CONCRETO COMPACTADO ROLADO PRODUZIDO INTEIRAMENTE COM REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO

Roller compacted concrete produced entirely with iron ore tailings

Liciane Alvernaz Pena
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | liciane.pena1@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

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

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

Resumo

Dois terços das rodovias pavimentadas no Brasil apresentam condições péssimas de conservação, gerando aumento dos custos, tempo de transporte e comprometimento à segurança e conforto dos usuários. Diante disso, técnicas sustentáveis para pavimentação têm sido amplamente debatidas. Esse estudo avaliou o desempenho mecânico de concretos compactados rolados (CCR) com substituição de agregados convencionais por rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Os rejeitos foram analisados quanto às suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. Em seguida, os concretos foram avaliados quanto à trabalhabilidade no estado fresco (consistômetro de Vebe) e quanto às suas propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido. As matrizes com rejeitos de minério de ferro apresentaram desempenho mecânico similar ou superior ao tratamento de referência, o que sugere a viabilidade técnica para seu uso. O reaproveitamento desses rejeitos como matéria-prima para infraestrutura rodoviária representa uma alternativa sustentável com potencial para mitigar impactos ambientais e promover a economia circular no setor da construção.

Palavras-chave: Rejeito de minério de ferro, Mineração, Concreto compactado com rolo, Matrizes não plásticas, Aproveitamento de resíduos e agregados.

ABSTRACT

Two-thirds of paved highways in Brazil are in poor condition, leading to increased costs and transportation time and compromising user safety and comfort. Given this, sustainable paving techniques have been widely debated. This study evaluated the mechanical performance of rolled compacted concrete (RCC) with conventional aggregates replaced by iron ore tailings from the Iron Quadrangle, Minas Gerais. The tailings were analyzed for their physical, chemical, and mineralogical properties. Then, the concretes were evaluated for workability in the fresh state (Vebe consistometer) and their physical and mechanical properties in the hardened state. The matrices with iron ore tailings showed mechanical performance similar to or superior to the reference treatment, which suggests the technical feasibility of their use. Reusing these tailings as raw material for road infrastructure represents a sustainable alternative with the potential to mitigate environmental impacts and promote the circular economy in the construction sector.

Keywords: Iron ore tailings, Mining, Roller compacted concrete, Recycling

1 INTRODUÇÃO

O setor mineral brasileiro é fundamental para a economia, representando de 2,5% a 4% do PIB entre 2000 e 2019 (Leão; Rabelo, 2023), com destaque para as vastas reservas de minério de ferro, que correspondem a 19,8% das reservas globais (Jesus, Joaquim, 2018). No entanto, a atividade gera impactos econômicos, ambientais e sociais significativos.

Por sua vez, a construção civil responde por 60% do consumo de todo recurso natural extraído da litosfera (Bribián; Capilla; Usón, 2011). Nesse sentido, para mitigar os impactos dos setores minerário e construtivo, estudos têm explorado o reaproveitamento de rejeitos sólidos da mineração, na construção civil como por exemplo para elementos de infraestrutura rodoviária (Bastos *et al.,* 2016; Sant'ana Filho *et al.,* 2017; Resende *et al.,* 2023).

O uso destes materiais em estruturas rodoviárias representa um elevado consumo de rejeitos. Acrescenta-se a isso o fato de que, no Brasil, apenas 12% das vias rodoviárias são pavimentadas, com uma média de 25 km de rodovias a cada 1000 km², contrastando com países como China e EUA, que possuem aproximadamente 400 km de rodovias por 1000 km² (CNT, 2019). Nesse contexto, este trabalho objetivou produzir um concreto compactado rolado (CCR), tecnicamente adequado para aplicação em pavimentos rígidos, com substituição integral de agregados naturais por rejeitos provenientes da mineração de ferro no quadrilátero ferrífero. Acrescenta-se a isso, como inovação do presente trabalho, a adoção da metodologia de Andreassen Modificado para proporcionamento dos agregados para produção dos CCRs com rejeitos de minério de ferro.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Os concretos compactados rolados foram produzidos com cimento Portland CP-IV, cuja escolha justifica-se por sua menor liberação de calor de hidratação, comparativamente a outros cimentos, reduzindo o risco de fissuras térmicas e permitindo maior tempo de compactação do CCR em campo (Aghaeipour; Madhkhan, 2020a; Shao; Wu; Li, 2022). O traço de referência foi desenvolvido com brita de gnaisse (Ag. Graúdo REF) e areia de rio (Ag. miúdo REF). Os concretos com rejeitos de mineração foram produzidos com rejeitos da moagem primária, oversize, e da flotação, rejeito arenoso de minério de ferro (RAMF), fornecidos por uma mineradora do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

O rejeito oversize foi inicialmente submetido à remoção de partículas magnéticas por um rolo magnético Inbras de 1500 Gauss. Em seguida, passou por beneficiamento mecânico, incluindo britagem em britador de mandíbulas e peneiramento gravimétrico. Como resultado, obteve-se uma fração com grãos retidos nas peneiras de 2,4 mm, 1,2 mm, 0,60 mm e 0,30 mm, distribuídos proporcionalmente. Essa fração foi denominada oversize beneficiado. Já a fração submetida apenas à separação magnética foi mantida como oversize. A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas dos agregados. A distribuição granulométrica é apresentada na Figura 1.

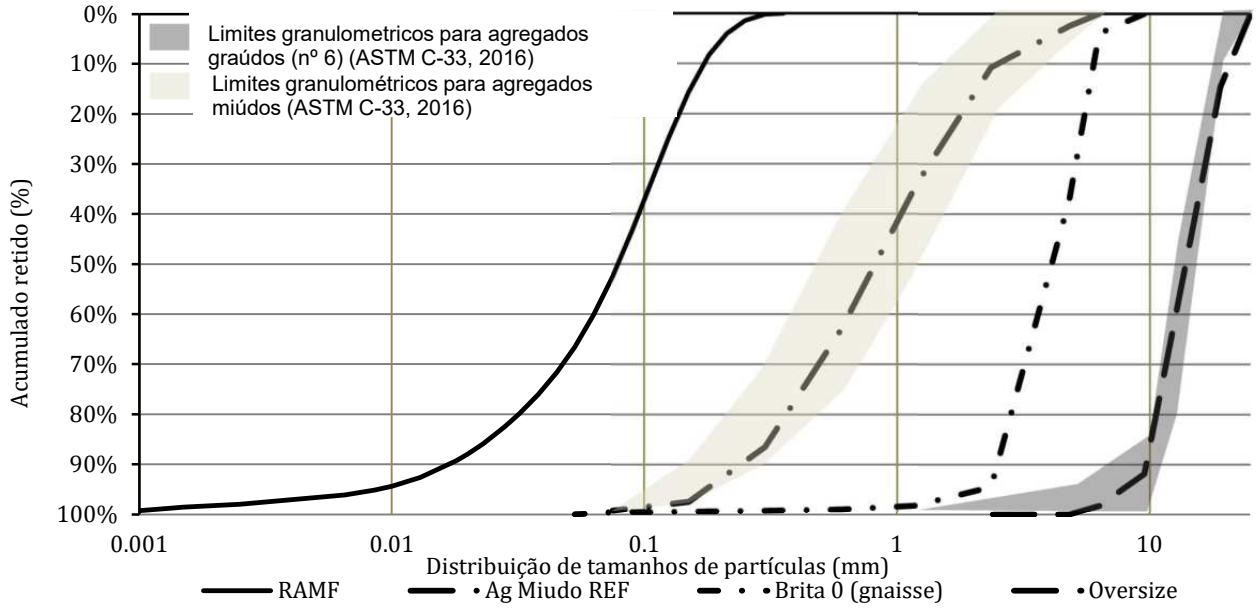
Tabela 1: Características físicas dos agregados

Item	RAMF	Oversize	Ag. miúdo REF	Ag. graúdo REF
Massa específica (g/cm³)	2.86	3.18	2.65	2.64
Massa unitária (g/cm³)	1.35	1.74	1.52	1.45
D_{90} (mm)	0.166	5.0	2.36	19
D_{10} (mm)	0.016	0.45	0.3	9.5

2.2 DOSAGEM DO CONCRETO COMPACTADO ROLADO

Foi adotado um consumo de 200 kg/m³ de CP-IV para os CCRs. A proporção dos agregados para o traço de referência seguiu a mediana da faixa granulométrica de agregados para concretos compactados rolados, conforme diretrizes técnicas apresentadas por Harrington *et al.* (2010), indicada na Figura 2.

Figura 1: Distribuição granulométrica dos agregados de referência e rejeitos da mineração de ferro



Os traços com rejeito de minério de ferro foram produzidos com: rejeito arenoso (<0,300 mm), rejeito oversize (4,75 mm a 19 mm) e rejeito oversize beneficiado (0,300 mm a 2,36 mm). A proporção entre essas frações granulométricas foi determinada por meio da metodologia de Andreassen Modificado, conforme Equação 1.

$$CPFT\ (\%) = 100 \times \left(\frac{D_P^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q}\right) \quad (1)$$

Onde: CPFT (%) = Percentual acumulado de partículas com diâmetro inferior à D_P em volume
D_p = Diâmetro das partículas
D_s = Diâmetro da menor partícula no sistema
D_l = Diâmetro da maior partícula no sistema
q = Coeficiente de distribuição

Convencionalmente são adotados coeficientes de distribuição entre 0,22 e 0,37 (MARTINS *et al.*, 2023). No entanto, observou-se que as curvas que mais se aproximaram dos parâmetros estabelecidos pela faixa de Harrington *et al*. (2010) para agregados apresentaram coeficientes entre 0,30 e 0,45, conforme Figura 2. Assim, foram adotados os coeficientes 0,30, 0,40 e 0,45 para a produção de três concretos compactados rolados com rejeitos da mineração de ferro. A Tabela 2 apresenta a proporção dos agregados para cada dosagem proposta.

Figura 2: Curvas de agregados para os traços com coeficiente de Andreassen 0.30, 0.40 e 0.45

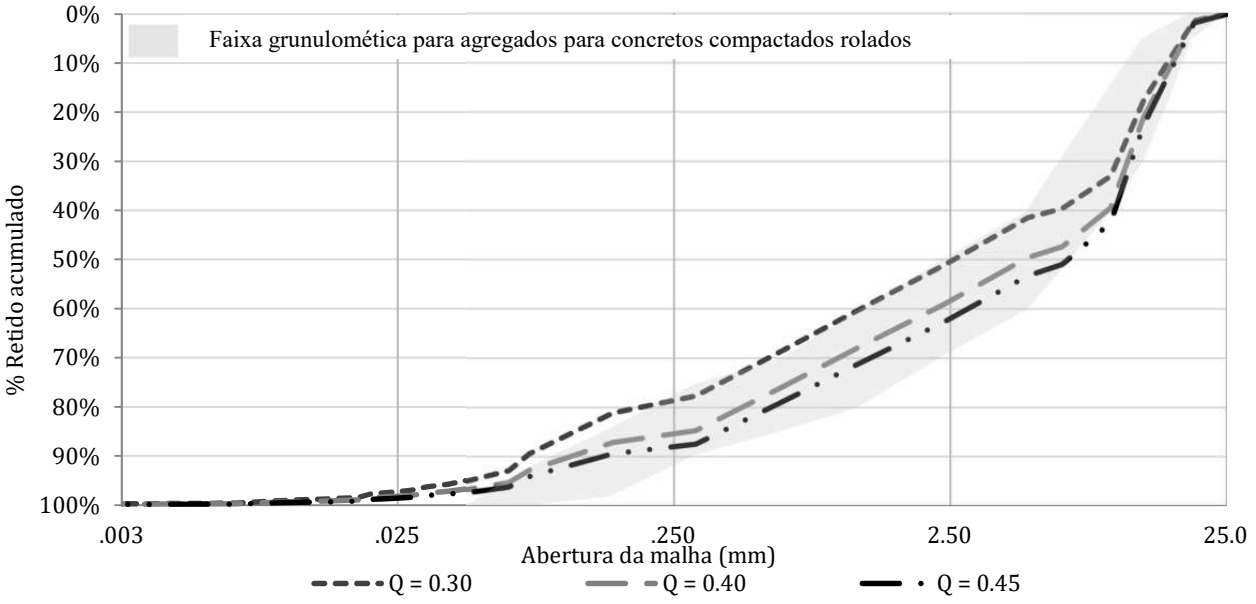


Tabela 2: Proporção dos agregados

Agregados	q (%)			
	REF	200 – A30	C200 – A40	C200 – A45
Areia de rio	50	-	-	-
Brita de gnaisse	50	-	-	-
RAMF	-	21.4	14.1	11.3
Oversize	-	43.5	52.0	55.9
Oversize Beneficiado	-	35.1	33.9	32.8

A quantidade de água adequada para a moldagem dos corpos de prova, correspondente a umidade ótima, foi determinada por ensaios de compactação, com uso de soquete de 2,5 kg para aplicação da energia de compactação normal de Proctor e moldagem de corpos de prova 10 x 20 cm.

2.3 DOSAGEM E CARACTERIZAÇÃO

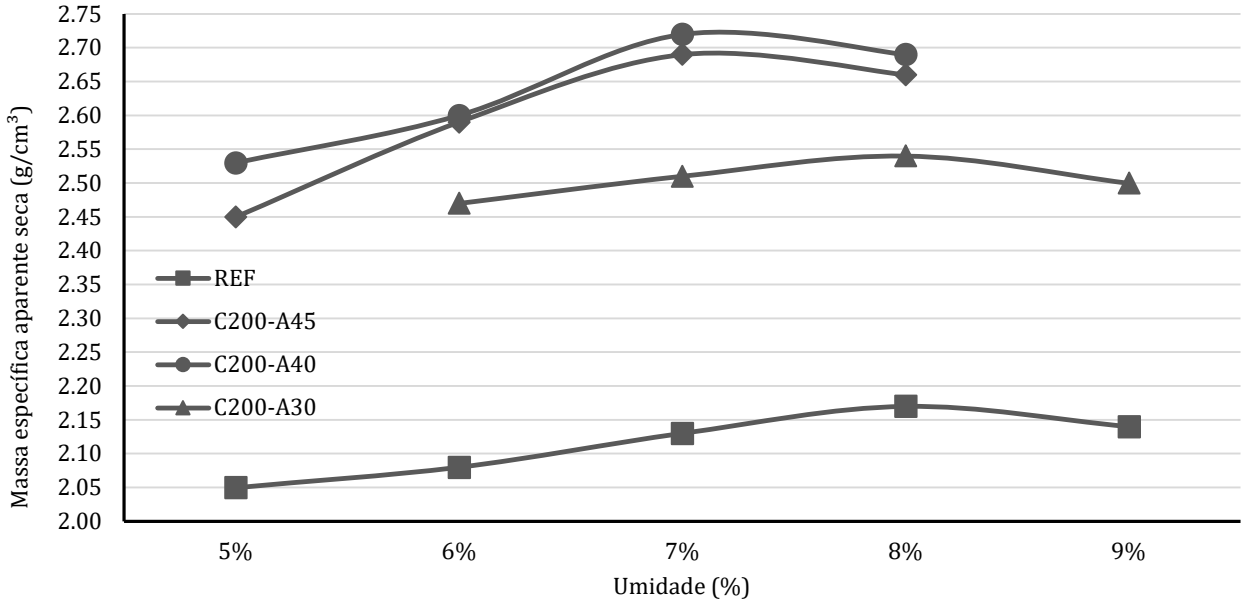
No estado fresco, a trabalhabilidade e a massa unitária aparente foram obtidas pelo ensaio da mesa vibratória de VeBe (ABNT, 2015). Os CCRs foram avaliados aos 28 dias por resistência à compressão (ABNT, 2018), tração por compressão diametral (ABNT, 2011), massa específica, índice de vazios, absorção de água (ABNT, 2005) e módulo de elasticidade dinâmico (ABNT, 2019).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 DOSAGEM

A Figura 3 apresenta os resultados do ensaio de compactação para determinação da umidade ótima nos traços REF, C200-A30, C200-A40 e C200-A45. Os traços C200-REF e C200-A30 registraram 8% de umidade ótima, enquanto C200-A40 e C200-A45, nos quais a proporção de RAMF foi significativamente inferior ao tratamento C200-A30, apresentaram 7% de umidade ótima. Esses resultados corroboram os dados de Toffollo *et al.* (2021) e Ferreira *et al.* (2022), sugerindo que esse parâmetro está relacionado à proporção de materiais finos e à área de superfície desses materiais nos tratamentos.

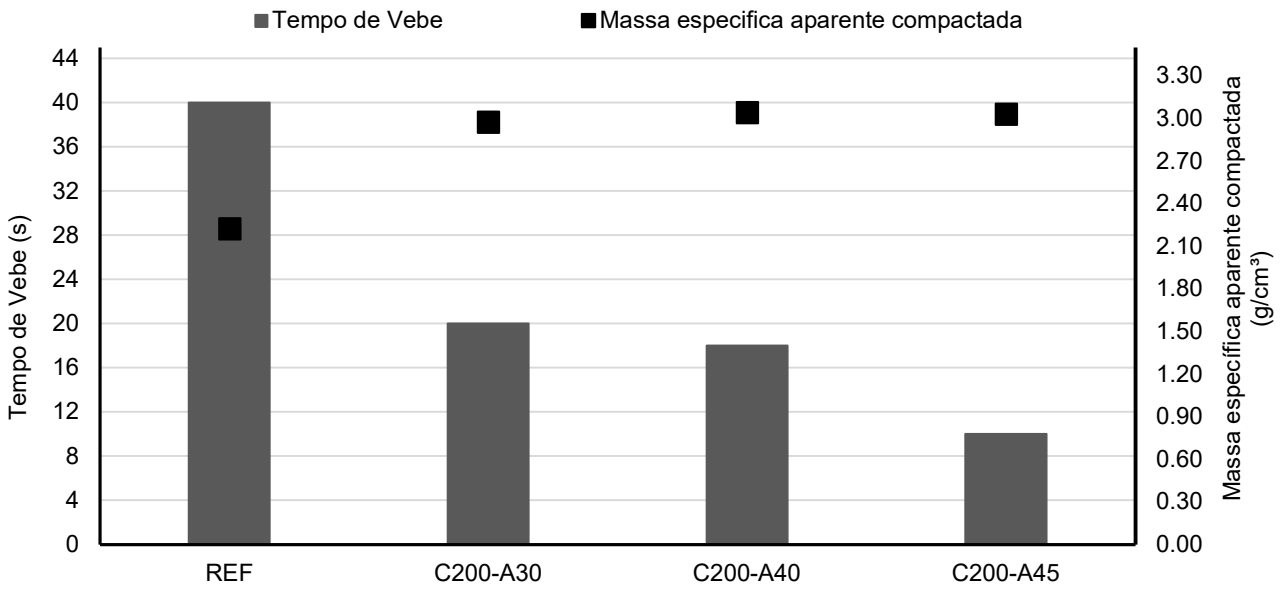
Figura 3: Resultado da umidade ótima dos concretos



3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CCRS NO ESTADO FRESCO

A Figura 4 apresenta os resultados de massa específica aparente e tempo de Vebe (trabalhabilidade) para os CCRs avaliados. Observa-se que os tratamentos com rejeito de minério de ferro apresentaram maior massa específica aparente no estado fresco, comparativamente ao tratamento REF, o que se atribui à composição química do oversize, que apresenta predominância de óxido de ferro III.

Figura 4: Massa específica aparente e tempos de Vebe dos CCRs

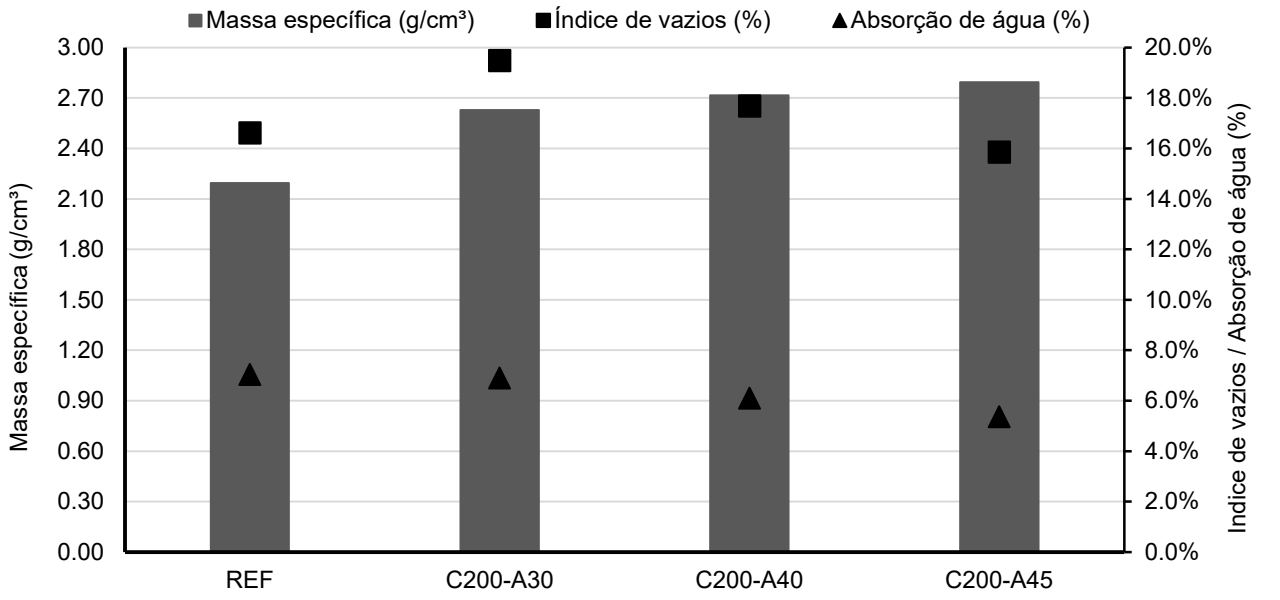


O tempo de Vebe para o traço C200-REF (40s) indicou menor trabalhabilidade comparativamente aos traços C200-A30, C200-A40 e C200-A45, que apresentaram tempos de 20s, 18s e 10s, respectivamente. Este resultado pode estar relacionado ao menor teor de finos na matriz de referência que, consequentemente influencia o envolvimento dos agregados graúdos pela fração argamassa. Conforme o procedimento do ensaio FURNAS 01.006.01 (Traboussi,2007), os valores obtidos para os traços C200-A30 e C200-A40 estão dentro da faixa adequada para concretos compactados rolados, entre 17 s e 21 s.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CCRS NO ESTADO ENDURECIDO

Os compósitos com rejeito de minério de ferro obtiveram resultados superiores para massa específica no estado endurecido, devido a constituição do rejeito com óxido de ferro III, como pode ser observado na Figura 5. A matriz C200-A45 apresentou massa específica aproximadamente 25% superior ao tratamento de referência, em função da maior proporção do rejeito oversize, com predominância de óxido de ferro. Ademais, os resultados de índice de vazios e absorção de água indicam que essa matriz apresentou um empacotamento mais eficiente em comparação aos demais tratamentos. Dessa forma, os dados sugerem que o coeficiente de distribuição 0,45 é o mais adequado para a produção de concretos compactados rolados.

Figura 5: Resultados de massa específica, índice de vazios e absorção de água dos concretos no estado endurecido

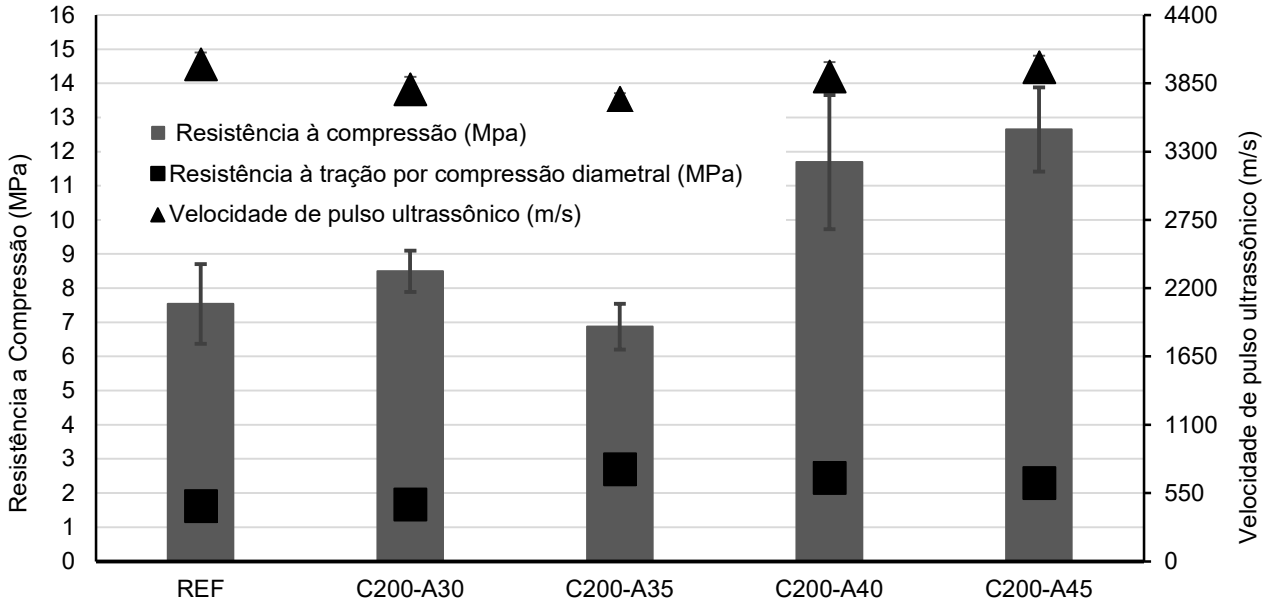


O concreto C200-A30 (19,5%) apresentou índice de vazios superior aos demais, o que pode estar relacionado ao teor de rejeito arenoso na matriz que demandou mais água para compactação adequada, e, no estado endurecido, formação de vazios em função de água além da suficiente para hidratação das partículas de cimento Portland.

A Figura 6 apresenta os resultados de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e velocidade de pulso ultrassônico aos 28 dias. Conforme Borré *et al.* (2017), que estudou o uso de CCRs para base de pavimentos, as matrizes com consumo de cimento de 150 kg/m³ apresentaram resistência à compressão em 28 dias com valores médios de 11,7 MPa, 12,8 MPa e 16,3 MPa, relativamente aos tratamentos adotados. Os resultados obtidos neste estudo, com consumo de cimento semelhante, conforme a figura 5, C200-A40 (11,70 MPa) e C200-A45 (12,7 MPa), convergem com os obtidos por Borré *et al.* (2017).

Os traços 0,40 e 0,45 apresentaram resistência à compressão superior em relação ao traço de referência, com ganhos aproximados de 54% e 67%, respectivamente. Essa diferença pode ser atribuída ao maior empacotamento deste tratamento, evidenciado pelos menores valores de índice de vazios e absorção de água, e, consequentemente, maior desempenho mecânico. Além disso, a maior prevalência de partículas oversize nessas matrizes, com concentração de óxidos de ferro III em torno de 50%, pode ter contribuído para o aumento da resistência à compressão axial.

Figura 6: Resultados de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e velocidade de pulso ultrassônico dos concretos produzidos



Os valores de resistência à tração por compressão diametral (Figura 6) dos traços foram semelhantes aos encontrados por Borré *et al.* (2017) aos 28 dias, os resultados variaram entre 1,3 MPa e 2,3 MPa, com destaque para os tratamentos C200-A40 (2,5 MPa) e C200-A45 (2,3 MPa). Os traços C200-A40 e C200-A45, em comparação ao traço REF, apresentaram ganhos de 56% e 44%, respectivamente. Logo, indica-se que pode estar relacionado com a qualidade das dosagens, características dos agregados, conforme Mehta e Monteiro (2008) e, além do melhor empacotamento das partículas, o que resulta em menores índices de vazios e de absorção de água, conforme apresentado na Figura 5.

Quanto à velocidade de pulso ultrassônico (Figura 6), observou-se que os traços C200-REF (4006 m/s), C200-A40 (3908,5 m/s) e C200-A45 (3982,0 m/s) apresentaram uma matriz contínua, enquanto o traço C200-A30 (3805,5 m/s) apresentou menor desempenho. Isso pode ser relacionado às características do concreto endurecido, como massa específica, índice de vazios e absorção de água. A composição do traço C200-A30, que continha maior quantidade de rejeito arenoso, resultou em maior área superficial e, consequentemente, maior necessidade de argamassa para um bom empacotamento dos grãos. Isso fez com que essas matrizes se tornassem mais porosas. Apesar disso, as matrizes foram classificadas como "boas" (3600 a 4500 m/s) de acordo com a classificação para concretos convencionais (Feldman,1977).

4 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro como substitutos de agregados convencionais em CCRs para infraestrutura rodoviária, com adoção da metodologia de Andreassen Modificado para dosagem dos agregados. As seguintes conclusões foram obtidas:

- A metodologia de Andreassen Modificado provou ser adequada, uma vez que os CCRs com rejeitos de minério de ferro apresentaram maior empacotamento, evidenciado pela redução do índice de vazios e absorção de água, e melhor desempenho mecânico, comparativamente ao tratamento com agregados convencionais.
- O tratamento com coeficiente de distribuição 0.45 foi o que apresentou melhores resultados físicos de índice de vazios e absorção de água e mecânicos de resistência à compressão e à tração por compressão diametral. Isso sugere que este coeficiente é o mais adequado para o dimensionamento de agregados com vistas a produção de concretos compactados rolados.

Resíduos da mineração têm potencial para uso como agregados em concreto compactado com rolados, promovendo sustentabilidade e economia circular. Esse reaproveitamento reduz impactos ambientais e alinha-se aos objetivos da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.

5 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

AGHAEIPOUR, A.; MADHKHAN, M. Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavement (RCCP) – a review. **Road Materials and Pavement Design**, v. 21, n. 7, p. 1775–1798, 2 out. 2020[a].

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 9778:2005** - Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 7222:2011** - Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 16312-3:2015** - Concreto compactado com rolo - Parte 3: Ensaios de laboratório em concreto fresco. Rio de Janeiro, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 5739:2018** - Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 8802:2019** - Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

BASTOS, L. A. de C.; SILVA, G. C.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F**.** *Using iron ore tailings from tailing dams as road material*. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 10, p. 04016102, out. 2016

BORRÉ, Gracieli. Estudo de resistência mecânica do concreto compactado com rolo com emprego de material fresado asfáltico para base de pavimentos. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, 2017.

BRIBIÁN, I.; CAPILLA, A.; USÓN, A. Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, v. 46, n. 5, 2011.

CNT. Rodovias Esquecidas do Brasil. Brasília: Confederação Nacional do Transporte. 2019.

FELDMAN, R. F. Non-Destructive Testing of Concrete. Ottawa, ON, Canadá: National Research Council of Canada, Division of Building Research, maio 1977. NRC-IRC-3351. DOI: 10.4224/40000715

FERREIRA, Elaine Cristina Fidalgo *et al.* Análise do desempenho do traço de concreto compactado com rolo (CCR), aplicado no sistema bus rapid transit (BRT) de Belém-PA, estudo de caso Performance analysis of roller compressed concrete (CCR), applied in the bus rapid transit (BRT) system of Belém-PA, case study. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 6, p. 47244-47265, 2022.

HARRINGTON, Dale; ABDO, Fares; ADASKA, Wayne; HAZAREE, Channarayapatna V.; CEYLAN, Halil. Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements. Ames: Iowa State University, National Concrete Pavement Technology Center, 2010. Disponível em: https://www.intrans.iastate.edu/wp-content/uploads/2020/04/Roller-Compacted-Concrete.pdf. Acesso em: 7 jul. 2025.

JESUS, Carlos Antônio Gonçalves de; JOAQUIM, Leandro Galinari. *Sumário Mineral Brasileiro 2018*. Brasília: Agência Nacional de Mineração, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2018/ferro_sm_2018. Acesso em: 21 mai. 2025.

LEÃO, R.; RABELO, R. A extensão da cadeia produtiva da economia mineral no PIB brasileiro. Texto para Discussão n. 2950. Brasília, DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), dez. 2023. 88 p. DOI: 10.38116/td2950-port..

Martins A.C.P., Franco de Carvalho J.M., Duarte M. do N., Pedroti L.G., Ribeiro J.C.L., Peixoto R.A.F., Use of steel slag and LAS-based modifying admixture in obtaining highly eco-efficient precast concrete products, **Journal of Building Engineering** 66 (2023). https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105884

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. IBRACON: São Paulo; 2008.

RESENDE, D. M. *et al*. Technical assessment of the use of iron ore sandy tailings as fine aggregate for interlocking paving blocks. In: **Proceedings of 19th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies**, João Pessoa, PB, Brasil, 12 dez. 2023. João Pessoa: Even3, 2023. ISBN 978-65-272-0081-9.

Sant'ana Filho, Joaquim *et al*. Technical and Environmental Feasibility of Interlocking Concrete Pavers with Iron Ore Tailings from Tailings Dams. **Journal of Materials in Civil Engineering**. V. 29, 9. 2017.https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001937

SHAO, R.; WU, C.; LI, J. A comprehensive review on dry concrete: Application, raw material, preparation, mechanical, smart and durability performance. **Journal of Building Engineering**, v. 55, p. 104676, set. 2022.

TOFFOLO, R. V. M.; MORO, T. K.; SANTOS, D. H.; COSTA, L. C. B.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. Roller-Compacted Concrete Pavements Produced Entirely with Steelmaking Slag Aggregates. **ACI Materials Journal**, v. 118, n. 4, 1 jul. 2021.

Trabousi, M. A. Análise do comportamento de juntas de ccr com alto teor de finos. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.