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

Uma abordagem para avaliação da circularidade em materiais de base mineral baseada em emergia e modelagem probabilística

Felipe Torquato Vieira[1]; Alexandre Zaccaron[2]; Jairo Zocche[2]; Fabiano Raupp-Pereira[1]
1. PPGCEM/UNESC; 2. PPGCA/UNESC; .

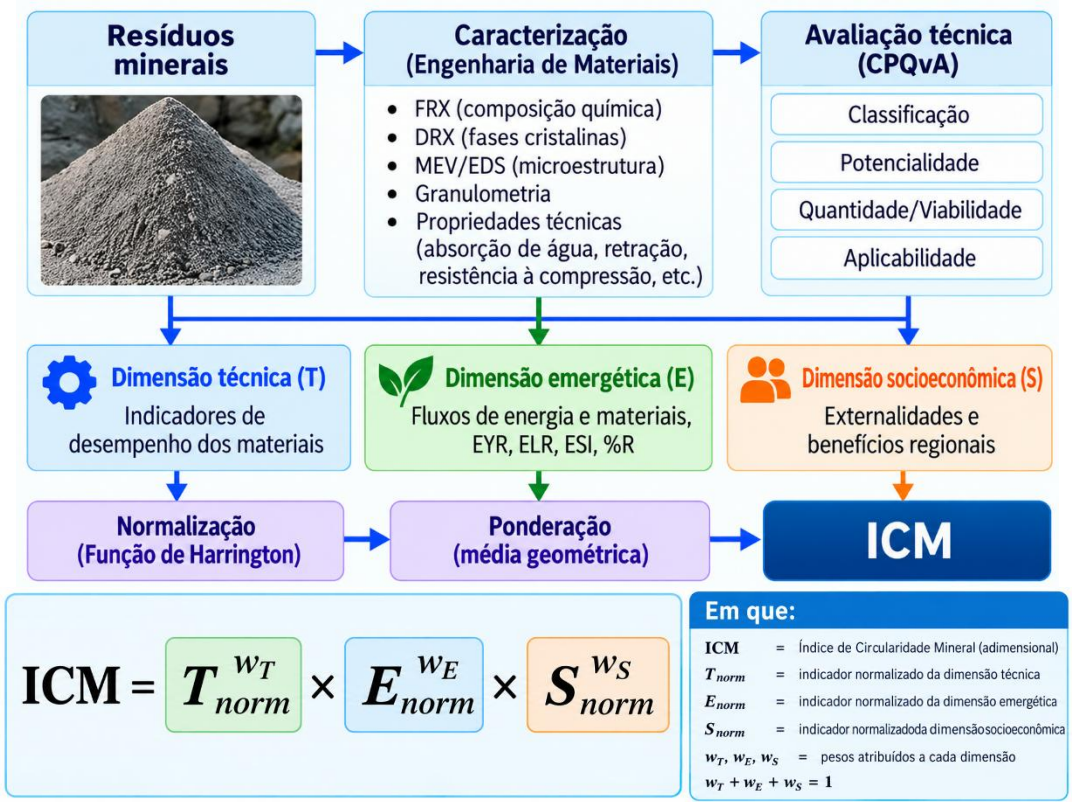
Introdução

- Resíduos minerais podem ser valorizados em sistemas produtivos, contribuindo para a economia circular e a redução da extração de matérias-primas.
- A avaliação da circularidade requer integrar desempenho técnico, uso de recursos da natureza e efeitos socioeconômicos.
- O percentual de resíduo, isoladamente, não caracteriza a circularidade nem a robustez da decisão.

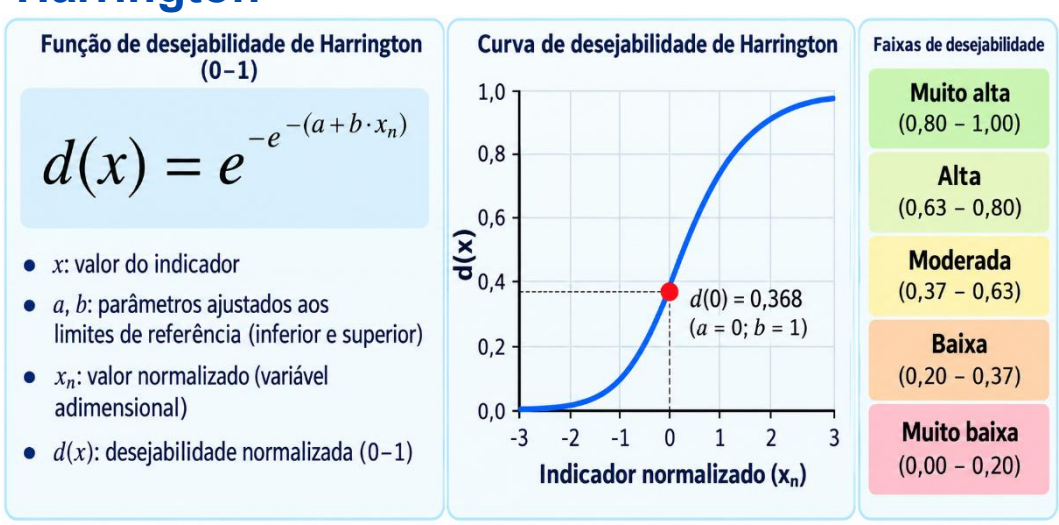
Objetivos

- Estruturar uma abordagem integrada para comparar alternativas de valorização de materiais de base mineral, combinando avaliação técnica, síntese emergética e critérios socioeconômicos.
- Incorporar a modelagem probabilística para representar incertezas e apoiar decisões.

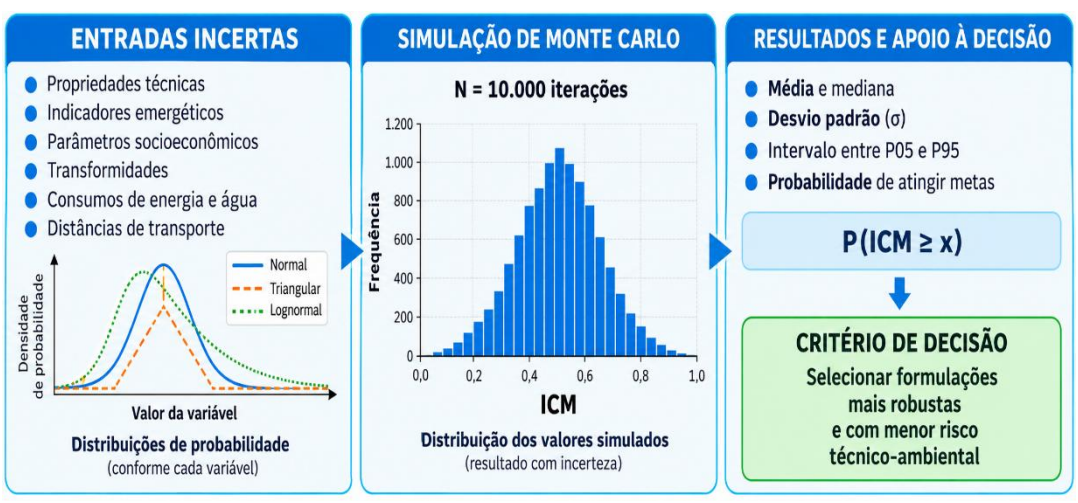
Metodologia



Normalização dos indicadores — função de Harrington



Modelagem probabilística — simulação de Monte Carlo



Resultados e Discussão

Resistência à compressão x ICM

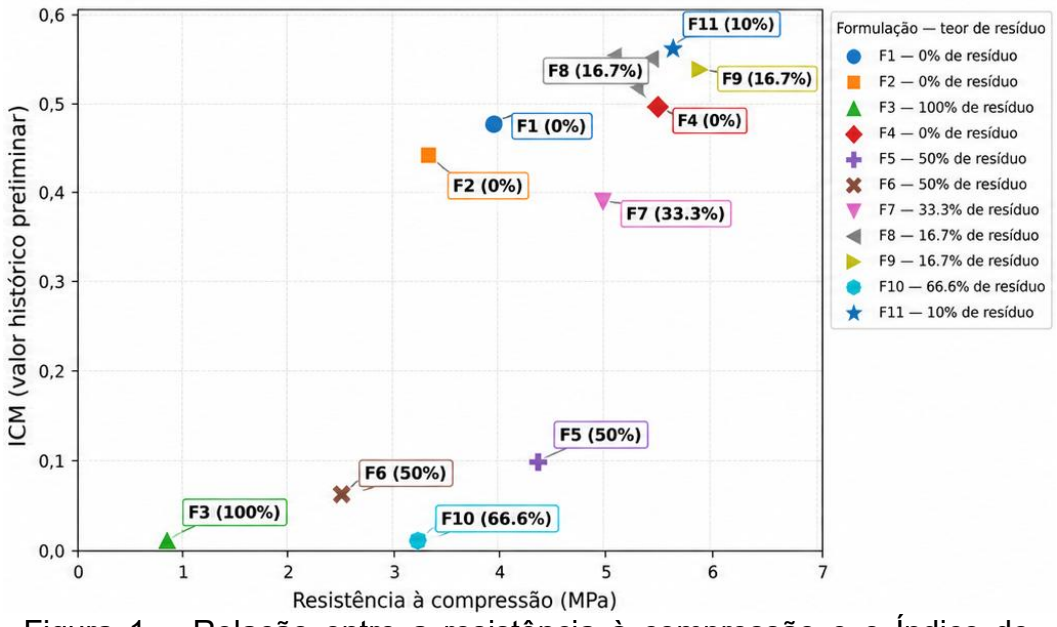


Figura 1 – Relação entre a resistência à compressão e o Índice de Circularidade Mineral (ICM) das formulações de cerâmica vermelha. Os pontos representam as formulações avaliadas (F1–F11), identificadas pelo percentual de resíduo.

Percentual de resíduo x ICM — matriz de decisão em relação as formulações

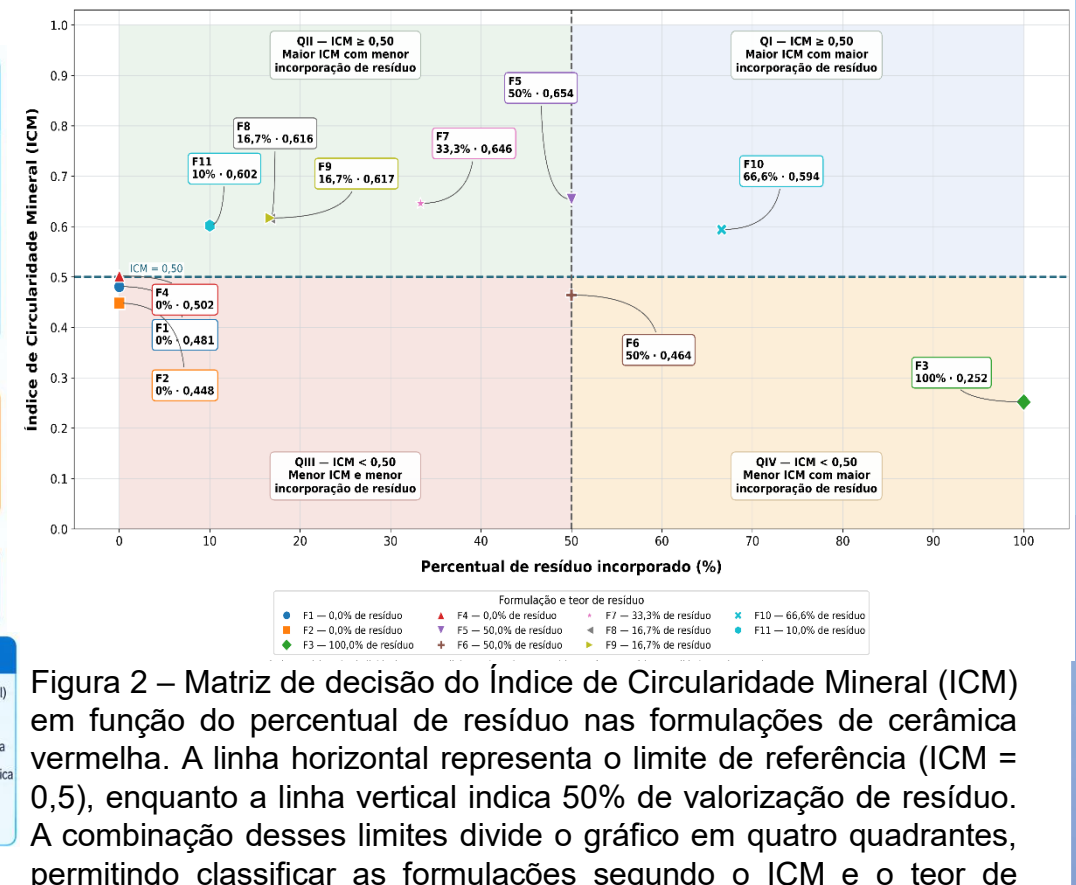


Figura 2 – Matriz de decisão do Índice de Circularidade Mineral (ICM) em função do percentual de resíduo nas formulações de cerâmica vermelha. A linha horizontal representa o limite de referência (ICM = 0,5), enquanto a linha vertical indica 50% de valorização de resíduo. A combinação desses limites divide o gráfico em quatro quadrantes, permitindo classificar as formulações segundo o ICM e o teor de resíduo, apoiando a comparação de seu desempenho relativo.

Conclusões

- O ICM busca integrar dimensões técnicas, biofísicas e socioeconômicas em uma estrutura de avaliação.
- A simulação de Monte Carlo permite propagar incertezas e estimar a robustez das decisões, desde que as distribuições e os parâmetros sejam definidos e documentados.
- A classificação quantitativa das formulações depende da validação dos dados de entrada, dos pesos e dos critérios de decisão.

Agradecimentos

CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CAPES
fapesc Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina

Referências

ODUM, H. T. **Environmental Accounting**: Emergy and Environmental Decision Making. New York: John Wiley & Sons, 1996.
HARRINGTON, E. C. The desirability function. **Industrial Quality Control**, v. 21, n. 10, p. 494–498, 1965.
RAUPP-PEREIRA, F. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentíceas**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2006.
REBELO, W. B. *et al.* Valorization of the Residual Fraction of Coal Tailings: A Mineral Circularity Strategy for the Clay Ceramic Industry in the Carboniferous Region of Santa Catarina, Southern Brazil. **Materials**, v. 17, n. 9, art. 2131, 2024.