Avaliação da trabalhabilidade e resistência à compressão de argamassa de revestimento pré-pronta com rejeito de minério de ferro

Evaluation of workability and compressive strength of ready-mixed coating and laying mortar with iron ore waste

Júnia Toledo Fagundes
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, M.G. | juniatfagundes@gmail.com

Yara Helena Correia de Araújo Oliveira
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, M.G. | yara.oliveira@aluno.ufop.edu.br

Sandra Arlinda Santiago Maciel
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais | Ouro Preto, MG | sandra.maciel@ifmg.edu.br

Mário Luís Cabello Cabello
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais | Ouro Preto, MG | mario.cabello@ifmg.edu.br

RESUMO

Este estudo investiga a utilização de rejeito de minério de ferro (RMF) proveniente do processo de jigagem no Quadrilátero Ferrífero como único agregado na produção de argamassas de revestimento pré-prontas. O objetivo é avaliar a viabilidade técnica dessa aplicação. O método incluiu a caracterização física, química e mineralógica do RMF, a formulação de argamassas com traço empregado na indústria e a realização de ensaios de trabalhabilidade e resistência à compressão. Os resultados indicam que as argamassas atenderam aos requisitos estabelecidos em normas técnicas. A contribuição do estudo é fornecer dados que apoiem a aplicação de resíduos minerais na construção civil.

Palavras-chave: Argamassa de revestimento. Rejeito de minério de ferro. Sustentabilidade. Resistência à compressão.

ABSTRACT

This study investigates the use of iron ore tailings (IOT) from the jigging process in the Quadrilátero Ferrífero as the only aggregate in pre-mixed rendering mortars. The objective is to assess the technical feasibility of this application. The method involved physical, chemical, and mineralogical characterization of the IOT, mortar formulation based on an industrial mix design, and tests for workability and compressive strength. The results indicate that the mortars met the requirements established by technical standards. The study contributes by providing data to support the use of mineral waste in construction materials.

Keywords: Coating mortar. Iron ore tailings. Sustainability. Compressive strength.

1 INTRODUÇÃO

O minério de ferro é a segunda commodity mineral mais comercializada no mundo, com produção de 2,5 bilhões de toneladas em 2019, sendo 98% destinada à indústria siderúrgica. Austrália, Brasil, China, Índia e Rússia concentraram 85% dessa produção. O Brasil, terceiro maior produtor mundial, possui 12% das reservas globais, destacando-se o Quadrilátero Ferrífero-MG (74,4% das reservas) e Carajás-PA (19,5%). A exaustão dos minérios de alto teor no Quadrilátero Ferrífero, responsável por 48% da produção nacional, levou à adoção de métodos de concentração para atingir os parâmetros exigidos pela siderurgia (Fe > 64%, SiO_2 < 6%), gerando grandes volumes de rejeitos com impacto ambiental e econômico relevante (USGS, 2020; Veloso *et al.*, 2018).

Simultaneamente, a construção civil demanda grandes quantidades de insumos minerais, como areia e brita, que compõem cerca de 60% do volume de materiais de construção consumidos mundialmente (Venkatarama Reddy *et al*., 2016). Frente à previsão de escassez e ao aumento dos custos desses recursos, o aproveitamento de resíduos da mineração surge como alternativa sustentável.

Este trabalho avalia a viabilidade do uso do rejeito de minério de ferro (RMF), proveniente do processo de jigagem no Quadrilátero Ferrífero, como substituto total do agregado miúdo em argamassas aditivadas para revestimento e assentamento. O estudo envolveu a caracterização do RMF e a formulação de diferentes traços de argamassa, com posterior avaliação da trabalhabilidade e da resistência à compressão. A proposta visa reduzir o impacto ambiental da disposição de rejeitos e promover soluções sustentáveis para a construção civil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho foram:

- RMF da jigagem de minério de ferro proveniente de uma mina do Quadrilátero Ferrífero.
- Cimento Portland CP V ARI.
- Aditivo incorporador de ar (AIA) - Aerante 50, laurel sulfato de sódio, marca Cimental.
- Aditivo à base de HPMC ((Hidroxipropilmetil celulose) de baixa viscosidade GT CELL 15.000, marca Global Trend.
- Argamassa pré-pronta industrializada para revestimento e assentamento (para referência).
- Água da torneira.

2.2 MÉTODO

O estudo investigou a substituição integral do agregado natural pelo rejeito de minério de ferro (RMF) na formulação de argamassas pré-prontas para revestimento e assentamento. Para garantir a representatividade das amostras e a confiabilidade dos resultados, o RMF foi homogeneizado, quarteado e submetido a peneiramento com abertura de 2,4 mm, sendo utilizada a fração passante, conforme recomendação de Cabello *et al.* (2013). A amostra empregada corresponde ao mesmo material caracterizado por Dauce *et al.* (2019), cujos dados físico-químicos e mineralógicos foram aproveitados nesta pesquisa. O fluxograma das etapas de preparação encontra-se representado na Figura 1, enquanto a Figura 2 ilustra os procedimentos de corte granulométrico e homogeneização.

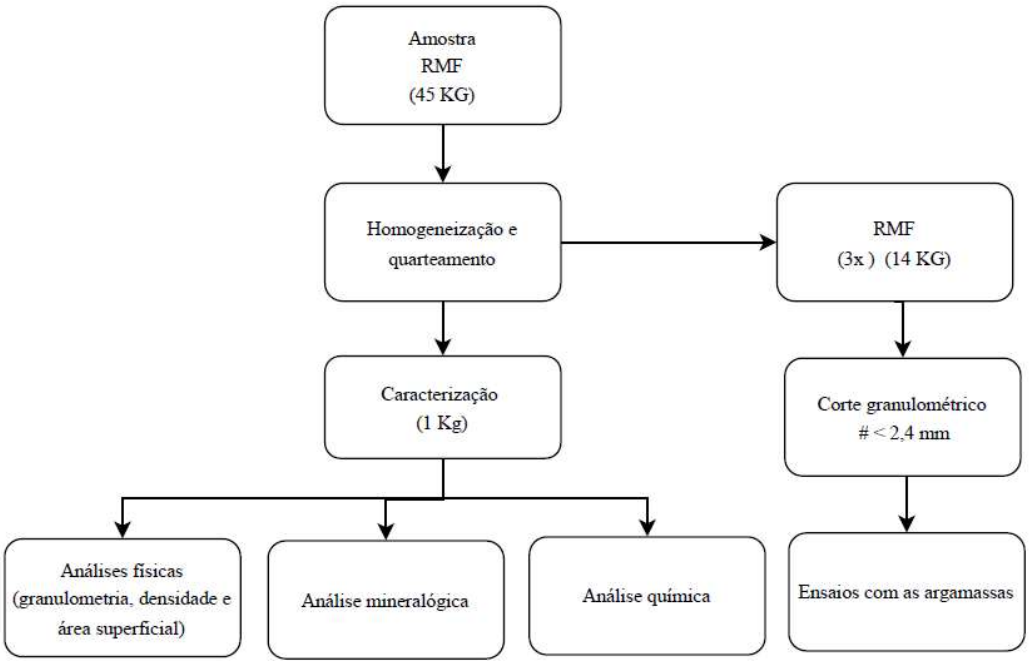
As formulações das argamassas seguiram proporções praticadas por uma empresa fabricante de argamassas pré-prontas, adotando a substituição total do agregado natural pelo RMF. A Tabela 1 apresenta as referências de formulação da argamassa industrializada utilizada como base, enquanto a Tabela 2 descreve os traços experimentais desenvolvidos com RMF.

Tabela 1: Referência de formulações de argamassas pré-pronta industrializada

Tipo de argamassa	Cimento %	Agregado %	Aditivo 1 (%)	Aditivo 2 (%)	Água (%)
Revestimento e assentamento	CPV	agregado p/ argamassa revestimento	Incorporador de AR	Celulósico Baixa Viscosidade.	16 a 18
Faixas	14 a 18	82 a 86	0,003 a 0,006	0,02 a 0,05	

Fonte: Adaptado de manuais técnicos de fabricantes de argamassas industrializadas (Quartzolit, Votomassa, Fortaleza, Precon, Urso Polar)

Figura 1: Fases de preparação, caracterização e ensaios com a argamassa



Fonte: Os autores

Figura 2: (a) Corte granulométrico (b) pilha alongada (c) quarteador Jones



Fonte: Autoria própria

Tabela 2: Formulações das argamassas de revestimento com substituição da rocha calcária pelo rejeito

Traço	Cimento %	Agregado (RMF) %	Aditivo IA %	Aditivo Celulósico %	água/ cim	água/ mat. Secos
T1	14	86	0.003	0.02	1.11	0.16
T2	14	86	0.003	0.05	1.11	0.16
T3	14	86	0.006	0.02	1.14	0.16
T4	14	86	0.006	0.05	1.14	0.16
Faixa Ref.	14-18	82-86	0.003-0.006	0.02 - 0.05	1.00 - 1.15*	0.16 - 0.18*

Nota: *Faixas estimadas com base no teor de água entre 16% e 18% da Tabela 1.

Fonte: Os autores

Adotou-se um teor fixo de 14% de cimento e 86% de agregado (RMF), valores compatíveis com o limite inferior das faixas usualmente utilizadas no setor, visando reduzir o custo e o impacto ambiental associados ao cimento. A variação foi restrita aos teores de aditivos, permitindo isolar o efeito do RMF como agregado. As amostras foram preparadas conforme a NBR 16541 (ABNT, 2016) e submetidas aos ensaios de trabalhabilidade (NBR 13276, 2016) e resistência à compressão (NBR 7215, 2019), com quatro corpos de

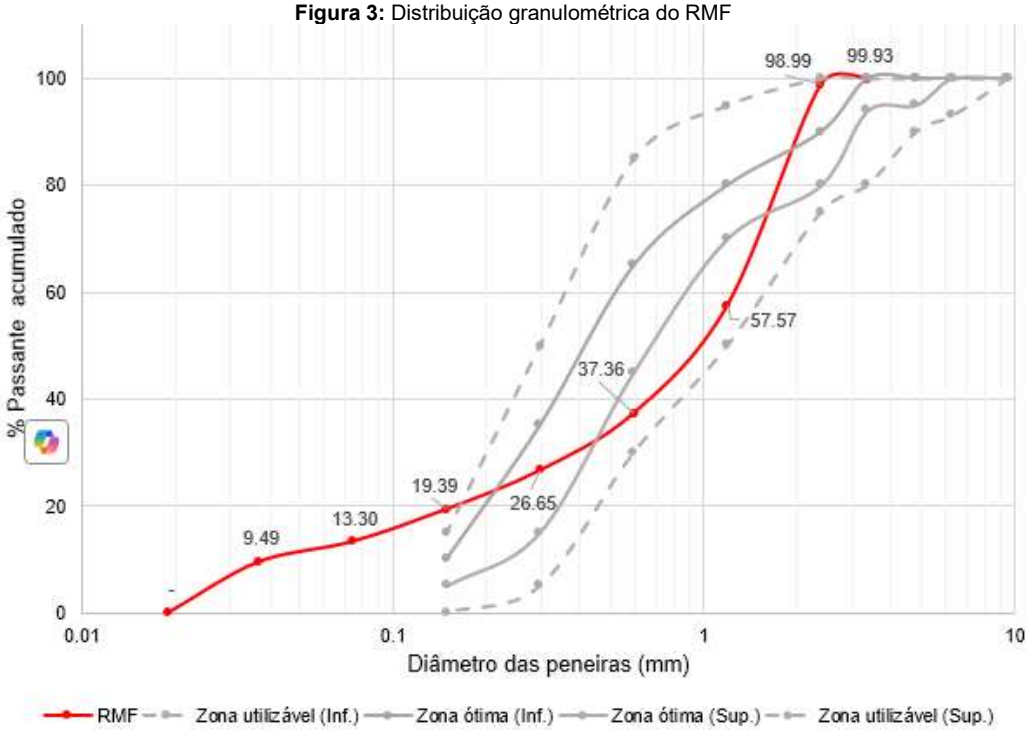
prova por traço. As formulações foram comparadas a uma argamassa industrializada de mercado, com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica do uso do RMF.

3 RESULTADOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO RMF

No presente estudo, a análise granulométrica do RMF, realizada conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022), foi conduzida após o corte do material na peneira de 2,4 mm, conforme descrito na Figura 1. Assim, a fração utilizada nos ensaios apresentou dimensão máxima de 2,38 mm, com D_{80} < 1,8 mm, D_{50} < 1,0 mm e D_{20} < 0,150 mm. A Figura 3 apresenta a distribuição granulométrica do RMF selecionado, evidenciando suas características específicas.

Figura 3: Distribuição granulométrica do RMF



Fonte: Os autores

A densidade, área superficial específica, análise mineralógica e química do RMF estão apresentadas nas tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3: Densidade, área superficial e composição mineralógica do RMF

Identificação	Densidade (g/cm3)	Área Superficial (m2/g)	Composição mineralógica
RMF	3.41	14.14	quartzo, hematita e goethita

Fonte: DAUCE *et al* (2019)

Tabela 4: Composição química do RMF

Componentes	Fe	SiO_2	Mn	P	$Al2O_3$	PPC
Proporção média (%)	30.35	50.36	0.19	0.132	2.1	3.03

Fonte: DAUCE *et al.* (2019)

3.2 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

As argamassas foram preparadas de acordo com a NBR 16541 (ABNT, 2016). A Figura 4 ilustra as etapas de preparação e o ensaio de trabalhabilidade. A determinação dos índices de consistência seguiu os procedimentos descritos na NBR 13276 (ABNT, 2016), calculando-se a média dos três diâmetros de espalhamento, expressos em milímetros. Vale destacar que a revisão dessa norma eliminou o valor de referência previamente estabelecido para o espalhamento (260 ± 5 mm), proporcionando maior flexibilidade na análise da consistência.

Figura 4: Argamassa com RMF: (a) preparação da mistura, (b) ensaio de trabalhabilidade: argamassa após os 30 golpes



Fonte: Os autores

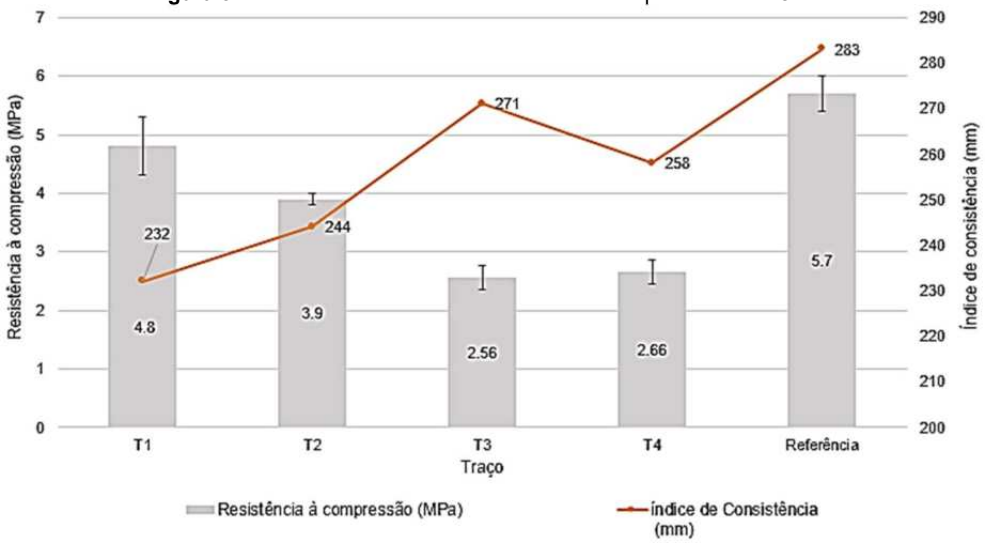
A formulação dos diferentes traços avaliados, e os resultados obtidos para índice de consistência e resistência à compressão estão apresentados na Tabela 5 e Figura 5, permitindo uma comparação detalhada entre as formulações.

Tabela 5 Composição dos traços e resultado do índice de consistência e resistência à compressão aos 28 dias de cura

Granulometria	Traço	Cimento %	Agregado (RMF) %	Aditivo IA %	Aditivo Celulósico %	Rel. água/ cim	água/ mat. Secos	Índice de consistência (mm)	Resistência à compressão (MPa)
< 2.4 mm	T1	14	86	0.003	0.02	1.11	0.16	232	4.8
< 2.4 mm	T2	14	86	0.003	0.05	1.11	0.16	244	3.9
< 2.4 mm	T3	14	86	0.006	0.02	1.14	0.16	271	2.6
< 2.4 mm	T4	14	86	0.006	0.05	1.14	0.16	258	2.7
< 2.4 mm	Ref.	Não informado pelo fabricante					0.18	283	5.7

Fonte: Os autores

Figura 5: Índice de consistência e resistência a compressão aos 28 dias



Fonte: Os autores

A argamassa de referência apresentou boa trabalhabilidade e resistência à compressão superior a 5,0 MPa aos 28 dias, em conformidade com os requisitos normativos. As argamassas com RMF, embora tenham exibido desempenho inferior nos dois parâmetros, apresentaram trabalhabilidade adequada para aplicação em revestimentos, corroborando os achados de Fontes *et al.* (2016), Cabello *et al*. (2013) e Chouhan *et al.* (2019). Os resultados de resistência à compressão mantiveram-se coerentes com os da literatura, que aponta a viabilidade do uso de rejeitos. A influência da granulometria nas propriedades mecânicas e reológicas, destacada por Haddad *et al*. (2016), reforça a importância de ajustes na formulação. Dessa forma, o ajuste adequado da granulometria do RMF e das proporções de aditivos pode melhorar o desempenho das argamassas, consolidando seu potencial como alternativa técnica viável e ambientalmente sustentável ao uso de agregados naturais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), o Instituto Federal de Minas Gerais Campus Ouro Preto, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – código de financiamento 001 e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro.

CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade do uso do RMF como único agregado miúdo na produção de argamassas aditivadas, contribuindo para o desenvolvimento tecnológico, econômico e ambiental dos setores de mineração e construção civil. Os resultados demonstraram que, embora as argamassas com RMF de granulometria inferior a 2,4 mm tenham apresentado resistência à compressão e trabalhabilidade inferiores em relação à argamassa de referência, os valores obtidos foram compatíveis com os reportados por Fontes *et al.* (2016), Cabello *et al*. (2013) e Chouhan *et al.* (2019), que também avaliaram o uso de rejeitos na composição de argamassas. A trabalhabilidade, avaliada segundo o método da NBR 13276 (ABNT, 2016), manteve-se dentro da faixa considerada adequada para aplicação, em concordância com os estudos citados.

Tais achados reforçam a viabilidade técnica do uso do RMF, desde que sejam realizados ajustes na formulação, especialmente no controle granulométrico e na dosagem de aditivos, para otimizar o desempenho do compósito. A utilização desse rejeito, portanto, representa uma alternativa promissora e ambientalmente sustentável para a substituição do agregado natural em argamassas de revestimento, favorecendo a economia circular e a redução dos impactos ambientais associados à disposição de rejeitos.

Recomenda-se a continuidade da pesquisa com a avaliação de diferentes faixas granulométricas do RMF, bem como o estudo de diferentes proporções dos aditivos utilizados, a fim de melhorar a trabalhabilidade e a resistência mecânica das argamassas. Ensaios de durabilidade e desempenho em condições reais de aplicação também são indicados para consolidar a viabilidade do uso do RMF.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 13276**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 16541**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - preparo da mistura para realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 17054**. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 7215**. Cimento Portland - determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

CABELLO, M. L. *et al.* Use of quartzite quarries wastes in civil construction. **Key Engineering Materials**, v. 548, p. 135–140, 2013.

CHOUHAN, H. S. *et al*. Gainful utilization of dimensional limestone waste as fine aggregate in cement mortar mixes. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 363-374, 2019.

DAUCE, P. D. *et al*. Characterisation and magnetic concentration of an iron ore tailings. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 1, p. 1052–1059, 2019.

FONTES, W. C. *et al.* Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 988-995, 2016.

HADDAD, L. D. *et al.* Análise da influência da granulometria do agregado miúdo nas propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas de revestimento. **Ciência & Engenharia,** v. 25, n. 1, p. 7–16, jan./jun. 2016.

USGS. Iron ore statistics and information. US Geological Survey Minerals Information, US Department of Interior, 2020. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-iron-ore.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2020.

VELOSO, C. H.; FILIPPOV, L. O.; FILIPPOVA, I. V.; ARAUJO, A. C. Investigation of the interaction mechanism of depressants in the reverse cationic flotation of complex iron ores. **Minerals Engineering,** v. 125, p. 133-139, 2018.

VENKATARAMA REDDY, B. V. *et al.* Non-organic solid wastes - potential resource for construction materials. **Current Science**, v. 111, n. 12, p. 1968–1976, 2016.