDERA, L.; TOPOLÁŘ, L.; JAKUBKA, L.; PUCHÝŘ, J. Non-destructive testing of cipp defects using a machine learning approach. *MatTech*, v. 58, n. 5, p. 561–565, out. 2024. Disponível em: <https://mater-tehnol.si/index.php/MatTech/article/view/1000>.
- FRASCÁ, M.H.B.O. Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento. 282f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.
- GACEM, M.A.; ZAKARIA, A.S.; ISMAIL, M.H.; TARIQ, U.; YEHIA, S. Measurement of construction materials properties using Wi-Fi and convolutional neural networks. *IEEE Access* 2022, 10, 126100–126116.
- YEDRA, A., G.; ERRO, I.; VIVAS, J.; ZUBIRI, O.; ZURUTUZA, X.; SOMMERHUBER, R.; KETTNER, M. Acoustic Emission and Digital Image Correlation-Based Study for Early Damage Identification in Sandwich Structures. *Applied Sciences*, v. 14, n. 21, p. 9728, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app14219728>.
- HADDAD, C.; GEBRAN, J.; EL ZOGHBI, A. Application of non-destructive testing methods for assessing fracture resistance in dental ceramics: the sound harvesting test. *Frontiers in Dental Medicine*, v. 5, p. 1409150, jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fdmed.2024.1409150>.
- NITZE, I.; SCHULTHESS, U.; ASCHE, H. Comparison of machine learning algorithms random forest, artificial neural network and support vector machine to maximum likelihood for supervised crop type classification. In *Proceedings of the 4th International Conference on Geographic Object-Based Image Analysis—GEOBIA*, Rio de Janeiro, Brazil, 7–9 May 2012; Volume 79, p. 3540. Available online: <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18/2012/05.30.22.11/doc/index.html> (accessedo em 9 maio 2025).
- LI, L.; GUO, J.; WANG, Q.; WANG, J.; LIU, Y.; SHI, Y. Design and Experiment of a Portable Near-Infrared Spectroscopy Device for Convenient Prediction of Leaf Chlorophyll Content. *Sensors*, v. 23, n. 20, p. 8585, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23208585>. Acesso em: 10/05/2025.
- VIDAL, F.W.H.; AZEVEDO, H.C.A.; CASTRO, N.F. Tecnologia de Rochas Ornamentais: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento; Centro de Tecnologia Mineral, CETEM/MCTI: Rio de Janeiro, Brasil, 2014; 700p.