CONCRETOS SEM-SLUMP COM REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO DESENVOLVIDOS VIA MÉTODOS DA COMPACTAÇÃO E SIMPLEX-LATTICE

No-slump concretes with iron ore tailings developed via compaction and simplex-lattice methods

Douglas Mol Resende
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | douglas.mr@aluno.ufop.edu.br

Liciane Alvernaz Pena
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | liciane.pena@aluno.ufop.edu.br

Ana Luiza Bailon Gomes
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | ana.bailon@aluno.ufop.edu.br

Livia Maria Silva
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | livia.ms@aluno.ufop.edu.br

Lucas Rhuan Prudente
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | lucas.prudente@aluno.ufop.edu.br

Ricardo André Fiorotti Peixoto
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | ricardofiorotti@ufop.edu.br

Resumo

Embora a mineração seja essencial para a sociedade, suas atividades geram impactos ambientais, sociais e econômicos expressivos. Portanto, iniciativas para mitigá-los são essenciais à sustentabilidade, segurança ambiental e à eficiência das operações minerárias. Há uma lacuna técnica no uso de rejeitos como agregados em concretos sem-slump. Nesse sentido, o presente projeto propõe uma metodologia inovadora com aplicação dos métodos de compactação de solos e simplex-lattice para desenvolver concretos sem-slump com rejeitos de mineração de ferro. O método de compactação mostrou-se eficiente para determinação da umidade ótima, relacionada ao teor de materiais finos no sistema. Traços com maior densidade de empacotamento apresentaram convergência com a faixa granulométrica de Andreasen ($0,21 < q < 0,37$) e menor intensidade de ligante para obtenção de 1 MPa de resistência. Os resultados confirmam a viabilidade técnica de concretos sem-slump com rejeitos da mineração, contribuindo para sustentabilidade e inovação no setor minerário e da construção civil.

Palavras-chave: Rejeito de minério de ferro; Concreto sem slump; Concreto seco; Simplex-lattice; Sustentabilidade.

ABSTRACT

Mining is crucial for society. However, it generates significant environmental, social, and economic impacts. Therefore, initiatives to mitigate these impacts are essential for sustainability, environmental safety, and operational efficiency in mining. There is a technical gap in the use of tailings as aggregates in non-plastic cementitious matrices. Thus, the present project proposes an innovative methodology, applying soil compaction methods and simplex-lattice techniques to develop slump-free concretes with iron ore mining tailings. The compaction method proved efficient in determining the optimal moisture, which is related to the fine material content in the system. Mixtures with higher packing density converged with the Andreasen particle size distribution ($0,21 < q < 0,37$) and required lower binder intensity to achieve 1 MPa of strength. This research demonstrates the feasibility of slump-free concretes made from mining tailings, promoting sustainability in both the mining and construction sectors.

Keywords: Iron ore tailing; No-slump concrete, Dry concrete; Simplex-lattice; Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A mineração é essencial para a economia global, fornecendo matérias-primas cruciais para diversos setores, como a construção civil. No entanto, a exploração mineral causa impactos ambientais e sociais significativos, como contaminação de água, desmatamento e danos às comunidades locais (Passos, Coelho, Dias, 2017). Além disso, a instabilidade de estruturas geotécnicas, como barragens de rejeitos, representa um risco ambiental e de segurança com sérias consequências, como demonstrado pelas tragédias em Brumadinho e Mariana (Nogueira *et al.,* 2024).

A construção civil responde por cerca de 20 a 50% do consumo de recursos naturais, 50% da produção de resíduos sólidos, 36% do consumo de energia e 37% das emissões de CO_2 globais (Resende *et al.,* 2024). Uma alternativa promissora é a reutilização de rejeitos da mineração em materiais de construção, o que não só reduz o impacto ambiental da mineração, mas também promove a economia circular. A viabilidade técnica da aplicação de rejeitos da mineração como agregados em matrizes cimentícias, pigmentos para tintas ou adição mineral é amplamente discutida na literatura (Magalhães *et al.,* 2020; Fontes *et al.,* 2019; Galvão *et al.,* 2018).

Apesar de estudos existentes sobre o uso de rejeitos em concretos *no-slump*, não há métodos consolidados para otimizar sua incorporação e garantir sua viabilidade técnica. Adicionalmente, nenhum estudo propôs a substituição total dos agregados convencionais por rejeitos de mineração em concretos sem slump. Neste contexto, o presente estudo propõe uma metodologia inovadora que combina os métodos de compactação de solos e simplex-lattice para desenvolver concretos sem slump com 100% de substituição dos agregados convencionais por rejeitos de mineração de ferro. A pesquisa busca avaliar a viabilidade técnica dessa abordagem e contribuir para a sustentabilidade na construção civil.

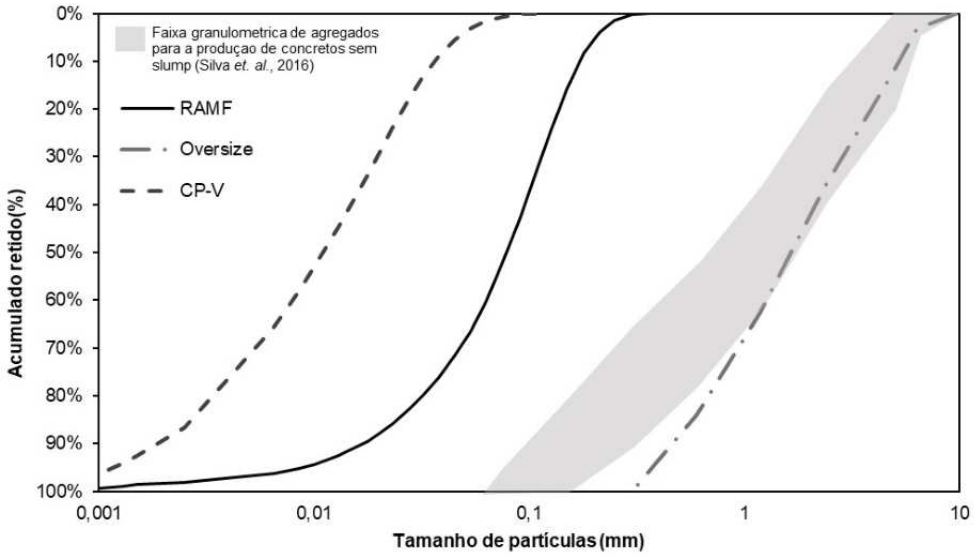
2 METODOLOGIA

2.1 MATERIAIS

Nesta pesquisa foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CP -V), usualmente adotado para a produção de elementos pré-moldados de concreto. Dois rejeitos de minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais foram usados como agregados: rejeito oversize (O) derivado da britagem primária do minério *run-of-mine* e rejeito arenoso de minério de ferro (RAMF), gerado após a fase de flotação.

O *oversize* foi beneficiado mecanicamente para remoção da fração magnética e obtenção de partículas entre 6,3 mm e 0,3 mm. A proporção entre as frações granulométricas do O para a produção das matrizes não plásticas teve como referência a mediana da faixa granulométrica dos agregados utilizados para a produção de pré-moldados proposta por Silva *et al.* (2016). A distribuição granulométrica dos materiais utilizados nesta pesquisa está apresentada na Figura 1 e as propriedades físicas e químicas dos agregados e do CP-V estão listadas na Tabela 1.

Figura 1: Distribuição granulométrica dos agregados e do cimento CP-V.



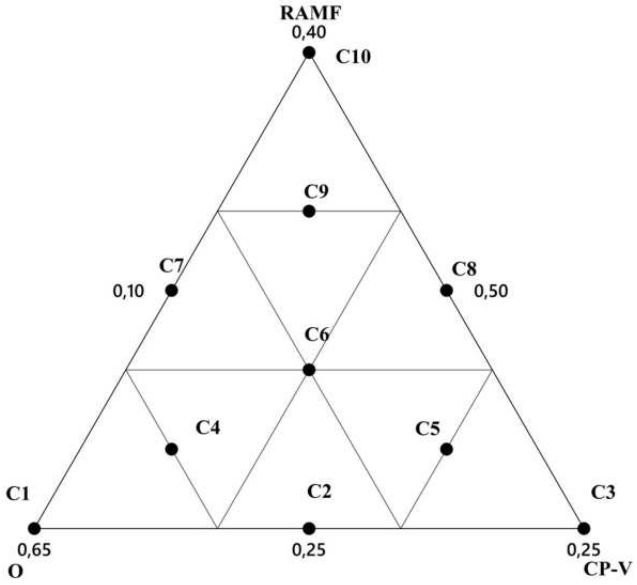
2.2 DESIGN DE EXPERIMENTO

Para otimização dos teores dos materiais sólidos, foi adotado método de planejamento de experimentos, especificamente o modelo simplex em rede, com 10 pontos experimentais. As proporções dos componentes das misturas foram definidas com base em dados da literatura, sendo RAMF entre 25% e 40% (Resende *et al.,* 2024), O entre 50% e 65% e CP-V entre 10% e 25% (Farooq *et al.,* 2023; Bahiense *et al*., 2021). A Figura 2 apresenta os pontos experimentais. As proporções de cada componente (% em massa) para os pontos experimentais são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1: Propriedades físicas e químicas dos agregados e do CP-V

	RAMF	Oversize	CP-V
Propriedades físicas			
Massa específica (g/cm³) (NM, 2009)	2.86	3.18	3.05
Massa unitária (g/cm³) (ABNT, 2021)	1.35	1.74	0.73
D_{90}	0,166 mm	5.0 mm	0,036 mm
D_{10}	0,016 mm	0.45 mm	0,00195 mm
Composição química (Fluorescência de Raios X)			
SiO_2	85.3%	41.2%	15.3%
Fe_2O_3	9.0%	52.5%	3.1%
Al_2O_3	4.1%	0.9%	4.8%
CaO	-	-	64.3%
SO_3			3.7%
Perda ao fogo (%)	1.0%	4.3%	6.7%
Outros (%)	0.7%	0.6%	2.1%

Figura 2: Pontos experimentais



Fonte: autoria própria

Tabela 2: Proporções dos componentes das misturas

	RAMF (%)	O (%)	CP-V (%)
C1	25	65	10
C2	25	57.5	17.5
C3	25	50	25
C4	27.5	60	12.5
C5	27.5	52.5	20
C6	30	55	15
C7	32.5	57.5	10
C8	32.5	50	17.5
C9	35	52.5	12.5
C10	40	50	10

A quantidade de água adequada para a moldagem dos corpos de prova, correspondente a umidade ótima, foi determinada por ensaios de compactação com aplicação das energias normal, intermediaria e modificada de Proctor.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS

No estado fresco a densidade de empacotamento para cada tipo de tratamento e energia de compactação foi avaliada, conforme Equação 1.

$$ensidade\ de\ empacotamento = \frac{Densidade\ aparente\ seca\ (\frac{g}{cm^3})}{Densidade\ teórica\ dos\ sólidos\ (\frac{g}{cm^3})} \quad \text{Equação 1}$$

Os corpos de prova foram submetidos à cura em câmara úmida (25 ± 2 ºC, 95% de umidade relativa), por 7 dias e posteriormente à tratamento em estufa (60 ºC, 24 horas) para remoção da água livre. Na sequência, aos 8 dias, foi realizado o ensaio de resistência à compressão (ABNT, 2018). Os resultados foram utilizados para determinação da intensidade de ligante dos tratamentos, através da Equação 2:

$$Intensidade\ de\ ligante = \frac{Consumo\ de\ cimento\ (\frac{kg}{m^3})}{Resistência\ à\ compressão\ (MPa)} \quad \text{Equação 2}$$

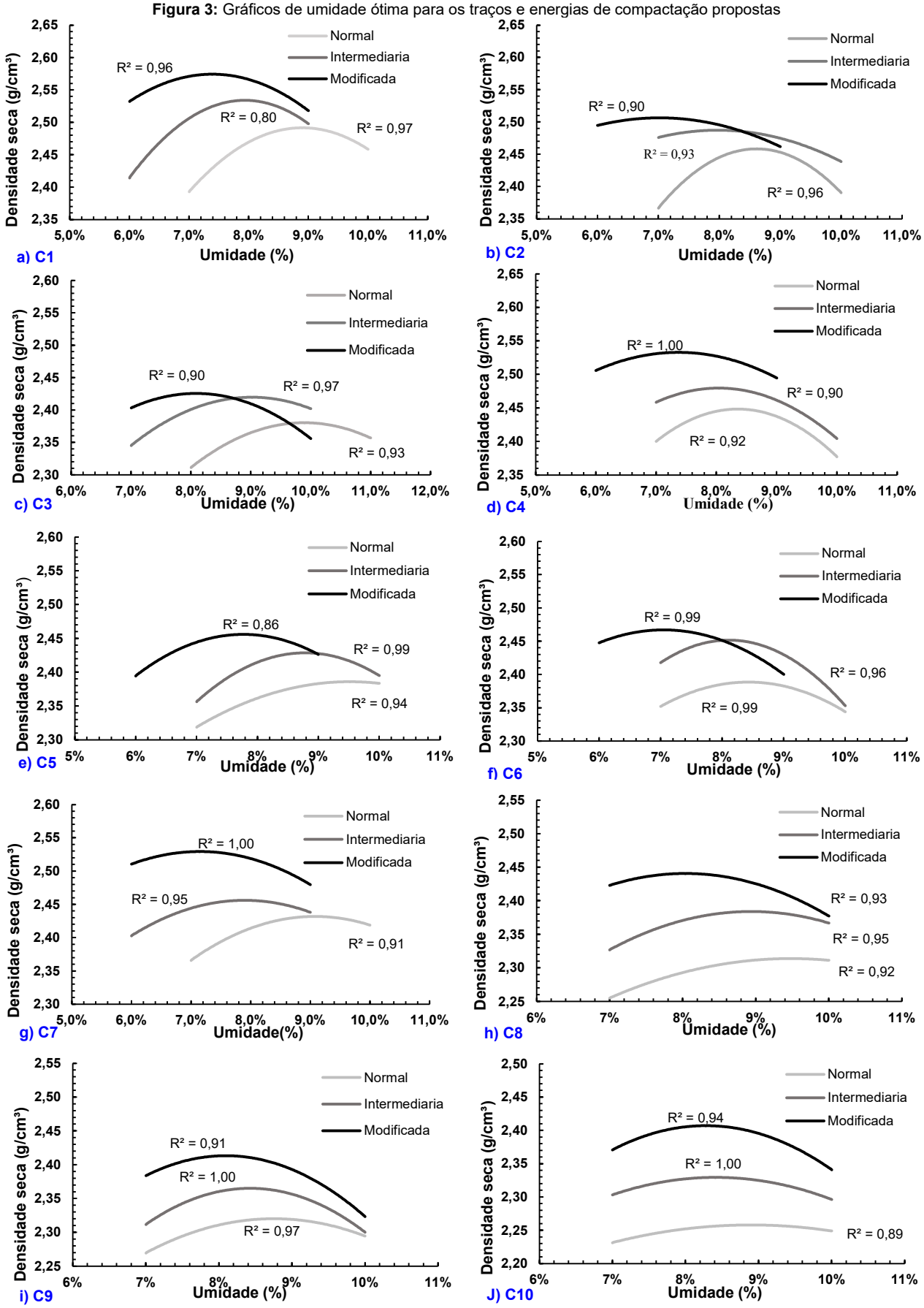
3 RESULTADOS

3.1 DENSIDADE SECA E UMIDADE ÓTIMA

A Figura 3 apresenta os resultados dos testes de compactação para todas as misturas desenvolvidas e energias de compactação aplicadas. A densidade seca inicialmente aumenta em função do aumento da umidade até atingir um pico

e então reduz. Um R² médio de 0,94, 0,95 e 0,94 foi alcançado para energias de compactação normal, intermediária e modificada, respectivamente, indicando uma forte correlação entre os dados experimentais e as equações de regressão derivadas.

Figura 3: Gráficos de umidade ótima para os traços e energias de compactação propostas

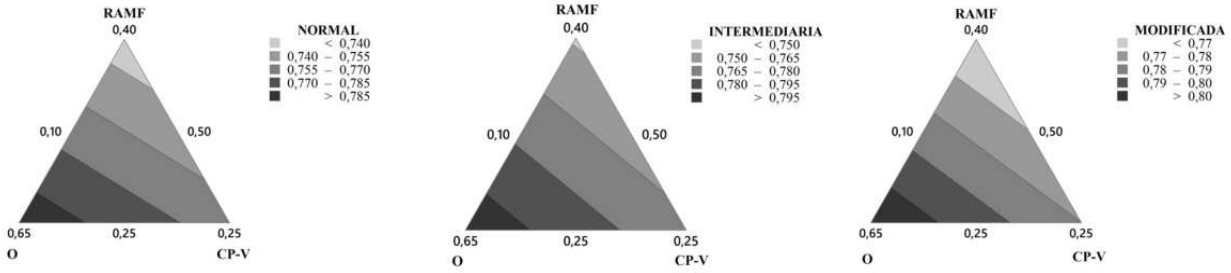


As misturas C3, C5, C8 e C10, que contêm o maior teor de materiais finos (RAMF + CP-V), exibiram os maiores valores de teor de umidade ótima em todas as energias de compactação aplicadas. A mistura C3, que tem o maior teor de CP-V, exibiu o maior teor de umidade ótimo para energias de compactação normal e intermediária e o segundo maior teor para energia modificada. Esses resultados demonstram que o teor de umidade ótima está intimamente relacionado à distribuição granulométrica e à área de superfície dos agregados, em concordância com os princípios geotécnicos (Das, 2015).

3.2 DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO

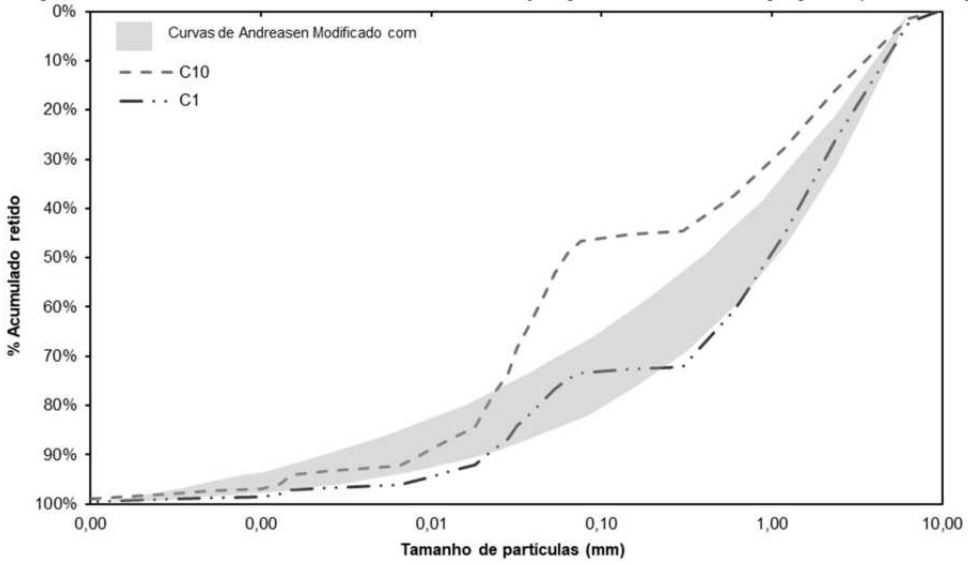
A Figura 4 apresenta as superfícies de resposta derivadas dos resultados de densidade de empacotamento. Uma tendência consistente foi observada nos três níveis de energia de compactação: a densidade de empacotamento aumentou com maior teor de Oversize e diminuiu com maior teor de RAMF. O concreto C1 (com o maior teor de Oversize e o menor teor de RAMF) atingiu a maior densidade de empacotamento em todas as energias de compactação. Em contraste, o tratamento C10 (com o maior teor de RAMF e menor teor de Oversize) exibiu a menor densidade de empacotamento para energias de compactação padrão e intermediária e a segunda menor para energia de compactação modificada.

Figura 4: Superfícies de resposta para densidade de empacotamento (g/cm³).



A Figura 5 apresenta a curva granulométrica dos agregados para os traços C1 e C10, comparada à área correspondente às curvas teóricas de Andreasen Modificado (9,5 mm < d < 0,0001 mm) com coeficientes de distribuição de 0,21 a 0,37, o intervalo adequado para atingir empacotamento de matrizes cimentícias (Bahiense *et al.,* 2021; Martins *et al.,* 2023). Quanto menor coeficiente de distribuição, maior é a proporção de partículas finas no sistema (Indhumathi *et al*., 2022). Consistente com os resultados de densidade de empacotamento, C1 demonstra convergência com a faixa de Andreasen, com melhor ajuste à curva com um coeficiente de distribuição de 0,35. Em contraste, o traço C10 apresenta um distanciamento da faixa granulométrica de Andreasen, principalmente devido ao teor de 40% de RAMF.

Figura 5: Faixa granulométrica de Andreasen Modificado e distribuição granulométrica dos agregados para os traços C1 e C10

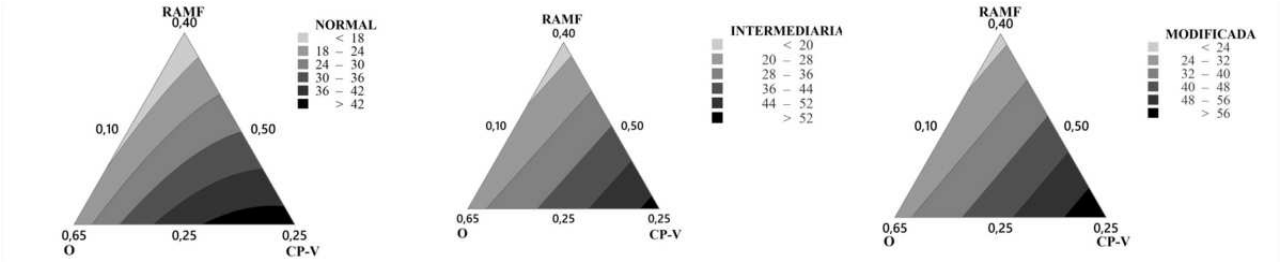


3.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E INTENSIDADE DE LIGANTE

A Figura 6 apresenta a superfície de resposta derivada dos resultados de resistência à compressão em 8 dias. Como esperado, a resistência à compressão é significativamente influenciada pelo teor de CP-V para todas as três energias de compactação. Altos teores de RAMF (próximos a 40%) reduzem significativamente o desempenho mecânico das matrizes. Esse comportamento está associado a dois fatores: o aumento do teor de partículas finas e relativamente uniformes no sistema, o que compromete a densidade de empacotamento (Martins et al., 2023), e o aumento da área

superficial total dos agregados, que consequentemente reduz a espessura da camada de pasta de cimento que os envolve (Almada *et al*., 2021).

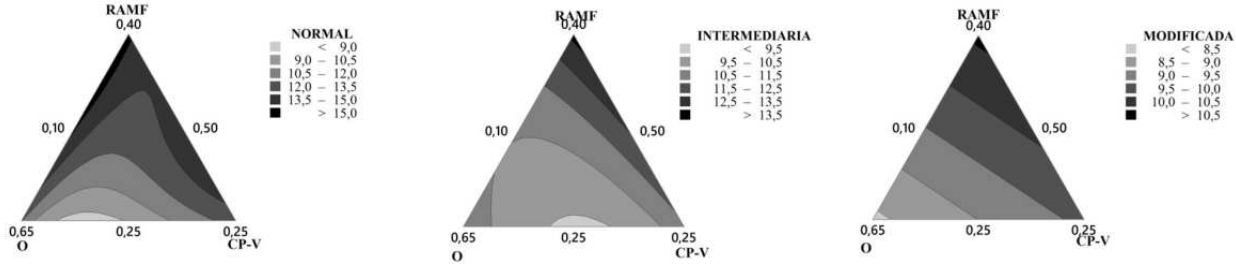
Figura 6: Superfícies de resposta para resistência à compressão (MPa) aos 8 dias e energias de compactação normal, intermediaria e modificada



O tratamento C6 (15% CP-V e 30% RAMF) apresentou resistências médias à compressão de 32,5 MPa (padrão), 34,7 MPa (intermediário) e 38,7 MPa (modificado). Esses resultados são comparáveis aos relatados por Saldanha et al. (2023), que produziram blocos de concreto intertravados com 20% RAMF (denominado no artigo “ore-sand”, 26% < 0,075 mm) e 14,4% CP-V, que atingiram uma resistência à compressão de 40,6 MPa aos 28 dias. Assim, apesar do maior teor de RAMF (com 47,5% < 0,075 mm), a mistura C6 apresentou resistência à compressão semelhante, o que sugere empacotamento eficiente.

Os resultados de intensidade de ligante são apresentados na Figura 7. Em média os traços apresentaram intensidade de ligante de 13,4 kg/m³. MPa, 11,3 kg/m³. MPa e 9,7 kg/m³. MPa para as energias de compactação normal, intermediaria e modificada, respectivamente. Essa tendência de redução da intensidade de ligante demonstra a eficácia do incremento da energia de compactação para obtenção do melhor desempenho mecânico dos tratamentos.

Figura 7: Superfícies de resposta para intensidade de ligante (kg/m³. MPa) e energias de compactação normal, intermediaria e modificada



Embora as superfícies de resposta apresentem uma relação complexa entre os componentes e os resultados obtidos, nota-se uma semelhança com as superfícies de respostas relativas aos resultados de densidade de empacotamento. Há uma tendência comum para redução da intensidade ligante na região com teores próximos a 65% de Oversize e próximos de 10% de CP-V. Por outro lado, os tratamentos com proporção próxima a 40% de RAMF apresentaram os maiores valores de intensidade de ligante.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou aplicar uma proposta inovadora, utilizando os métodos de compactação de solo e o protocolo experimental simplex-lattice, para o desenvolvimento de concretos sem-slump contendo rejeitos de minério de ferro. Com base nos resultados obtidos, foram estabelecidas as seguintes conclusões:

- O método de compactação de solos para determinação da umidade ótima dos traços de concreto mostrou-se eficiente, considerando a proximidade entre os dados experimentais e as curvas de regressão obtidas, com R^2 superior a 0,94 para as três energias de compactação. A umidade ótima das misturas está relacionada à distribuição granulométrica e à área de superfície dos agregados, sendo maior para misturas com maior teor de materiais finos.
- Os traços cuja distribuição granulométrica dos agregados se aproximou da faixa granulométrica de Andreasen Modificado (coeficiente de distribuição entre 0,21 e 0,37) apresentaram maior densidade de empacotamento. Esse resultado indica que a proporção entre os agregados pode ser otimizada com base nesse modelo teórico.
- A incorporação de partículas finas em proporções que desviam a distribuição granulométrica dos agregados da faixa granulométrica de Andreasen reduz significativamente o desempenho mecânico das matrizes. Esse efeito está associado ao menor empacotamento e ao aumento da área de superfície dos agregados no sistema.
- A intensidade de ligante dos traços propostos relaciona-se com à densidade de empacotamento. Misturas com maior empacotamento tendem a exigir menos cimento Portland por MPa de resistência.

Dessa forma, esta pesquisa contribui para a implementações de práticas sustentáveis nos setores minerário e construtivo.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

REFERÊNCIAS

ALMADA, Bruna Silva et al. Study of mechanical, durability and microstructural properties of cementitious composite with addition of different iron ore tailings from Brazil. **Journal of materials research and technology**, v. 18, p. 1947-1962, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16972**: - Agregados — Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739:** concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NM NBR. 53/2009** –Agregado graúdo-Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

DAS, Braja M.; SIVAKUGAN, Nagaratnam. **Fundamentals of geotechnical engineering**. Cengage Learning, 2017.

FONTES, Wanna C. et al. Hydraulic tiles produced with fine aggregates and pigments reclaimed from iron ore tailings. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 7, p. 151-165, 2021.

GALVÃO, José Lucas Barros et al. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. **Journal of Cleaner Production**, v. 200, p. 412-422, 2018.

INDHUMATHI, S.; KUMAR, S. Praveen; PICHUMANI, Moorthi. Reconnoitring principles and practice of Modified Andreasen and Andersen particle packing theory to augment Engineered cementitious composite. **Construction and Building Materials,** v. 353, p. 129106, 2022.

MARTINS, Ana Carolina Pereira et al. Use of steel slag and LAS-based modifying admixture in obtaining highly eco-efficient precast concrete products**. Journal of Building Engineering,** v. 66, p. 105884, 2023.

NOGUEIRA, Marcela Aguiar et al. Mitigating the socioeconomic impacts of the mining industry through Social Technologies: Guidelines for technology transfer between universities and communities. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, v. 31, n. 1, p. 54-68, 2024.

MAGALHAES, Luciano Fernandes et al. Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123260, 2020

FAROOQ, Muhammad Umer et al. Mechanical and durability performance of 100% recycled aggregate concrete pavers made by compression casting. **Journal of Building Engineering**, v. 73, p. 106729, 2023.

PASSOS, Flora Lopes; COELHO, Polyana; DIAS, Adelaide. (Des) territórios da mineração: planejamento territorial a partir do rompimento em Mariana, MG. **Cadernos Metrópole**, v. 19, p. 269-297, 2017

RESENDE, Douglas Mol et al. Sustainable structural lightweight concrete with recycled polyethylene terephthalate waste aggregate. **Buildings,** v. 14, n. 3, p. 609, 2024.

SALDANHA, Rodrigo Beck et al. Performance of ore sand as aggregate for interlocking blocks. **Applied Sciences**, v. 14, n. 1, p. 48, 2023.

DA SILVA, M. J. et al. Feasibility Study of Steel Slag Aggregates in Precast Concrete Pavers. **ACI Materials Journal,** v. 113, n. 4, 2016.

BAHIENSE, Alexandre Vianna et al. Dosage of interlocking paving with ornamental rock waste: An experimental design approach, particle packing and polluting potential. **Case studies in construction materials,** v. 15, p. e00596, 2021