



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

Mateus Vieira Marinho
Victória Raspante Marques

***AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE REJEITO DE BARRAGEM DE MINÉRIO DE
FERRO COMO SUBSTITUTO PARCIAL DAS FRAÇÕES DE AREIA EM
ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND***

Ouro Branco - Minas Gerais
Julho de 2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAOPÉBA

Mateus Vieira Marinho
Victória Raspante Marques

***AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE REJEITO DE BARRAGEM DE MINÉRIO DE
FERRO COMO SUBSTITUTO PARCIAL DAS FRAÇÕES DE AREIA EM
ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND***

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Graduação em Engenharia Civil, da
Universidade Federal de São João del-Rei,
Campus Alto Paraopeba, como requisito
parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Anderson Ravik dos Santos

Ouro Branco - Minas Gerais
Julho de 2024

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M338a	Marinho, Mateus Vieira. Avaliação da aplicabilidade de rejeito de barragem de minério de ferro como substituto parcial das frações de areia em argamassas de cimento Portland./ Mateus Vieira Marinho; Victória Raspante Marques; orientador Anderson Ravik dos Santos. -- Ouro Branco, MG, 2024. 14 f. il. Trabalho de Conclusão (Graduação - Engenharia Civil) - Universidade Federal de São João del-Rei, 2024. 1. Rejeito de minério de ferro 2. Construção civil 3. Argamassas cimentícias 4. Reutilização de resíduos I. Marques, Victória Raspante II. Santos, Anderson Ravik dos, orient. III. Título.
-------	---

Mateus Vieira Marinho
Victória Raspante Marques

**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE REJEITO DE BARRAGEM DE
MINÉRIO DE FERRO COMO SUBSTITUTO PARCIAL DAS FRAÇÕES DE
AREIA EM ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de
Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de São João del-
Rei, Campus Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau
de Bacharel em Engenharia Civil.*

Aprovado em 23 de julho de 2024

COMISSÃO EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **ANDERSON RAVIK DOS SANTOS**
Data: 02/08/2024 15:10:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Anderson Ravik dos Santos - UFSJ
Professor Orientador do TCC

Documento assinado digitalmente
 **LEANDRO NEVES DUARTE**
Data: 02/08/2024 15:06:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Leandro Neves Duarte - UFSJ
(Banca Examinadora)

Documento assinado digitalmente
 **MARIANA ARRUDA PEREIRA**
Data: 02/08/2024 15:00:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Mariana Arruda Pereira – UFSJ
(Banca Examinadora)

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, a Deus por nos proporcionar força, sabedoria e perseverança durante todo o processo de elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Gostaríamos de manifestar nossa sincera gratidão ao orientador Anderson Ravik dos Santos, por todo direcionamento, orientação e conhecimento compartilhado ao longo do trabalho. Sua dedicação, disponibilidade e comprometimento foram fundamentais para que pudéssemos transpor todos os obstáculos que surgiram ao longo do caminho. Agradecemos profundamente sua paciência, conselhos valiosos e contínuo encorajamento.

Além disso, gostaríamos de estender os agradecimentos ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSJ/CAP, em especial à técnica Andreia da Conceição de Faria. Seu apoio durante os ensaios laboratoriais e sua disposição em sanar nossas dúvidas foram de inestimável valor para o avanço do trabalho. Sem sua colaboração, seria impossível alcançar resultados significativos.

Agradecemos também a todos os outros colegas, professores e funcionários que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Sem a ajuda e apoio de cada um, este trabalho não seria possível. Somos extremamente gratos por ter tido a oportunidade de contar com pessoas tão especiais ao nosso lado.

“Concentre todos seus pensamentos na tarefa que está realizando. Os raios de sol não queimam até que sejam colocados em foco. ” (Alexander Graham Bell)

AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE REJEITO DE BARRAGEM DE MINÉRIO DE FERRO COMO SUBSTITUTO PARCIAL DAS FRAÇÕES DE AREIA EM ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND

Mateus Vieira Marinho¹; Victória Raspante Marques¹

1: Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Brasil
Campus Alto Paraopeba (CAP)
Rod. MG 443, KM 7 Fazenda do Cadete, Ouro Branco - MG 36495-000
<https://www.ufsj.edu.br/cap/>

Resumo As atividades mineradoras são essenciais para a economia brasileira, contudo, causam impactos ambientais significativos devido ao grande volume de resíduos gerados. Os desastres em Mariana e Brumadinho evidenciam problemas na gestão desses resíduos, ressaltando a necessidade de encontrar alternativas para reduzir sua geração e disposição em barragens. A construção civil se apresenta como uma solução promissora para a reutilização dos rejeitos de mineração. Neste sentido, o presente estudo explora o potencial do rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF), oriundo do rompimento da Barragem do Fundão, em Mariana, como substituto parcial da areia em argamassas. Foram elaboradas amostras com substituições de 5%, 10%, 15% e 20% da massa total do agregado miúdo por RBMF, e avaliadas quanto a resistência à compressão em 7, 14 e 28 dias. A caracterização dos materiais revelou que a areia utilizada é adequada para a produção de argamassas e que o RBMF confere uma coloração avermelhada, que pode ser aproveitada como pigmento sustentável. Nos ensaios de resistência à compressão, as amostras contendo 5%, 10% e 15% de RBMF demonstraram melhor desempenho em comparação com a amostra de referência. A substituição de 15% de RBMF foi considerada ideal, equilibrando resistência, trabalhabilidade e reutilização de resíduos. No entanto, a substituição de 20% resultou em menor resistência e trabalhabilidade, evidenciando a importância de limitar a quantidade de rejeito utilizada. A análise dos planos de ruptura revelou diferentes tipos de falhas, sendo mais frequente as rupturas do tipo cisalhada lateral, um dos planos mais confiáveis. Esses resultados evidenciam que a substituição parcial de areia por RBMF pode melhorar as propriedades das argamassas, contribuindo para práticas sustentáveis na construção civil e oferecendo uma solução viável para a gestão de resíduos.

Palavras-chave: rejeito de minério de ferro, construção civil, argamassas cimentícias, reutilização de resíduos.

Abstract Mining activities are essential for the Brazilian economy; however, they cause significant environmental impacts due to the large volume of waste generated. The disasters in Mariana and Brumadinho highlight problems in managing this waste, emphasizing the need to find alternatives to reduce its generation and disposal in tailings dams. The construction industry presents a promising solution for reusing mining waste. In this context, the present study explores the potential of iron ore tailings (IOT) from the rupture of the Fundão Dam in Mariana as a partial sand substitute in mortars. Samples were prepared with 5%, 10%, 15%, and 20% IOT substitution by weight of the fine aggregate and evaluated for compressive strength at 7, 14, and 28 days. Material characterization revealed that the sand used is suitable for mortar production and that IOT imparts a reddish color, which can be utilized as a sustainable pigment. Compressive strength tests showed that samples containing 5%, 10%, and 15% IOT performed better compared to the reference sample. A 15% IOT substitution was deemed ideal, balancing strength, workability, and waste reuse. However, 20% substitution resulted in reduced strength and workability, highlighting the importance of limiting the amount of waste used. Failure analysis revealed different types of fractures, with shear fractures being the most common and reliable mode. These results indicate that partial sand replacement with IOT can improve mortar properties, contributing to sustainable practices in the construction industry and offering a viable solution for waste management.

Key-words: iron ore tailings, construction industry, cementitious mortars, waste reuse.

1. INTRODUÇÃO

O minério de ferro é crucial para a economia brasileira, representando mais de 80% da produção nacional de minerais metálicos. Em 2023, o Brasil extraiu cerca de 440 milhões de toneladas deste recurso, posicionando-se como o segundo maior produtor mundial de minério de ferro (ANM, 2022; USGS, 2024). Apesar de sua importância econômica, a mineração de ferro ocasiona a produção de grandes quantidades de resíduos. Esses resíduos, conhecidos como rejeitos, são subprodutos sem valor comercial descartados durante o processo de beneficiamento (ABNT, 2017). Para cada tonelada de minério processado, cerca de 0,5 tonelada de rejeito é gerada (Werneck, 2019). Esses rejeitos são geralmente armazenados em barragens, cujo eventual rompimento pode levar a graves riscos ambientais, incluindo alterações no solo, assoreamento de cursos d'água e deterioração da qualidade da água e do ar (Almada *et al.*, 2022).

No Brasil, as barragens de rejeitos são concebidas predominantemente pelo método de alçamento a montante. Neste sistema, a estrutura da barragem é construída sempre à montante sobre o rejeito já consolidado, partindo de um dique inicial (Cardozo; Pimenta; Zingano, 2016). Apesar de ser simples e econômico, este método é considerado menos seguro e mais propenso a acidentes (Stela *et al.*, 2020). Na última década, o país testemunhou dois grandes desastres envolvendo falhas em barragens de rejeito. O rompimento da Barragem de Fundão em Mariana (MG), em 2015, liberou cerca de 50 milhões de metros cúbicos de rejeitos na Bacia do Rio Doce, destruindo o distrito de Bento Rodrigues e resultando em 19 mortes. O colapso da Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão em Brumadinho (MG), em 2019, espalhou aproximadamente 13 milhões de metros cúbicos de rejeitos sobre o Rio Paraopeba, destruiu a área administrativa da Vale S.A., e matou 270 pessoas (Pedroso, 2020; Lage *et al.*, 2020). Em resposta ao desastre de Brumadinho, a nova Política Nacional de Segurança das Barragens (PNSB) foi estabelecida pela Lei 14.066 de 2020, proibindo a construção de novas barragens pelo método a montante (Brasil, 2020).

A indústria da construção civil apresenta-se como uma alternativa promissora para atenuar tanto os impactos socioeconômicos quanto ambientais decorrentes da mineração, além de contribuir para a redução do volume de rejeitos armazenados. O uso do rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF) neste setor tem mostrado potencial em diversas aplicações, tais como a incorporação em compósitos cimentícios (Cancio *et al.*, 2018; Carvalho *et al.*, 2021; Almada *et al.*, 2019), produção de blocos cerâmicos (Mendes, 2019) e a substituição de agregados convencionais (Ling *et al.*, 2021). Essas inovações sugerem uma rota viável para a gestão sustentável de rejeitos, alinhando a segurança ambiental com avanços tecnológicos no setor da construção.

Outro uso inovador do RBMF na construção civil é a sua aplicação em argamassas, seja como adição ou como substituto do aglomerante ou agregado miúdo. Argamassas são compostas principalmente de cimento, areia e água, e servem para revestimento e assentamento, desempenhando funções de impermeabilização, acabamento, absorção de tensões, proteção de substratos, adesão de revestimentos e distribuição de esforços (Recena, 2012). A pesquisa de Castro (2018) investigou a adição de até 40% em peso de RBMF em argamassas estruturais, mostrando melhorias na resistência mecânica e redução da porosidade devido ao efeito de preenchimento (filler). Bessa *et al.* (2018) demonstraram que a inclusão de RBMF como substituto parcial do cimento Portland não comprometeu as propriedades das argamassas. Zhang *et al.* (2020) utilizaram rejeitos de minério de ferro para substituir parcialmente a areia em argamassas, obtendo melhor desempenho com substituição de 40% em peso. De fato, a substituição parcial da areia por resíduos de minério de ferro pode melhorar a resistência à compressão e outras propriedades como densidade, porosidade e absorção de água (Rotimi e Tijani, 2022).

Alves e Santos (2023) desenvolveram uma pesquisa visando o reaproveitamento de RBMF proveniente da tragédia envolvendo a Barragem de Fundão, em Mariana. O estudo demonstrou que ao utilizar o rejeito mencionado como substituto parcial da areia em argamassas, houve um aumento significativo na demanda por água devido à perda de trabalhabilidade. Para contornar esta situação, os autores decidiram utilizar diferentes relações água/cimento nas amostras produzidas, dificultando a análise dos efeitos do rejeito nas propriedades das argamassas. Em resposta a essas dificuldades, Rabelo e Mendes (2023) optaram por utilizar o rejeito como adição, ao invés de substituição. Para tanto, os autores aumentaram a quantidade de água nos traços, mas mantiveram a relação água/cimento constante em todas as amostras. No entanto, mesmo com essa abordagem, enfrentaram desafios relacionados à trabalhabilidade das misturas visto que a quantidade de material seco aumentou, além de notarem que o incremento do teor de RBMF resultou em uma diminuição acentuada das resistências das amostras.

Diante desse contexto, o presente trabalho pretende dar continuidade aos estudos anteriores, buscando aprimorá-los e superar os problemas encontrados em relação à trabalhabilidade e a variação na relação água/cimento das misturas. Embora seja uma continuação de pesquisas estabelecidas, esta se diferencia significativamente em termos de abordagem. No estudo de Alves e Santos (2023), o rejeito substituiu apenas as frações de areia fina e média fina, mantendo inalteradas as quantidades de areia média grossa e grossa. Essa abordagem criou uma distribuição granulométrica com lacunas que podem ter afetado as propriedades

mecânicas e de trabalhabilidade da argamassa. No estudo de Rabelo e Mendes (2023), mesmo com a adição de uma pequena porção de água na mistura em relação ao recomendado por norma, a quantidade de material seco aumentou gradativamente devido a utilização do rejeito como adição, dificultando a trabalhabilidade.

Em contraste, a presente pesquisa propõe uma metodologia de substituição uniforme e distribuída, na qual o RBMF substituirá proporcionalmente as quatro frações de areia (fina, média fina, média grossa e grossa). Essa abordagem visa alcançar uma curva granulométrica bem graduada, eliminando as lacunas observadas nas pesquisas anteriores e potencialmente melhorando as propriedades da argamassa, tanto em termos de resistência quanto de trabalhabilidade. Em suma, o objetivo deste trabalho é avaliar a utilização do RBMF proveniente do rompimento da Barragem do Fundão, em Mariana, como substituto parcial da areia, em todas suas frações, na produção de argamassas. Espera-se com este trabalho não apenas avançar no conhecimento sobre o uso do rejeito em argamassas, mas também contribuir para a resolução de desafios práticos na sua aplicação.

Ainda, esta pesquisa se alinha com diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), promovendo práticas inovadoras e sustentáveis na gestão de resíduos de mineração e na indústria da construção civil (ONU, 2024). São eles o ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura (a utilização de RBMF na construção civil promove a inovação na indústria da construção, melhorando a sustentabilidade e segurança das infraestruturas); ODS 11: Cidades e Comunidades Sustentáveis (ao reutilizar rejeitos de mineração na construção civil, contribui-se para a criação de comunidades mais sustentáveis, reduzindo a necessidade de novas matérias-primas e mitigando a produção de resíduos); ODS 12: Consumo e Produção Responsáveis (a utilização de RBMF como material de construção é um exemplo de práticas sustentáveis de consumo e produção, promovendo a reutilização de subprodutos industriais) e ODS 13: Ação Contra a Mudança Global do Clima (o uso de resíduos de mineração na construção civil pode reduzir a necessidade de extração de novos materiais, diminuindo as emissões associadas à mineração e produção de cimento).

2. METODOLOGIA

2.1. Materiais e caracterização

O RBMF utilizado foi fornecido pela empresa Vale do Rio Doce, coletado e tratado pela mineradora Pedras Congonhas e doado pelo laboratório IntechLab do CEFET-MG. Além do RBMF, foram empregados na formulação dos traços areia lavada de rio e cimento Tupi, classificado como CP II E 32, disponibilizados pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSJ/CAP.

A granulometria da areia foi determinada seguindo as diretrizes da norma NBR 17054 (ABNT, 2022a), que estabelece o método de ensaio para a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos utilizados em argamassas e concretos à base de cimento Portland. Para o ensaio de peneiramento, foi utilizado um agitador de peneiras Bertel e um conjunto de peneiras da série normal com aberturas nominais de 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm, durante um período de 5 minutos. Inicialmente, a amostra de areia foi submetida à secagem em estufa por 24 horas a uma temperatura constante de 100°C. Após esse processo, realizou-se o peneiramento da amostra.

Segundo Lopes (2019), a distribuição granulométrica é um ensaio essencial para otimizar a dosagem de misturas à base de cimento, utilizando o conceito de empacotamento de partículas. Uma distribuição inadequada das partículas pode prejudicar a trabalhabilidade, a resistência mecânica e a durabilidade do material. Além disso, a granulometria influencia diretamente a quantidade de água necessária para alcançar a plasticidade desejada, impactando na relação água/cimento, um dos principais fatores que afetam a resistência de materiais cimentícios.

2.2. Composição dos traços

Para definir as proporções dos traços das amostras, foi adotada, inicialmente, uma argamassa composta por uma parte de cimento e três partes de areia padronizada, em massa, seguindo a relação água/cimento de 0,48 conforme estabelecido pela NBR 7215 (ABNT, 2019), que descreve o método para determinação da resistência à compressão do cimento Portland. A Tabela 1 apresenta a quantidade de materiais necessária para confeccionar seis corpos de prova de argamassa, conforme especificado pela norma. Essa composição serviu como traço de referência.

O traço normativo adotado como referência propõe o uso de 1872 g de areia, divididos em quatro frações granulométricas: grossa (1,2 a 2,4 mm), média grossa (0,6 a 1,2 mm), média fina (0,3 a 0,6 mm) e fina (0,15 a 0,3 mm), conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019). Para a pesquisa, introduziu-se uma quinta fração ao traço, constituída por rejeito, para atuar como agregado miúdo, complementando a granulometria da areia sem alterar a massa total de material seco. Para a amostra crítica, que contém a maior proporção de rejeito, utilizou-se 374,4 g de RBMF, o que corresponde a um quinto (20%) da massa de agregado miúdo, mantendo-

se a massa total de 1872 g. Esta amostra foi denominada R20 e é a única em que a quantidade de rejeito é igual à das quatro frações de areia. Para avaliar a substituição gradual das frações de areia por rejeito e permitir comparações, foram propostos traços adicionais com substituições de 5%, 10% e 15% da massa total do agregado miúdo por rejeito, nomeados como R5, R10 e R15, respectivamente.

Tabela 1 - Quantidade de materiais propostos pela NBR 7215 (ABNT, 2019)

Material	Massa para mistura (g)
Cimento Portland	624 ± 0,4
Água	300 ± 0,2
Areia normal	
Fração grossa	468 ± 0,3
Fração média grossa	468 ± 0,3
Fração média fina	468 ± 0,3
Fração fina	468 ± 0,3

Em cada caso, a massa de areia correspondente foi dividida igualmente entre as quatro frações granulométricas mencionadas. As proporções de cimento e água foram mantidas constantes conforme a norma, permitindo avaliar especificamente o impacto da substituição parcial de areia por rejeito no desempenho das argamassas. A Tabela 2 apresenta em detalhes as quantidades de materiais utilizadas em cada traço para a confecção das amostras.

Tabela 2 - Quantidade de materiais por traço (medidas em g)

Traços	Cimento	Água	Areia grossa	Areia média grossa	Areia média fina	Areia fina	RBMF	% RBMF sob Σ agregados
REF	624	300	468	468	468	468	0	0%
R5	624	300	444,6	444,6	444,6	444,6	93,6	5%
R10	624	300	421,2	421,2	421,2	421,2	187,2	10%
R15	624	300	397,8	397,8	397,8	397,8	280,8	15%
R20	624	300	374,4	374,4	374,4	374,4	374,4	20%

2.3. Preparação das amostras

A confecção das amostras iniciou-se com a montagem e preparação dos moldes metálicos cilíndricos (cujas dimensões são 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura), de maneira que toda a superfície interna foi untada por desmoldante sintético do tipo óleo de silicone 350 cps, a fim de garantir a estanqueidade do encaixe da base com a forma cilíndrica, conforme orientações da norma NBR 7215 (ABNT, 2019). Em seguida, executou-se a mistura dos materiais de forma mecânica, por meio de uma argamassadeira Voges. Foram produzidos 18 corpos de prova para cada traço.

Durante o processo de moldagem, as argamassas foram colocadas nos moldes por meio do auxílio de espátula, em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais. Cada camada foi compactada manualmente com 30 golpes uniformes e distribuídos de maneira homogênea usando um soquete metálico. Decorridas 24h da confecção dos corpos de prova, estes foram retirados dos moldes, identificados e imersos em um tanque contendo água saturada de cal, onde permaneceram até a data de ruptura.

2.4. Ensaio de resistência à compressão

Após completarem 7, 14 e 28 dias, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, de acordo com a norma NBR 7215 (ABNT, 2019). O ensaio foi conduzido utilizando a prensa hidráulica Pavitest, onde foram rompidos 6 corpos de prova para cada idade de ruptura, com uma velocidade de carregamento de $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s. O ensaio de compressão em argamassas cimentícias é de suma importância para a construção civil, pois permite avaliar a resistência dos materiais empregados, selecionar os mais adequados, desenvolver novos materiais, analisar o comportamento sob cargas compressivas, validar normas, assegurar a qualidade e promover avanços científicos. Sua aplicação é vasta, abrangendo diversos setores industriais, e é crucial para garantir segurança, eficiência e inovação (Almeida *et al.*, 2020; Lopes, 2019).

Embora este estudo tenha como foco principal avaliar a resistência à compressão das amostras de argamassas produzidas, existem ainda outros ensaios que avaliam propriedades fundamentais para o desempenho pleno da vida útil e a durabilidade das argamassas, como por exemplo, os ensaios de resistência

de aderência à tração (arrancamento) e módulo de elasticidade. O fluxograma apresentado na Figura 1 sintetiza os materiais empregados e aborda os procedimentos executados para a produção dos corpos de prova e realização do ensaio.

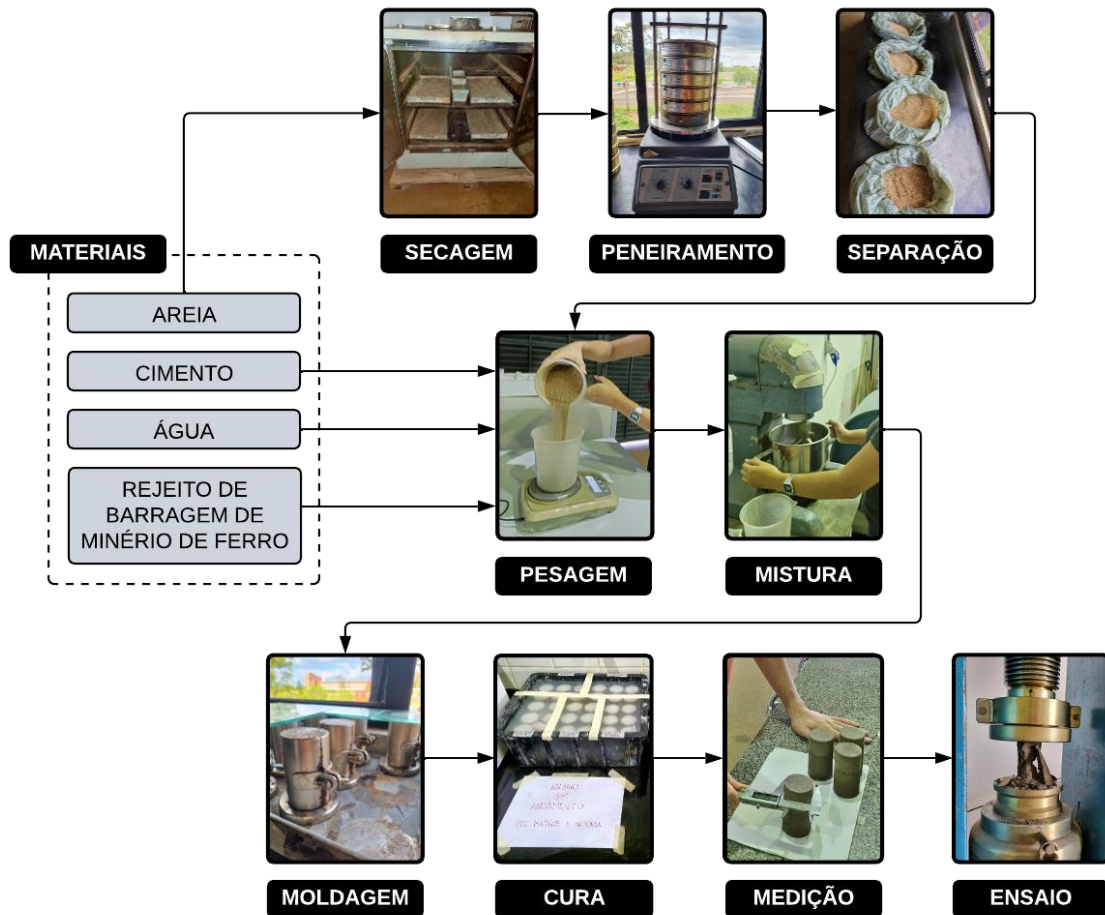


Figura 1 - Fluxograma de procedimentos

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização dos materiais

O ensaio de granulometria resultou na curva granulométrica apresentada na Figura 2.

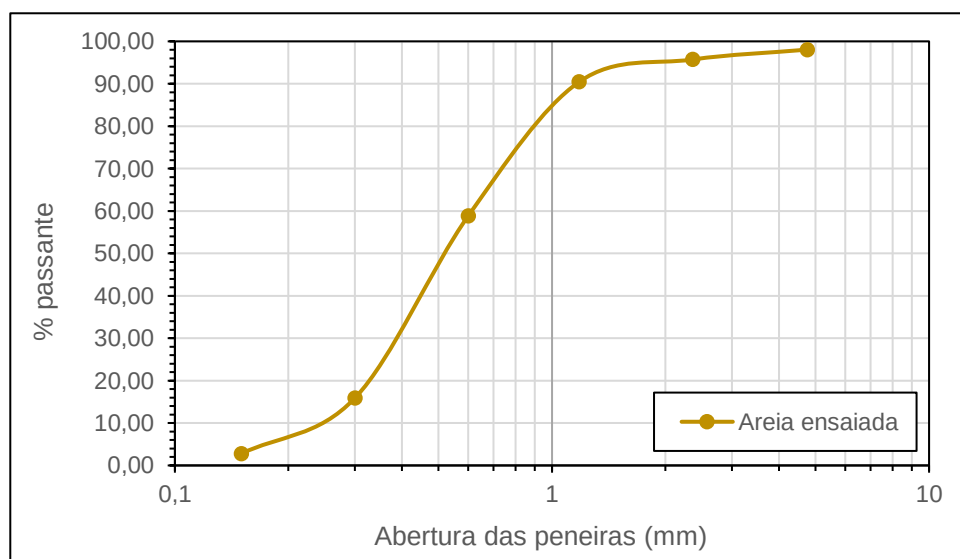


Figura 2 - Curva granulométrica da areia (porcentagem passante)

A curva granulométrica revela que as partículas de areia são significativamente maiores do que as partículas de RBMF, que têm em média 0,008 mm (Coura, 2018). Isso indica que o rejeito pode ser utilizado para complementar o agregado miúdo, melhorando o empacotamento das partículas. A curva indica ainda que a maior parte do material está concentrada nas frações média fina e média grossa. A maior retenção ocorre entre as peneiras de 0,3 mm e 0,6 mm, com 43% e 32% de material retido, respectivamente. Isto sugere que a fração média fina é a mais representativa nesta amostra de areia. A fração média grossa também é significativa, enquanto as frações fina e grossa são menos representadas, com apenas uma pequena porcentagem de material retido nas peneiras: 13% e 5% respectivamente.

Esta predominância significativa das frações médias, com menor presença das frações grossa e fina representaram uma dificuldade na obtenção de quantidades iguais das quatro frações necessárias para produzir uma argamassa equilibrada, conforme a norma. Para compensar essa deficiência, foi preciso realizar várias sessões de peneiramento, aumentando o tempo e o esforço necessários para isolar e acumular as frações desejadas. Embora trabalhoso, este processo foi essencial para garantir a uniformidade e a qualidade da argamassa final.

Após o ensaio de granulometria, a curva referente à porcentagem de material retido acumulado também foi gerada, a fim de observar se a granulometria da areia utilizada atende aos limites definidos pela norma NBR 7211 (ABNT, 2022b) para agregados miúdos e graúdos usados na produção de compósitos de cimento Portland. A curva gerada e as zonas ótimas e utilizáveis para agregados, conforme a NBR 7211, estão dispostas na Figura 3. A conformidade do agregado utilizado com essas zonas é crucial para assegurar que o material produzido terá as propriedades desejadas, como resistência, durabilidade e trabalhabilidade. O não cumprimento desses limites pode resultar em materiais de baixa qualidade, com problemas de segregação, excesso de pasta ou falta de coesão.

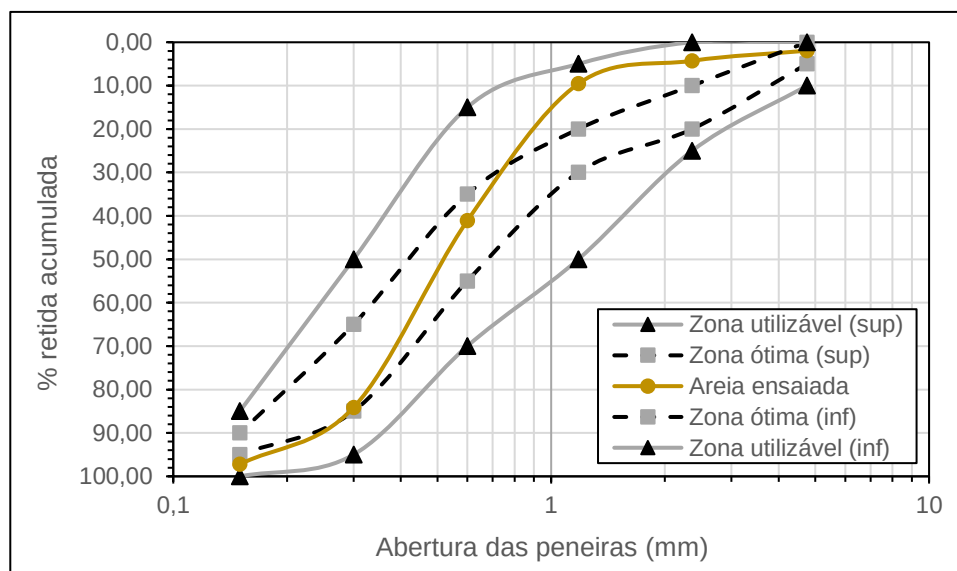


Figura 3 - Curva granulométrica da areia (porcentagem retida acumulada)

Observa-se que a curva granulométrica da areia ensaiada encontra-se totalmente dentro dos limites das zonas utilizáveis, conforme a NBR 7211 e, portanto, é adequada para ser empregada na produção de argamassas. Enquanto as outras frações figuram dentro da faixa aceitável, vale destacar que a fração de areia média fina, a mais prevalente, se encontra na zona ótima, o que pode trazer benefícios à trabalhabilidade e coesão da argamassa, devido à boa distribuição dos grãos nesta faixa específica.

Também foram determinados o módulo de finura (MF) e a dimensão máxima característica (DMC) dos grãos do agregado. O MF indica a granulometria média do agregado enquanto a DMC é a abertura da maior peneira que retém até 5% do agregado. Para a amostra ensaiada, o MF obtido foi de 2,38 e a DMC de 2,36 mm, reforçando que o agregado tem partículas predominantemente pequenas. O MF se enquadra dentro do módulo de finura da zona ótima segundo a norma (2,20 a 2,90). Vale lembrar que este índice afeta diretamente as propriedades do concreto ou argamassa, incluindo a trabalhabilidade, a necessidade de água e a proporção de cimento. Um MF muito baixo pode resultar em uma mistura mais coesa, mas com maior demanda de água e cimento, enquanto um MF muito alto pode resultar em uma mistura menos coesa e mais propensa à segregação (Oliveira *et al.*, 2020).

Antes de ser fornecido ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSJ/CAP, o RBMF foi submetido a rigorosos ensaios de caracterização no laboratório IntechLab do CEFET-MG. Entre esses

ensaios, foi realizada a análise de fluorescência de raios X para identificar os elementos químicos presentes, na forma de óxidos, e seus respectivos percentuais. Segundo Coura (2018), a composição do rejeito é predominantemente formada por óxido de ferro (58%) e sílica (40%), o que explica o aspecto visual avermelhado (ferruginoso) identificado nos corpos de prova confeccionados com o uso de RBMF, principalmente nas amostras mais críticas (que contêm as maiores proporções de rejeito). A Figura 4 compara o aspecto visual dos corpos de prova entre as amostras R20 (com maior teor de RBMF) e REF (traço de referência).

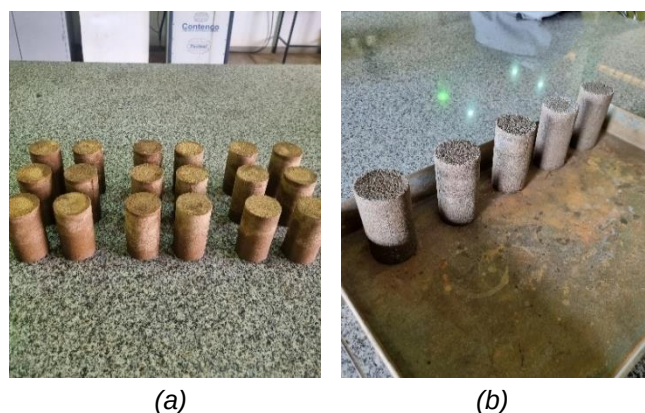


Figura 4 - Comparativo do aspecto visual entre a amostra R20 (a) e REF (b).

A argamassa de cimento colorida é amplamente usada como substituto de tintas e revestimentos cerâmicos para decorar paredes externas de edifícios. Para ajustar sua cor, são adicionados diferentes pigmentos como óxido férrico, óxido de manganês, óxido crômico, ocre e ultramarino durante o preparo. Isso eleva o custo da matéria-prima da argamassa (Yang *et al.*, 2017). O RBMF, devido ao seu teor de óxido de ferro, que lhe confere cores entre vermelho e marrom, pode ser uma alternativa de pigmento para cimentos, matrizes cimentícias e tintas sustentáveis (De Magalhães *et al.*, 2020; Galvão, 2017; Galvão *et al.*, 2018).

Esta coloração característica, resultado do uso de RBMF, pode inspirar uma variedade de aplicações em revestimentos, acabamentos, pavimentações e elementos de jardinagem e paisagismo, especialmente onde uma estética rústica é desejada. Em pavimentações, por exemplo, a cor pode ser utilizada para sinalização em calçadas e ciclovias. De forma geral, o aspecto visual exclusivo e atrativo das argamassas produzidas pode diferenciar projetos no mercado, agregando valor e atraindo clientes, ao mesmo tempo que oferece um método atraente e ecologicamente correto para gerenciar resíduos de mineração em argamassas.

3.2. Resistência à compressão

O comportamento de resistência à compressão dos corpos de prova ensaiados em três idades de ruptura para cada traço confeccionado, incluindo o de referência, pode ser observado na Figura 5. A Tabela 3 resume os valores de resistência alcançados nos ensaios, e a variação percentual destes resultados ao longo das idades de cura.

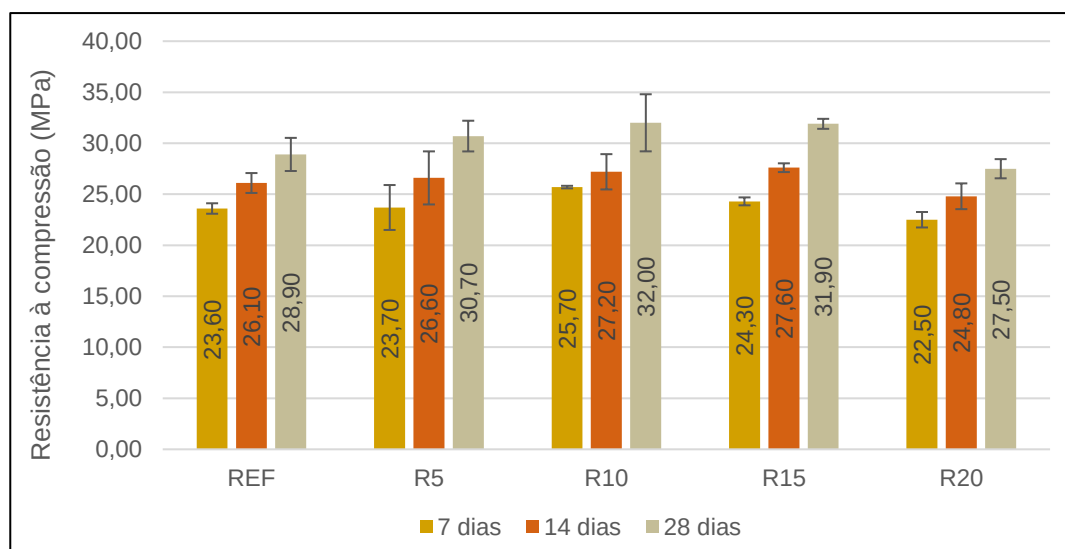


Figura 5 - Resistência à compressão das amostras

Tabela 3 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão

Traço	7 dias		14 dias		28 dias		Aumento percentual (%)		
	Resistência média (MPa)	Desvio padrão	Resistência média (MPa)	Desvio padrão	Resistência média (MPa)	Desvio padrão	7 - 14	14 - 28	7 - 28
REF	23,60	0,5	26,10	1,0	28,90	1,6	10,59	10,73	22,46
R5	23,70	2,2	26,60	2,6	30,70	1,5	12,24	15,41	29,54
R10	25,70	0,1	27,20	1,7	32,00	2,8	5,84	17,65	24,51
R15	24,30	0,4	27,60	0,4	31,90	0,5	13,58	15,58	31,28
R20	22,50	0,8	24,80	1,3	27,50	0,9	10,22	10,89	22,22

Nota-se que a quantidade de RBMF tende a influenciar diretamente a resistência à compressão. Durante o processo de mistura e moldagem dos corpos de prova, observou-se que a inclusão de RBMF na mistura afetou significativamente sua consistência e trabalhabilidade. Essa alteração na trabalhabilidade pode ter prejudicado a compactação e a distribuição uniforme dos materiais, impactando negativamente a resistência final. Como pode ser observado na Figura 5 e Tabela 3, as amostras R5, R10 e R15 apresentaram desempenho superior em todas as idades de ruptura em comparação com a amostra de referência, destacando-se a amostra R10, que alcançou a maior resistência à compressão, atingindo 32 MPa aos 28 dias, valor 11% maior que o da amostra de referência na mesma idade. Presume-se que, para o rejeito em questão, uma substituição entre 5% e 15% do total de areia por RBMF proporciona a melhor resistência à compressão da mistura.

Para a utilização de até 15% de RBMF, a incorporação dos finos do rejeito melhorou o arranjo das partículas ao preencher os vazios deixados pela areia mais fina, reduzindo a porosidade da mistura. Essa adição funcionou como um efeito filler, promovendo um aumento na resistência, conforme observado por Almada (2022) e Castro (2018). Em contrapartida, a resistência à compressão aos 28 dias do traço R20, com maior teor de rejeito, foi a menor observada: 5% inferior à resistência do traço de referência. Isso demonstra que substituir as frações de areia por RBMF em proporções elevadas não é ideal para a produção de argamassas. Além da perda de resistência, há uma redução na trabalhabilidade da mistura ao incluir uma maior quantidade de finos, o que demanda mais água, conforme observado na preparação da amostra R20 e ressaltado por Almada (2022). Essa questão pode estar associada à alta absorção de água, área de superfície angular e textura fina do RBMF (Shettima, 2016).

Kwan, Ng e Huen (2014) destacam que o teor de finos apresenta dois efeitos divergentes: em baixas quantidades, os finos preenchem os vazios entre as partículas maiores, aumentando a densidade do empacotamento do agregado miúdo. Em quantidades elevadas, a alta finura amplia a área superficial do agregado miúdo, reduzindo a espessura da camada ao redor dos agregados. De fato, partículas finas em alta concentração têm maior propensão à aglomeração, resultando em um empacotamento menos eficiente dos grãos (Lopes, 2019).

Entre as amostras que apresentaram resistência superior ao traço de referência, destaca-se a R15, que demonstrou o melhor equilíbrio entre desempenho mecânico e reaproveitamento de resíduo, evidenciando seu potencial ambiental. Além disso, a amostra R15 apresentou as menores variações em relação à média, conforme indicado pelos valores de desvio padrão, e alcançou o maior incremento de resistência entre as amostras: um aumento de 31% aos 28 dias em comparação com o ensaio realizado aos 7 dias.

No estudo de Rabelo e Mendes (2023), o RBMF foi incorporado como adição em proporções de 25%, 50%, 75% e 100% em relação às partes de areia. Para evitar que a trabalhabilidade fosse comprometida, os autores incrementaram a quantidade de água nas misturas em 100 g além do previsto pela norma, aumentando a relação água/cimento de 0,48 para 0,64. No entanto, mesmo com essa estratégia, enfrentaram dificuldades quanto à trabalhabilidade e produção das amostras devido ao aumento da quantidade de material seco. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são apresentados na Figura 6. Vale observar que nenhuma amostra foi rompida aos 28 dias.

Rabelo e Mendes (2023) constataram que, com exceção da amostra R100, as amostras contendo RBMF ensaiadas em 7 dias apresentaram uma resistência à compressão superior ao traço de referência, destacando-se a amostra R50 com um aumento de 22%. Aos 14 dias, todas as amostras mostraram uma resistência superior à do traço de referência, com a amostra R100 (com maior teor de RBMF) registrando um aumento de 62% em relação ao ensaio de 7 dias.

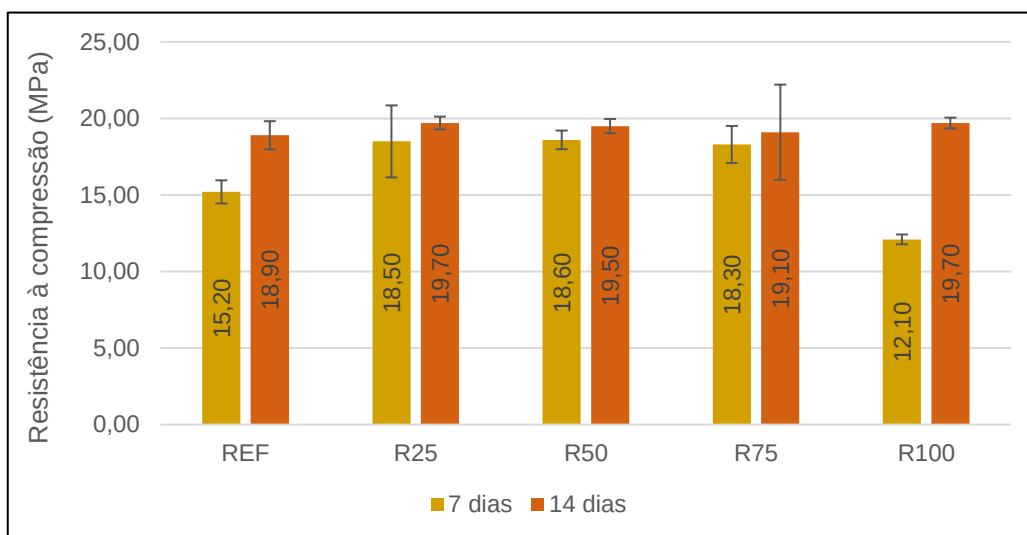


Figura 6 - Resistência à compressão das amostras ensaiadas por Rabelo e Mendes (2023)

Embora esses ganhos de resistência sejam promissores, o uso de RBMF como aditivo não se revelou mais vantajoso que seu uso como substituto parcial das frações de areia. A introdução de maior quantidade de água na mistura reduziu as propriedades mecânicas das argamassas (Amancio, 2021). Isso pode ser comprovado ao comparar as resistências à compressão das amostras de referência dos dois trabalhos, que apontam uma redução de 36% e 28% da propriedade aos 7 e 14 dias, respectivamente. Além disso, as resistências das amostras preparadas com substituição parcial das frações de areia por RBMF apresentaram desempenho superior a todas as amostras produzidas por Rabelo de Mendes (2023), logo, a substituição tende a ser uma abordagem mais eficaz do que a adição de RBMF em argamassas.

3.3. Análise dos planos de ruptura dos corpos de prova

Após o ensaio de resistência à compressão, observou-se que os corpos de prova apresentaram diferentes planos de ruptura. Segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018), corpos de prova cilíndricos podem romper de pelo menos sete formas distintas. Bezerra (2016) explica que a distribuição de tensões em corpos de prova cilíndricos se concentra no topo, onde a carga é aplicada, e que a falha pode ocorrer em qualquer posição devido à resistência relativamente uniforme.

Vale lembrar que a capacidade de um corpo de prova suportar tensões compressivas depende não apenas da composição granulométrica do agregado e da relação água/cimento utilizada, mas também da maneira como o corpo de prova foi moldado e da qualidade dos equipamentos e materiais empregados no processo. Portanto, seguir os padrões de qualidade é fundamental para garantir a precisão e a confiabilidade dos ensaios. As Figuras 7 a 11 ilustram os planos de ruptura observados a longo dos ensaios de resistência à compressão realizados no presente estudo.



Figura 7 - Ruptura do tipo cônica

A ruptura do tipo cônica, semelhante a uma ampulheta, onde ocorre a separação das camadas externas laterais, é considerada ideal para um corpo de prova cilíndrico e pode ser observada na Figura 7. Neste caso, a força de ruptura foi uniformemente distribuída ao longo da superfície de contato com a prensa. Rupturas deste tipo garantem máxima confiabilidade nos resultados dos ensaios de compressão (Resende, 2017).

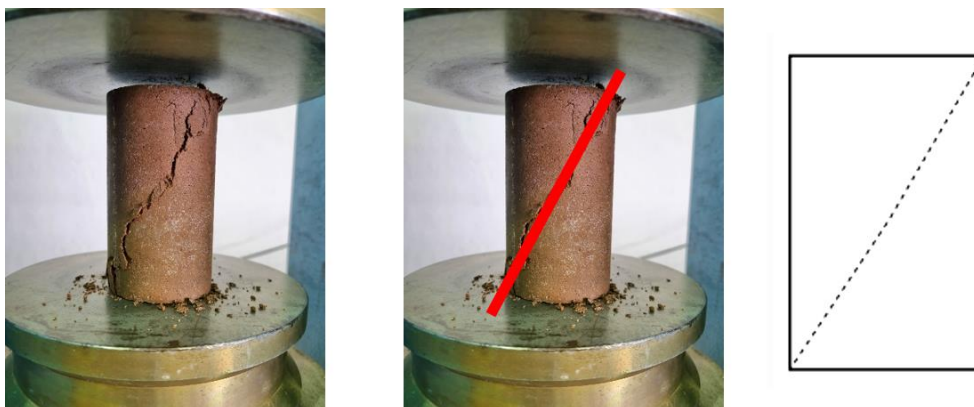


Figura 8 - Ruptura do tipo cisalhada lateral

A ruptura do tipo cisalhada lateral (Figura 8) foi o plano de ruptura observado com maior frequência nos ensaios. Segundo Resende (2017), as rupturas por cisalhamento lateral são o segundo tipo mais confiável. Esse tipo de ruptura ocorre em planos inclinados em relação à direção da força cortante aplicada, resultando em uma linha de ruptura diagonal através do corpo de prova. Um ensaio com esse tipo de ruptura pode ser considerado comum e aceitável.

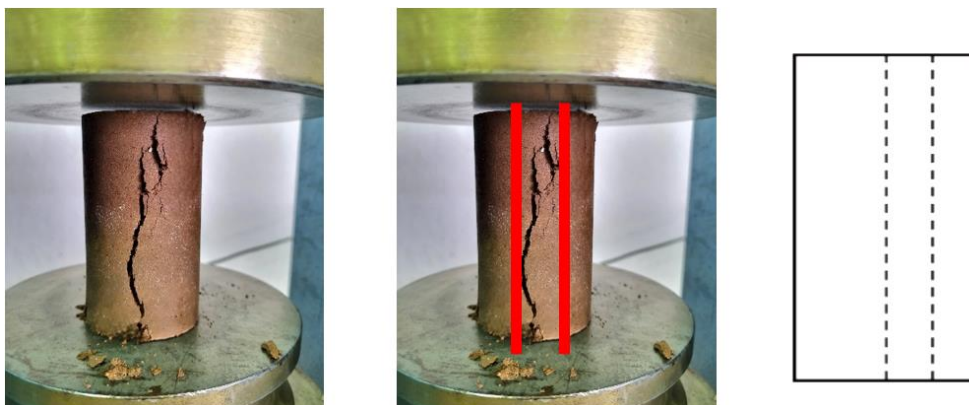


Figura 9 - Ruptura do tipo colunar

Rupturas em coluna, como a apresentada na Figura 9, sugerem que o topo do corpo de prova não foi adequadamente nivelado durante o processo de moldagem, o que normalmente seria corrigido por meio do capeamento de enxofre ou retificação (Resende, 2017). Contudo, limitações de equipamento e escassez de materiais impossibilitaram a implementação desse padrão de qualidade.



Figura 10 - Ruptura do tipo coluna com formação de cones

O plano de ruptura do tipo coluna com formação de cones (Figura 10) foi observado em apenas um dos ensaios de compressão, relacionado a um corpo de prova de amostra de referência, provavelmente devido a uma moldagem irregular não corrigida durante o capeamento. Um outro fator que pode ocasionar este tipo de ruptura é a presença de uma maior quantidade de areia grossa, capaz de influenciar a formação das fissuras devido ao atrito entre as partes rompidas e os agregados, que tende a dificultar o deslizamento ao longo do plano de ruptura (Bezerra, 2016).

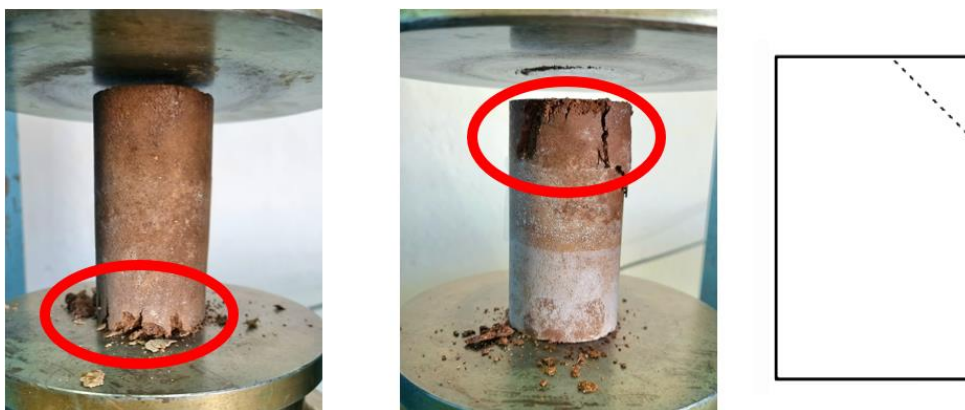


Figura 11 - Ruptura do tipo fraturas no topo e/ou na base

Por fim, as rupturas do tipo fraturas no topo e na base, apresentadas na Figura 11, indicam claramente que a aplicação da carga foi desigual ou que a extremidade da amostra apresenta algum defeito em sua constituição. Na maioria dos casos, esta ocorrência é devido a falhas no processo de retificação. Entretanto, também pode acontecer quando a amostra de argamassa utilizada na moldagem apresenta segregação ou exsudação excessiva, enfraquecendo o topo e/ou a base do corpo de prova, ocasionando uma ruptura irregular e comprometimento do resultado (Resende, 2017).

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a utilização do RBMF oriundo do rompimento da Barragem do Fundão, em Mariana, como substituto parcial da areia, em todas as suas frações, na produção de argamassas, com foco em superar os desafios observados em estudos anteriores relacionados à trabalhabilidade e à variação na relação água/cimento das misturas. Neste sentido, os resultados apontaram melhorias nas propriedades da argamassa, tanto em termos de resistência quanto de trabalhabilidade, ao aplicar uma metodologia de substituição uniforme e distribuída do RBMF. A incorporação de RBMF melhorou o arranjo das partículas ao preencher os vazios deixados pela areia mais fina, sugerindo que houve uma redução da porosidade das misturas.

Ainda que a argamassa R10 tenha alcançado o maior valor de resistência à compressão entre todas as amostras (32 MPa aos 28 dias), a argamassa R15 apresentou a menor variação em relação à resistência média, indicando maior consistência e uniformidade nos valores, e consequentemente uma dosagem mais assertiva de RBMF. Ainda, a amostra R15 alcançou um aumento de 31% em sua resistência aos 28 dias em comparação com o ensaio realizado aos 7 dias, demonstrando um significativo ganho de propriedade mecânica ao longo do tempo. Além disso, a substituição de RBMF em uma proporção de 15% da massa total do agregado miúdo demonstra um equilíbrio ideal entre propriedades alcançadas e reaproveitamento de resíduos, tornando-se uma das mais atrativas para trabalhos futuros.

O estudo contribuiu para o avanço do conhecimento sobre o uso do rejeito em argamassas e para a resolução de desafios na sua aplicação, promovendo práticas sustentáveis na gestão de resíduos de mineração e na construção civil, alinhadas com os ODS. Do ponto de vista social, a reutilização de RBMF tem um impacto positivo ao mitigar os riscos de armazenamento inadequado de rejeitos, minimizando impactos nas comunidades locais. Além disso, promove oportunidades de trabalho e o desenvolvimento de novas tecnologias, beneficiando as comunidades próximas às áreas de mineração.

Sob a perspectiva ambiental, a redução do volume de rejeitos armazenados minimiza os riscos de desastres, como os rompimentos ocorridos em Mariana e Brumadinho, além de reduzir a demanda por extração de areia, preservando recursos naturais. Em termos econômicos, a utilização de RBMF pode reduzir significativamente os custos de produção de argamassas ao substituir parcialmente a areia, diminuindo os custos operacionais e responsabilidades ambientais das empresas de mineração. As economias geradas podem ser reinvestidas em tecnologias que promovam a sustentabilidade e eficiência na construção civil.

Vale destacar que ao longo da pesquisa foram encontradas limitações quanto à disponibilidade de equipamentos e escassez de materiais, fatores que afetaram a precisão dos resultados obtidos. Para trabalhos futuros e continuações, recomenda-se a formulação de novos traços para otimizar a incorporação do rejeito, maximizando seus benefícios sem comprometer as propriedades essenciais das argamassas. Além disso, é importante realizar uma análise mais aprofundada das propriedades físicas e químicas das amostras, incluindo ensaios de resistência à tração por compressão diametral, resistência de aderência, módulo de elasticidade, consistência, microscopia, porosidade e avaliações químicas, para uma compreensão mais abrangente dos comportamentos observados.

Ainda para trabalhos futuros, é recomendado avaliar o risco de reação álcali-agregado (RAA) devido à presença de sílica no rejeito de minério de ferro. Embora a quantidade de rejeito utilizada tenha sido pequena em relação à massa total dos materiais e a presença de areia lavada e filler carbonático no cimento possa ajudar a diluir os álcalis, a possibilidade de RAA não deve ser descartada. Portanto, sugere-se a realização de ensaios específicos, como o teste acelerado de barras de argamassa, para detectar a reatividade dos agregados. Além disso, recomenda-se a adição de materiais pozolânicos, como cinza volante ou metacaulim, para consumir os álcalis livres e mitigar o risco de RAA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - ANM. Anuário Mineral Brasileiro - Principais Substâncias Metálicas, 2022. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro>>. Acesso em: 25 de mar. de 2024.

ALMADA, B. S. *et al.* Propriedades mecânicas e indicadores de durabilidade de argamassas com adição de rejeito de minério de ferro. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, n. 19, 2022, Canela. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2022.

ALMADA, B. S. *et al.* Reuso de rejeito de minério de ferro em compósitos cimentícios. In: VI Congresso de Engenharia Civil, 2019, Juiz de Fora. Anais [...]. Juiz de Fora: Templo, 2019. v. 1, p. 136-149, mai. 2019. Disponível em: <<https://www.ufjf.br/congressodeengenharia/anais-vi-conenge-2019/>>. Acesso em: 27 de mar. de 2024.

ALMEIDA, M. S. *et al.* Avaliação da influência dos métodos de cura na resistência à compressão de concreto reforçado com fibras de aço. Revista Científica Integrada (RCI), Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, v. 4, n. 5, 2020.

ALVES, A. M. G.; SANTOS, P. H. M. Avaliação de Rejeito de Minério de Ferro Proveniente do Rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG como Substituto Parcial de Agregados Miúdos Convencionais em Argamassas Cimentícias. Orientador: Anderson Ravik dos Santos. 2023. 14 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba (UFSJ), Ouro Branco, 2023.

AMANCIO, F. A. *et al.* Estudo do comportamento no estado fresco e endurecido de argamassa com escória de aciaria BSSF. Revista Matéria, Rio de Janeiro, Brasil, v. 26, n. 3, abr./nov. de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 13028: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7211: Agregados para concretos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022b.

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

BESSA, S. *et al.* Análises de argamassas de revestimento produzidas com rejeito de minério de ferro. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, n. 17, 2018, Foz do Iguaçu. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2018. p. 2765- 2772.

BEZERRA, U. T. *et al.* Hourglass-shaped specimen: compressive strength of concrete and mortar (numerical and experimental analyses). Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, São Paulo, Brasil, v. 9, p. 510-524, ago. de 2016.

BRASIL. Lei Nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm>. Acesso em: mar. de 2024.

CANCIO, A, S. *et al.* Study of the Reuse of Iron Ore Tailing in Cementitious Compounds. International Journal of Science and Engineering Investigations, Copenhagen, Dinamarca, v. 7, n. 77, jun. 2018.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração - Uma revisão. *Holos*, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, ano 32, v. 08, nov./dez. 2016.

CARVALHO, J. M. F. D. *et al.* Influence of particle sizedesigned recycled mineral admixtures on the properties of cement-based composites. *Construction and Building Materials*, Valência, Espanha, v. 272, fev. 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820336448>>. Acesso em: 27 de mar. de 2024.

CASTRO, N. L. Estudo de argamassa estrutural com adição de resíduo da mineração de ferro depositado em barragem de lama no estado de Minas Gerais - Brasil. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

COURA, I. R. Avaliação do processamento de compósitos baseados em polietileno de alta densidade e rejeito de mineração de ferro. 2018. 72 p. Dissertação (Mestrado em Química) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Química, Belo Horizonte, 2018.

DE MAGALHÃES, L. F. *et al.* Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. *Journal of Cleaner Production*, v. 274, p. 123260, jun./jul. 2020.

GALVÃO, J. L. B. *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.

GALVÃO, J. L. B. Tintas imobiliárias de baixo custo com o uso de Rejeitos de Barragens de Minério de Ferro. Orientadora: Júlia Castro Mendes. 2017. 70 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2017.

KWAN, A. K. H.; NG, P. L.; HUEN, K. Y. Effects of fines content on packing density of fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 61, p. 270-277, 2014.

LAGE, F. L. *et al.* Utilização dos rejeitos de minério de ferro na construção civil: uma análise cienciométrica. *Research, Society and Development*, São Paulo, v. 9, n. 4, mar. 2020.

LING, G. *et al.* Utilizing Iron Ore Tailing as Cementitious Material for Eco-Friendly Design of Ultra-High Performance Concrete (UHPC). *Basiléia, Suíça*, v. 14, n. 8, p. 1829, abr. 2021.

LOPES, H. M. T. Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland. 2019. 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, 2019.

MENDES, B. C. Reaproveitamento do Rejeito de Minério de Ferro, Liberado no Desastre Envolvendo o Rompimento da Barragem de Fundão (MG), na Produção de Blocos Cerâmicos. 2019. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

OLIVEIRA, P. M. *et al.* Influência do módulo de finura nas propriedades mecânicas de argamassas com aditivo incorporador de ar. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1-8. Disponível em: <<https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/1267>>. Acesso em: 18 jul. de 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. ONU, 2024. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 27 de mar. de 2024.

PEDROSO, D. E. Aproveitamento do Rejeito de Minério de Ferro em Compósitos para Construção Civil. 2020. 116 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

RABELO, A. O.; MENDES, M. F. C. Estudo da Viabilidade da Utilização de Rejeito de Barragem de Minério de Ferro como Adição em Argamassas. Orientador: Anderson Ravik dos Santos. 2023. 8 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba (UFSJ), Ouro Branco, 2023.

RECENA, F. A. P. Conhecendo Argamassa. 2ª ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2012.

RESENDE, C. A forma de rompimento do CP é importante? Propriedades do Concreto, 2017. Disponível em: <<https://propriedadesdoconcreto.blogspot.com/2016/12/a-forma-de-rompimento-do-cp-e-importante.html>>. Acesso em: 03 de jul. de 2024.

ROTIMI, A; TIJANI, S. Compressive strengths of concrete by partially replacing sand with iron-ore waste. *GSC Advanced Engineering and Technology*, Jalgaon, Índia, v. 3, n. 2, p. 036-051, mar./mai. 2022.

- SHETTIMA, A. U. *et al.* Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, Valência, Espanha, v. 120, p. 72-79, nov. 2015/mai. 2022.
- STELA, L. H. P.; DUARTE, J. C.; PEREIRA, C. O. Métodos de Disposição dos Rejeitos de Minério de Ferro Alternativos ao Método de Barragens: Uma Revisão. *Revista Brasileira de Processos Químicos*, Campinas - SP, v.1 n.1, p.1-58, jul./dez. 2020.
- UNITED STATE GEOLOGICAL SURVEY - USGS. National Minerals Information Center - Mineral Commodity Summaries, 2024. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>>. Acesso em: 25 de mar. de 2024.
- WERNECK, M. S. O que é e para que serve uma barragem de rejeitos? Universidade Federal do ABC (UFABC), 2019. Disponível em: <<https://www.ufabc.edu.br/artigos/o-que-e-e-para-que-serve-uma-barragem-de-rejeitos>>. Acesso em: 25 de mar. de 2024.
- YANG, X. *et al.* Recycling red mud from the production of aluminium as a red cement-based mortar. *Waste Management & Research*, 35, p. 500 - 507, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0734242X16684386>>. Acesso em: 18 de jul. de 2024.
- ZHANG, W. *et al.* Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, Valência, Espanha, v. 59, mar./ago. de 2022.