



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**UTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO NA PRODUÇÃO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS ATRAVÉS DE PROCESSOS
DE SEPARAÇÃO GRAVIMÉTRICA E MAGNÉTICA**

Igor Diniz Pereira

Ouro Preto, 15 de Fevereiro de 2026

Igor Diniz Pereira

**“UTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO NA PRODUÇÃO DE
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS ATRAVÉS DE PROCESSOS
DE SEPARAÇÃO GRAVIMÉTRICA E MAGNÉTICA ”**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia
Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade
Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de Engenheiro
Metalúrgico

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis

Ouro Preto, 15 de Fevereiro de 2026.

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P436u Pereira, Igor Diniz.

Utilização de rejeitos de mineração na produção de materiais de construção sustentáveis através de processos de separação gravimétrica e magnética. [manuscrito] / Igor Diniz Pereira. - 2026.

45 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Rejeitos (Metalurgia). 2. Minério de ferro. 3. Beneficiamento de minério. 4. Materiais de construção - Blocos intertravados. I. Assis, Paulo Santos. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.7

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE
MATERIAIS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Igor Diniz Pereira

Utilização de Resíduos de mineração na produção de materiais de construção sustentáveis através de métodos de separação gravimétrica

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico

Aprovada em 03 de março de 2026

Membros da banca

Doutor - Paulo Santos Assis - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Danton Heleno Gameiro - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Vanderson Eney de Matos - Samarco
Doutor - Jorge Luiz Brescia Murta - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutora - Stephânia da Consolação Silva Nogueira - Universidade Federal de Ouro Preto

Paulo Santos Assis, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 26/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Santos Assis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/03/2026, às 12:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1060659** e o código CRC **7042A3CF**.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho representa a conclusão de uma etapa extremamente importante da minha vida. Nenhuma conquista é individual, e este momento só foi possível graças ao apoio, incentivo e presença de pessoas fundamentais ao longo da minha caminhada.

À minha família, que sempre foi meu alicerce. Ao meu pai, **Ciro Ribeiro Pereira**, exemplo de caráter, esforço e dignidade, por me ensinar que o trabalho sério é o caminho mais seguro para qualquer realização. À minha mãe, **Gislaine Nunes Diniz Pereira**, pelo amor incondicional, apoio permanente e por nunca medir esforços para perseguir meus sonhos. Ao meu irmão, **Artur Diniz Pereira**, pelo companheirismo em todos os momentos.

Às minhas avós, **Cleusa Ribeiro Pereira e Maria Nunes Diniz**, pelo carinho, pelas orações e pelo orgulho que sempre demonstraram em cada passo dado.

Aos meus avôs, **Geraldo Magela Diniz e José Maria Pena Pereira** (in memoriam), que permanecem presentes em meus valores e na força que carrego para seguir em frente.

Ao meu orientador, **Professor Dr. Paulo Santos Assis**, por ver em mim potencial que nenhum outro professor havia visto, pela confiança, pelos ensinamentos, pela orientação firme e por compartilhar sua experiência, contribuindo decisivamente para a qualidade deste estudo.

À **Samarco**, na pessoa do **Dr. Vanderson Eney de Matos**, pela parceria na pesquisa que possibilitou a realização deste trabalho e pela contribuição técnica oferecida ao longo do desenvolvimento das atividades.

À **Pré-moldados Nunes**, nas pessoas de **André Nunes, Jessica de Souza e Júnior**, pela abertura, colaboração, suporte operacional e por acreditarem na viabilidade da proposta desenvolvida.

Aos colegas **Anthony, Júlio e Luciana** pela colaboração no grupo de pesquisa.

À **MG Óxidos**, na figura de **Gustavo de Aguiar Honorato**, pela oportunidade de crescimento profissional, pelos ensinamentos adquiridos na prática da engenharia e, sobretudo, pela grande amizade.

Aos amigos que a vida acadêmica me deu e que levarei para sempre, em ordem alfabética:
Alberto, Artur, Carlos, Cecília, Danilo, Herbert, Ícaro, Pedro, Pedro Novaes, Rafael, Renato,
Ruan, Stênio e Victor.
Obrigado pelo apoio, pelas conversas, pela ajuda nos momentos difíceis e pelas comemorações nas vitórias.

À República Canaan, lugar onde vivi alguns dos melhores momentos da minha trajetória universitária e onde construí laços que ultrapassam o tempo. Agradeço especialmente a Perfil, Falamansa, Stand-by, Innibydex, Pala, Zé Punêis, Risada, Matusalém, Donzela, Boca, Cantarêra, Sovado, Sidnete, Queixas, Belo, Refri, Fiscal, Dendê, Pelé e Fazcena, pela irmandade, aprendizado e memórias que guardarei por toda a vida.

“I have nothing to offer but blood, toil, tears and sweat.”

Winston Churchill.

RESUMO

A crescente geração de rejeitos provenientes do beneficiamento de minério de ferro impõe desafios ambientais, econômicos e sociais, especialmente no que se refere à disposição em barragens e à necessidade de mitigação de impactos ambientais. Nesse contexto, este trabalho investigou a viabilidade técnica e ambiental da reutilização de rejeitos de mineração na produção de materiais de construção sustentáveis, com foco na fabricação de blocos intertravados para pavimentação. O estudo envolveu a caracterização granulométrica e química do rejeito in natura, seguida da aplicação sequencial de concentração gravítica em espiral de Humphrey e separação magnética de média intensidade, com o objetivo de promover simultaneamente a recuperação de ferro que estava em um teor de 8,89% , ao fim do tratamento foi obtida uma amostra com 1,09% de ferro e uma amostra de concentrado de ferro com 28,75% de teor, e a adequação do resíduo remanescente para uso como agregado na construção civil. As análises químicas foram realizadas por fluorescência de raios X, enquanto a caracterização granulométrica foi conduzida por peneiramento mecânico. Os materiais obtidos foram incorporados em diferentes formulações de concreto vibroprensado, com substituições parciais e totais de agregados naturais, sendo avaliados por meio de ensaios de resistência à compressão aos 7, 28 e 65 dias, conforme a ABNT NBR 9781:2013 que exige uma resistência a compressão de 35MPa média após 28 dias de cura. Os resultados indicaram que a rota integrada de tratamento promoveu redução do teor de ferro no rejeito final e recuperação metálica adicional, demonstrando coerência técnica sob os princípios clássicos do beneficiamento mineral. Embora os blocos produzidos tenham apresentado evolução da resistência mecânica ao longo da cura, os valores médios obtidos permaneceram inferiores ao mínimo normativo para comercialização, evidenciando a necessidade de ajustes no traço e na etapa de compactação. Conclui-se que a rota de tratamento proposta é tecnicamente consistente para valorização do rejeito, promovendo recuperação de recursos minerais e geração de insumo potencial para a construção civil, contribuindo para a economia circular e para a redução do passivo ambiental associado à mineração.

Palavras-chave: Rejeito de minério de ferro; Concentração gravítica; Separação magnética; Espiral de Humphrey; Blocos intertravados.

ABSTRACT

The increasing generation of tailings from iron ore beneficiation poses environmental, economic, and social challenges, particularly regarding their disposal in tailings dams and the need to mitigate environmental impacts. In this context, this study investigated the technical and environmental feasibility of reusing mining tailings in the production of sustainable construction materials, focusing on the manufacture of interlocking paving blocks. The study involved granulometric and chemical characterization of the tailings *in natura*, followed by the sequential application of gravity concentration using a Humphrey spiral and medium-intensity magnetic separation. The objective was to simultaneously recover iron and improve the remaining residue for use as construction aggregate. The tailings initially contained 8.89% iron; after treatment, a final residue with 1.09% iron and an iron concentrate with a grade of 28.75% were obtained. Chemical analyses were carried out using X-ray fluorescence, while particle size characterization was performed through mechanical sieving. The processed materials were incorporated into different vibropressed concrete formulations, with partial and total replacement of natural aggregates. Their performance was evaluated through compressive strength tests at 7, 28, and 65 days, according to the requirements of ABNT NBR 9781:2013, which establishes a minimum average compressive strength of 35 MPa after 28 days of curing. The results indicated that the integrated treatment route promoted a reduction in iron content in the final residue and additional metallic recovery, demonstrating technical consistency with classical mineral processing principles. Although the produced blocks showed an increase in mechanical strength over curing time, the average values obtained remained below the minimum standard required for commercialization, indicating the need for adjustments in the mix design and compaction stage. It is concluded that the proposed treatment route is technically consistent for tailings valorization, enabling mineral resource recovery and generating a potential input for the construction industry, thus contributing to the circular economy and to the reduction of environmental liabilities associated with mining.

Keywords: Iron ore tailings; Gravity concentration; Magnetic separation; Humphrey spiral; Interlocking concrete blocks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1.1: Espiral de Humphrey	21
Figura 4.1.2: Bojo de coleta da espiral de Humphrey	22
Figura 4.1.3: Separador magnético de média intensidade	23
Figura 4.1.4: Matriz magnética usada no separador magnético de média intensidade	24
Figura 4.2.4: Produção dos blocos intertravados	30
Figura 5.1.1 Gráfico de distribuição granulométrica das amostras	33
Figura 5.1.2 Legenda do gráfico de distribuição granulométrica das amostras	34
Figura 5.5 Gráfico das médias de resistências dos blocos	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.5.1 – Composição química e contaminantes dos agregados para concreto	19
Tabela 3.5.2 – Parâmetros definidos pela ABNT NBR 9781(2013)	19
Tabela 4.2.1.1 Análise granulométrica do rejeito em natura.	25
Tabela 4.2.1.2 Análise química do rejeito em natura.	25
Tabela 4.2.4 Traços produzidos.	29
Tabela 5.1 Análise granulométrica do rejeito tratado e em natura.	32
Tabela 5.2 Análise química das amostras de rejeito tratado e em natura.	34
Tabela 5.3.1.1 Resultados de teste de compressão dos blocos produzidos com substituição parcial de areia.	35
Tabela 5.3.2.1 Resultados de teste de compressão dos blocos produzidos com substituição total de areia.	36
Tabela 5.3.3.1 Resultados de teste de compressão dos blocos produzidos com substituição parcial de pó de pedra.	37

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

DEMIN – Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto

CP – Corpo de Prova

TR – Tensão de Ruptura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivos Gerais	12
2.2 Objetivos específicos	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Uso de rejeito de mineração de minério de ferro na construção civil	13
3.2 Uso da espiral de Humphrey para o tratamento do rejeito	14
3.3 Uso do separador magnético de média intensidade para o tratamento do rejeito	14
3.4 Produção de blocos intertravados com rejeito in natura	15
3.5 Ensaios e normas ABNT	17
4 MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1 Materiais	20
4.2 Métodos	25
4.2.1 Caracterização do rejeito	25
4.2.1.1 Caracterização granulométrica do rejeito	25
4.2.1.2 Caracterização Química do rejeito	26
4.2.2 Tratamento do rejeito na espiral de Humphrey	27
4.2.3 Tratamento do rejeito no separador magnético de média intensidade	29
4.2.4 Produção dos blocos intertravados	30
4.2.5 Teste de compressão dos blocos produzidos	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5.1 Caracterização granulométrica do rejeito tratado	32
5.2 Análise química do rejeito tratado	34
5.3 Teste de compressão dos blocos	35
5.3.1 Substituição parcial de areia	35
5.3.2 Substituição total de areia	36
5.3.3 Substituição parcial de pó de pedra	37
5.4 Discussão sobre a rota de tratamento	37
5.5 Discussão sobre a viabilidade dos blocos produzidos	39
6 CONCLUSÃO	42
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	43

1 INTRODUÇÃO

A mineração possui papel determinante para o desenvolvimento das sociedades contemporâneas, sendo responsável pelo fornecimento de matérias-primas indispensáveis à infraestrutura, à indústria e à geração de riqueza. Entretanto, a magnitude dessa atividade implica impactos ambientais significativos que acompanham a produção mineral. Estudos indicam que, embora a mineração de ferro desempenhe papel fundamental no desenvolvimento econômico, a atividade também está associada à alteração extensiva de áreas naturais e à geração anual de bilhões de toneladas de rejeitos em escala global (CARMIGNANO et al., 2021). Assim, o crescimento da produção mineral traz consigo a necessidade de desenvolvimento de soluções tecnológicas capazes de mitigar tais consequências.

No Brasil, a dimensão da atividade mineradora reflete diretamente nos volumes de rejeitos produzidos durante o beneficiamento. A literatura aponta que a fração descartada representa parcela expressiva do material lavrado, o que reforça a urgência de estratégias de reaproveitamento. De acordo com (CARMIGNANO et al., 2021), a geração de rejeitos provenientes do beneficiamento de minério de ferro no país pode corresponder a aproximadamente 20% a 40% da massa total do minério extraído. Esse cenário demonstra a relevância de pesquisas que busquem alternativas para redução do passivo ambiental associado às barragens

A disposição final desses materiais tradicionalmente ocorre em estruturas de contenção que demandam grandes áreas e monitoramento contínuo. A velocidade de crescimento desses depósitos impõe desafios técnicos, ambientais e sociais cada vez mais complexos. Os rejeitos gerados pela mineração de minério de ferro no Brasil apresentam volumes elevados e têm crescido de forma acelerada, reforçando a necessidade de estratégias voltadas ao seu reaproveitamento e à redução dos impactos ambientais associados à sua disposição (MARTINI et al., 2016). Tal constatação evidencia a necessidade de transformação do modelo de simples armazenamento para abordagens voltadas à valorização dos resíduos.

Entre as alternativas investigadas para o aproveitamento de rejeitos de mineração, sua aplicação como insumo na construção civil apresenta potencial significativo para absorção de grandes volumes de material. Diversos estudos indicam que, quando as características físicas

e químicas do resíduo são adequadamente controladas, é possível observar melhorias em propriedades físicas e mecânicas dos materiais produzidos. Nesse sentido, pesquisas realizadas por Souza e Guedes (2016) demonstram que a incorporação de rejeitos pode resultar em efeitos positivos em diferentes aplicações, contribuindo para a melhoria de propriedades de solos e concretos. Dessa forma, o reaproveitamento desses materiais pode transformar um passivo ambiental em um recurso produtivo.

Contudo, a presença de ferro em diferentes proporções pode alterar significativamente o comportamento granulométrico e a densidade das misturas, influenciando diretamente o desempenho mecânico dos compósitos cimentícios. Estudos indicam que o aumento do teor de ferro tende a elevar a fração de partículas finas e a massa específica do material, fatores que podem modificar o empacotamento granular, a demanda de água e, conseqüentemente, os resultados de resistência à compressão dos materiais cimentícios (SOUZA; GUEDES, 2016).

Nesse contexto, processos de concentração gravimétrica surgem como alternativas viáveis para promover a separação entre minerais de interesse e a fração silicosa presente nos rejeitos. Entre esses métodos, a espiral de Humphrey destaca-se por sua simplicidade operacional e eficiência no tratamento de partículas finas tendo boa eficiência para faixas granulométricas maiores que 75 micrômetros. Estudos relatam que esse equipamento apresenta bom desempenho no processamento de frações finas de minério, possibilitando a recuperação de ferro e a obtenção de materiais mais adequados para aplicações na construção civil (DAUCE et al., 2019).

De forma complementar, a separação magnética de média intensidade constitui uma ferramenta importante para aumentar a recuperação metálica e reduzir perdas de ferro no rejeito final. Pesquisas recentes ressaltam a importância do desenvolvimento de processos e tecnologias mais eficientes aplicadas a separadores magnéticos, visando ampliar a recuperação de ferro contido em rejeitos de mineração (MENDES; SILVA, 2023). Assim, a integração entre métodos de concentração gravimétrica e separação magnética configura uma estratégia promissora para promover o aproveitamento sustentável desses materiais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar a viabilidade técnica e ambiental da reutilização de rejeitos de mineração na produção de materiais de construção sustentáveis, com foco na fabricação de blocos intertravados para pavimentação. Avaliar a aplicabilidade desses resíduos processados por métodos de separação.

2.2 Objetivos Específicos

- Investigar alternativas viáveis para a reutilização dos resíduos gerados pela mineração, reduzindo seu impacto ambiental e promovendo práticas alinhadas à economia circular.
- Avaliar a possibilidade de utilizar rejeitos de mineração na fabricação de blocos intertravados para pavimentação e blocos de solo-cimento para construção civil, analisando a qualidade e o desempenho desses materiais em comparação com os convencionais.
- Aplicar técnicas como o separador magnético de média intensidade e a espiral de Humphrey para separar os componentes presentes nos rejeitos, tornando-os mais adequados para aplicação na construção civil e na indústria metalúrgica.
- Avaliar a resistência à compressão dos blocos fabricados com os resíduos in natura.
- Comparar os resultados de resistência à compressão dos blocos fabricados com os resíduos in natura com os parâmetros exigidos pela ABNT NBR 9781(2013)

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Uso de rejeito de mineração de minério de ferro na construção civil

A crescente produção de rejeitos associada ao beneficiamento de minérios de ferro tem impulsionado a comunidade científica a buscar alternativas que conciliem desempenho técnico e redução de impactos ambientais. Estudos de caracterização indicam que esses materiais apresentam composições mineralógicas compatíveis com diversas aplicações industriais, particularmente na construção civil, onde a demanda por agregados é elevada. Nesse sentido, Carmignano et al. (2021) observam que a maior parte das iniciativas de reaproveitamento discutidas na literatura internacional concentra-se justamente na incorporação desses resíduos em concretos, argamassas e produtos cimentícios, evidenciando a relevância do tema para a engenharia de materiais.

Além do potencial de aplicação, a literatura destaca que o reaproveitamento contribui diretamente para a mitigação dos riscos associados ao armazenamento em barragens. Martini et al. (2016) ressaltam que os volumes acumulados crescem de maneira acelerada, exigindo soluções que reduzam a necessidade de novas estruturas de contenção. Dessa forma, transformar rejeitos em insumos produtivos passa a representar estratégia tanto ambiental quanto econômica, pois diminui custos de disposição e amplia o ciclo de vida dos recursos minerais já extraídos.

Sob a perspectiva tecnológica, diferentes pesquisas nacionais têm demonstrado que o desempenho de materiais produzidos com rejeito pode atingir níveis compatíveis com exigências normativas, desde que haja controle adequado das variáveis de processamento. Souza e Guedes (2016) indicam que, em muitos casos, a incorporação do rejeito promove melhorias em propriedades físicas, como empacotamento granular e estabilidade volumétrica, reforçando a viabilidade do uso em componentes construtivos. Tal entendimento posiciona o reaproveitamento não apenas como alternativa ambiental, mas como oportunidade de inovação de produto.

Entretanto, autores como Andrade (2014) enfatizam que a variabilidade intrínseca do rejeito demanda protocolos rigorosos de caracterização, uma vez que diferenças de granulometria e composição química podem alterar significativamente o comportamento mecânico dos compósitos. Assim, a adoção industrial depende de estudos sistemáticos que garantam

previsibilidade de desempenho, rastreabilidade de resultados e aderência às especificações técnicas.

Complementarmente, pesquisas desenvolvidas em âmbito acadêmico, como as de Silveira (2015) e Oliveira (2019), demonstram que a incorporação de resíduos de mineração em artefatos de concreto pode reduzir a exploração de jazidas naturais e promover ganhos ambientais mensuráveis. Esses trabalhos reforçam que a integração entre mineração e construção civil constitui caminho promissor para consolidação de práticas alinhadas à sustentabilidade.

3.2 Uso da espiral de Humphrey para o tratamento do rejeito

A presença de quantidades significativas de ferro ainda recuperável nos rejeitos evidencia limitações históricas das rotas convencionais de beneficiamento. Diversos autores relatam que parte relevante do material descartado contém minerais úteis que poderiam retornar ao processo produtivo mediante tecnologias apropriadas. Dauce et al. (2019) destacam que as ineficiências operacionais acumuladas ao longo do circuito resultam na perda de frações valiosas, o que justifica o desenvolvimento de estratégias de reconcentração aplicadas especificamente aos rejeitos.

A concentração de minérios utilizando a espiral de Humphrey baseia-se no princípio da diferença de densidade entre partículas minerais. O equipamento promove o escoamento da polpa sobre uma calha helicoidal inclinada, onde as partículas mais densas tendem a se concentrar próximas à parte interna da espiral, enquanto as mais leves são arrastadas para as bordas externas pelo fluxo da água. Segundo Chaves (2010, p. 233), esse método apresenta boa eficiência na separação de partículas finas de ferro em rejeitos, permitindo um aproveitamento mais sustentável dos recursos minerais.

3.3 Uso do separador magnético de média intensidade para o tratamento do rejeito

O avanço das tecnologias de beneficiamento mineral tem possibilitado o retratamento de materiais anteriormente classificados como rejeitos, ampliando a recuperação de ferro e reduzindo perdas ao longo da cadeia produtiva. Nesse cenário, a separação magnética de média intensidade emerge como ferramenta essencial, sobretudo quando parte das partículas portadoras de ferro encontra-se liberada ou fracamente associada à ganga silicosa. Mendes e Silva (2023) destacam que o desenvolvimento de novas matrizes e configurações de campo

magnético tem sido fundamental para tornar economicamente viável a recuperação de frações finas antes descartadas.

Além da recuperação metálica propriamente dita, a aplicação do separador magnético produz um segundo efeito de grande interesse para propostas de reaproveitamento: a obtenção de um rejeito com menor teor de ferro. Essa modificação pode favorecer a estabilidade química e física do material quando destinado à construção civil. Conforme discutido em estudos de caracterização tecnológica, a composição mineralógica influencia diretamente propriedades como massa específica, absorção de água e comportamento mecânico, aspectos decisivos para o desempenho de artefatos de concreto.

Trabalhos desenvolvidos em âmbito acadêmico, como Lara (2020), indicam que a combinação entre liberação mineral adequada e intensidade de campo corretamente ajustada pode elevar substancialmente os índices de recuperação, mesmo em materiais de granulometria muito fina. Esses resultados demonstram que o rejeito deixa de ser um produto final inevitável e passa a constituir uma etapa intermediária dentro de um circuito potencialmente mais eficiente.

Contudo, a literatura também aponta limitações importantes. Quando o ferro se encontra intimamente associado à matriz de quartzo, a eficiência do campo magnético diminui, tornando necessárias etapas adicionais de cominuição ou classificação granulométrica. Referências clássicas de práticas laboratoriais em tratamento de minérios ressaltam que a seletividade do processo depende diretamente do grau de liberação, reforçando a necessidade de estudos prévios de caracterização.

Ainda assim, a integração entre separação gravimétrica e magnética vem sendo reconhecida como estratégia robusta para maximizar o aproveitamento do recurso mineral. Ao reduzir progressivamente o teor de ferro na fração descartada, abre-se caminho para aplicações que exigem maior controle composicional, como a produção de materiais de construção. Dessa forma, o separador magnético não apenas recupera valor econômico, mas também amplia o espectro de reutilização do resíduo.

3.4 Produção de blocos intertravados com o rejeito in natura

A incorporação direta do rejeito de mineração em artefatos de concreto tem sido amplamente investigada como alternativa para redução do consumo de agregados naturais. Pesquisas realizadas em diferentes instituições brasileiras demonstram que, quando devidamente

caracterizado, o material pode atuar como substituto parcial ou total da areia convencional. Souza e Guedes (2016) observaram que a utilização do rejeito resultou, em muitos casos, em desempenho satisfatório das misturas, indicando potencial de aplicação sem prejuízo significativo às propriedades mecânicas.

Estudos de caracterização mais detalhados, como os desenvolvidos por Andrade (2014), evidenciam que parâmetros como granulometria, forma das partículas e composição química exercem influência direta sobre a trabalhabilidade e a resistência dos compósitos. O autor ressalta que a presença de finos pode favorecer o empacotamento, mas também alterar a demanda de água da mistura, exigindo ajustes no traço. Assim, a viabilidade do uso do rejeito in natura está condicionada ao conhecimento aprofundado de suas características físicas.

Resultados semelhantes são relatados por Silveira (2015), que investigou a aplicação de resíduos de mineração em materiais cimentícios e constatou que a compatibilidade entre o rejeito e a matriz depende da adequação entre distribuição granulométrica e teor de ligante. A autora destaca que, quando essas variáveis são corretamente controladas, é possível alcançar resistências compatíveis com aplicações não estruturais, incluindo pavimentação intertravada.

Na pesquisa desenvolvida por Sant'Ana Filho (2013), blocos intertravados de concreto apresentaram resistência à compressão média de 42,5MPa, superando o valor mínimo exigido pela ABNT NBR 9781(2013), que estabelece 35MPa como limite inferior para esse tipo de material. Além disso, os blocos mostraram absorção de água de 5,6%, dentro do limite máximo de 6%. Tais resultados indicam a viabilidade técnica da utilização dos blocos estudados, servindo como parâmetro comparativo para o presente trabalho, que investigará a aplicação de rejeitos de mineração de minério de ferro na confecção de blocos intertravados de concreto para pavimentação.

No mesmo sentido, Oliveira (2019) aponta que a utilização do rejeito contribui para a sustentabilidade do setor da construção ao reduzir a extração de agregados naturais e diminuir a necessidade de áreas destinadas à disposição. Entretanto, a pesquisadora enfatiza que a adoção em escala industrial requer padronização de métodos de ensaio e controle de qualidade, garantindo repetibilidade dos resultados.

Adicionalmente, trabalhos envolvendo compósitos à base de resíduos demonstram que a variabilidade do material de origem pode ser compensada por estratégias de mistura e

beneficiamento simples. Essas abordagens permitem adaptar o rejeito às exigências de desempenho, ampliando o leque de aplicações possíveis. Dessa forma, a produção de blocos intertravados surge como alternativa promissora, especialmente em contextos que priorizam soluções de menor custo e menor impacto ambiental.

3.5 Ensaio e normas ABNT

A consolidação do uso de rejeitos de mineração em materiais de construção depende diretamente da confiabilidade dos procedimentos de caracterização. Antes de qualquer aplicação, torna-se indispensável assegurar que as amostras analisadas sejam representativas do lote estudado. Nesse contexto, publicações de referência em tratamento de minérios indicam que etapas como secagem, homogeneização, quarteamento e pulverização constituem pré-requisitos para obtenção de resultados reprodutíveis, em consonância com práticas padronizadas de preparação de amostras.

A análise química desempenha papel central na avaliação da aptidão do rejeito para diferentes finalidades. Trabalhos de caracterização, como o de Andrade (2014), demonstram que a quantificação dos principais óxidos permite prever o comportamento do material em matrizes cimentícias, além de indicar a necessidade de tratamentos prévios. A fluorescência de raios X é frequentemente citada como método preferencial devido à rapidez, precisão e capacidade multielementar, sendo amplamente adotada em estudos acadêmicos e industriais.

Sob a ótica normativa, a determinação da composição deve estar alinhada aos procedimentos descritos na ABNT NBR ISO 9516, que estabelece critérios para análise de minérios de ferro por pastilhas fundidas. A aplicação dessa norma assegura rastreabilidade metrológica e permite comparação direta com dados de literatura e especificações comerciais. Assim, a caracterização química não apenas descreve o material, mas fundamenta decisões sobre rotas de processamento e viabilidade de uso.

Paralelamente à composição, a distribuição granulométrica é variável determinante para o desempenho dos produtos finais. Silveira (2015) destaca que o empacotamento das partículas influencia porosidade, consumo de água e resistência mecânica, fatores essenciais na produção de artefatos de concreto. Dessa forma, ensaios granulométricos tornam-se ferramentas indispensáveis para ajuste de traço e controle de qualidade.

A adequação do rejeito como agregado deve ainda respeitar os limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211, que define requisitos relativos a impurezas, forma dos grãos e propriedades físicas. O enquadramento nesses parâmetros representa condição fundamental para que o material possa ser empregado em concretos destinados a pavimentação ou elementos pré-moldados.

Por fim, a validação do produto acabado requer a realização de ensaios mecânicos padronizados. Oliveira (2019) ressalta que a resistência à compressão constitui indicador primário da aplicabilidade de blocos intertravados, sendo utilizada para verificar a conformidade com critérios de desempenho. Nesse sentido, a ABNT NBR 9781 estabelece métodos específicos para avaliação de peças de pavimentação, permitindo comparar o material produzido com referências consolidadas no mercado.

Portanto, a integração entre caracterização química, controle granulométrico e ensaios mecânicos, conduzidos sob respaldo normativo, constitui etapa indispensável para transformar propostas de reaproveitamento em soluções tecnicamente legitimadas. A observância dessas normas garante confiabilidade aos resultados e favorece a aceitação do produto tanto pela comunidade científica quanto pelo setor produtivo.

A ABNT NBR 7211(2009) estabelece os requisitos técnicos para a utilização de agregados na produção de concreto, englobando aspectos como granulometria, limpeza, isenção de impurezas, substâncias nocivas e limites para contaminantes que possam comprometer a qualidade do concreto. Essa norma garante que os materiais empregados atendam a parâmetros de durabilidade, resistência mecânica e segurança estrutural, sendo aplicada tanto para agregados miúdos (areia) quanto graúdos (brita). Um dos pontos centrais da norma é a definição de limites de composição química e impurezas aceitáveis, assegurando que a presença de materiais como sulfatos, cloretos, argilas e matéria orgânica não prejudique o desempenho do concreto.

Abaixo, a Tabela 3.5.1 apresenta os principais limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211(2009) em relação à composição química e contaminantes dos agregados para concreto.

Tabela 3.5.1. Composição química e contaminantes dos agregados para concreto

Substância/Impureza	Limite Máximo Admitido pela NBR 7211(2009) em (%)
Material pulverulento (passante na peneira 75 μ m)	3% para brita / 5% para areia
Argila em torrões	0,25
Partículas friáveis	3
Cloretos (como Cl ⁻)	0,05
Sulfatos (como SO ₃)	0,1
Substâncias orgânicas nocivas	0

Fonte: Próprio Autor adaptado de ABNT NBR 7211(2009)

A ABNT NBR 9781(2013) estabelece os requisitos técnicos e critérios de desempenho para blocos intertravados de concreto, com o objetivo de assegurar qualidade, resistência e durabilidade. A norma define limites para propriedades físicas e mecânicas, como resistência à compressão, absorção de água e tolerâncias dimensionais, além de exigir integridade superficial e acabamento adequado para garantir o correto intertravamento no pavimento. Assim, seu cumprimento é essencial para assegurar o desempenho dos blocos em vias públicas, áreas de tráfego e aplicações urbanas. Como esquematizado na tabela 3.5.2

Tabela 3.5.2 Parâmetros definidos pela ABNT NBR 9781(2013)

Parâmetro	Exigência da norma
Resistência característica à compressão	≥ 35 MPa (para tráfego leve e pesado)
Absorção de água	$\leq 6\%$ em relação à massa seca
Dimensões e tolerâncias	± 3 mm (comprimento/largura) e ± 5 mm (espessura)
Integridade superficial	Sem fissuras, falhas ou lascas visíveis
Forma e acabamento	Faces e arestas regulares, garantindo bom intertravamento

Fonte: Próprio Autor adaptado de ABNT NBR 9781(2013)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

O rejeito de minério analisado será o rejeito da planta de Germano do grupo Samarco, esse rejeito foi classificado entre rejeito arenoso e rejeito argiloso em média correspondendo por 80% e 20% da massa total de rejeito respectivamente.

Cada um dos dois tipos de rejeito tem composições químicas, faixas granulométricas e aspectos distintos. O rejeito passou por procedimentos de quarteamento e divisão para que se garanta amostras para contraprova. Parte do rejeito, 570kg foram usados em natura para a produção de blocos intertravados nas dependências da empresa Pré-moldados Nunes, localizada em Ouro Branco, Mg.

A outra parte, 54,68kg foi tratado envolvendo o uso da espiral de Humphrey, Figuras 4.1 e 4.2, e por um separador magnético de média intensidade que usou bolas de moinho de diâmetros de 80 a 120mm como matriz magnética em proporção de 40% e 60% em volume, Figuras 4.3 e 4.4, no laboratório de processamento mineral no Departamento de Engenharia de Minas da UFOP.

Figura 4.1.1: Espiral de Humphrey



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.1.2: Bojo de coleta da espiral de Humphrey



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.1.3: Separador magnético de média intensidade



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.1.4: Matriz magnética usada no separador magnético de média intensidade



Fonte: Próprio Autor

4.2 Métodos

4.2.1 Caracterização do rejeito

4.2.1.1 Caracterização granulométrica do rejeito

A caracterização granulométrica do rejeito foi feita com 100g do rejeito em natura e uma série de peneiras com as aberturas explicitadas na Tabela 4.2.1.1 após a secagem do rejeito na estufa disponível no laboratório, a sequência de peneiras foi colocada sobre um aparato vibratório durante 10 minutos, após ser exposta à vibração o conteúdo retido em cada uma das peneiras é pesado em uma balança e os dados compilados na Tabela 4.2.1.1 e essa metodologia foi realizada para toda análise granulométrica realizada neste trabalho.

Tabela 4.2.1.1 Análise granulométrica do rejeito em natura

Descrição	Peneiras:														
	Massa(g)	2,38mm (g)	2,38mm (%)	1,16mm(g)	1,16mm (%)	0,59mm(g)	0,59mm(%)	0,3mm(g)	0,3mm(%)	0,15mm(g)	0,15mm(%)	0,063mm(g)	0,063mm(%)	Fundo(g)	Fundo(%)
Rejeito in Natura	100	0,01	0,01%	0,03	0,03%	0,01	0,01%	0,04	0,04%	20,1	20,10%	49,3	49,30%	30,51	30,51%

Fonte: Próprio autor

4.2.1.2 Caracterização química do rejeito

A caracterização química do rejeito foi feita com uma amostra de 100g de rejeito in natura através da técnica espectrometria por fluorescência de raios-X por técnicos da Samarco no laboratório de análises químicas da empresa e mediu os teores em massa de alguns metais e óxidos que compõem o rejeito como explicito na Tabelas 4.2.1.2.

Todas as análises químicas que foram realizadas neste trabalho buscam aferir os teores dos mesmos metais e óxidos e foram feitas com os mesmos métodos nas mesmas condições.

Tabela 4.2.1.2 Análise química do rejeito in natura

Descrição	Fe	SiO2	Al2O3	P	PPC	MnO	CaO	MgO	TiO2	Fech.
Rejeito in Natura	8,89	86,43	0,28	0,009	0,5	0,001	0,027	0,024	0,009	100

Fonte: Próprio Autor

4.2.2 Tratamento do rejeito na espiral de Humphrey

Segundo Chaves (2010), o desempenho da espiral concentradora está diretamente associado ao controle de variáveis hidrodinâmicas e operacionais que influenciam a estratificação das partículas ao longo da calha helicoidal. Entre as principais variáveis passíveis de manipulação destacam-se a percentagem de sólidos da polpa, responsável por controlar o regime de escoamento e a eficiência da separação; a vazão de alimentação (expressa em L/h ou t/h por 25 espiral), que interfere na espessura da lâmina de polpa e no tempo de residência das partículas; o volume de água de lavagem, regulado no topo da espiral, cuja função é promover a limpeza da banda de concentrado e intensificar a separação entre minerais pesados e leves; além da posição e do número de desviadores de fluxo (splitters), que definem os limites entre concentrado, mistos e rejeito. O autor também ressalta a necessidade de controle da estabilidade do circuito, incluindo constância da alimentação, limpeza das aberturas e manutenção das superfícies da espiral, uma vez que obstruções ou variações de vazão podem comprometer significativamente a eficiência do processo. Dessa forma, o desempenho do equipamento depende do ajuste integrado dessas variáveis, que governam o equilíbrio entre forças gravitacionais, centrífugas e de arraste hidráulico. Contudo, na espiral utilizada, apenas a percentagem de sólidos da polpa pôde ser efetivamente manipulada, mantendo-se constantes as demais condições operacionais do equipamento.

A etapa de concentração gravítica em espiral foi realizada a partir de uma massa total de 54,68 kg de rejeito proveniente das fases anteriores de preparação. O material foi inicialmente homogeneizado, em seguida secado e posteriormente quarteado, originando quatro frações representativas. Três dessas frações foram destinadas aos ensaios na espiral de Humphrey, enquanto a quarta permaneceu armazenada como amostra testemunho. A adoção desses procedimentos é fundamental para assegurar representatividade e reprodutibilidade, uma vez que a confiabilidade dos resultados metalúrgicos depende diretamente da correta preparação das amostras.

Em cada ensaio foram utilizados 13,67 kg de rejeito. O único parâmetro operacional variado foi a porcentagem de sólidos da polpa, mantendo-se constantes as demais condições de funcionamento do equipamento. Para a preparação da polpa foram adicionados 75,21 L de água, obtendo-se uma concentração de 25% de sólidos em massa.

A escolha dessa porcentagem encontra respaldo nos fundamentos da concentração gravítica, segundo os quais a eficiência do processo está associada à adequada estratificação das partículas em regime de escoamento laminar, permitindo que diferenças de densidade e tamanho governem as trajetórias dos grãos ao longo da espiral. De acordo com Chaves (2010), o desempenho dos equipamentos gravíticos depende do controle das variáveis hidrodinâmicas, especialmente da diluição da polpa, de modo a favorecer a separação seletiva entre minerais de interesse e ganga.

Cada teste teve duração de 1 hora e 30 minutos, tempo considerado suficiente para estabilização do fluxo e obtenção de produtos em quantidade representativa. Ao término de cada ensaio foram coletados separadamente o concentrado e o rejeito gerados, os quais passaram por secagem e pesagem, possibilitando a realização posterior de balanços de massa e cálculos de recuperação metalúrgica.

Para fins de caracterização química, foram retiradas alíquotas de 100 g de cada um dos três concentrados e dos três rejeitos obtidos. Essas amostras foram encaminhadas para análise de teor, enquanto o material restante foi mantido como contraprova e foi submetido à análise granulométrica, garantindo rastreabilidade e eventual repetição das determinações analíticas.

Com o propósito de avaliar a possibilidade de recuperação adicional de minerais ferromagnéticos ainda presentes nos produtos da concentração gravítica, foram separadas frações de 2 kg de cada massa (concentrados e rejeitos) para posterior tratamento em separador magnético de média intensidade. Essa abordagem está de acordo com a prática usual em usinas de beneficiamento, nas quais diferentes métodos de concentração podem ser aplicados de maneira complementar para maximizar o aproveitamento do bem mineral.

Dessa forma, os procedimentos experimentais adotados mantiveram consonância com os princípios clássicos do tratamento de minérios, priorizando controle operacional, representatividade amostral e geração de dados confiáveis para avaliação técnica do processo.

4.2.3 Tratamento do rejeito no separador magnético de média intensidade

Com o objetivo de avaliar a recuperação adicional de minerais portadores de ferro após a etapa de concentração gravítica, foram realizados ensaios em um separador magnético de média intensidade. Nessa fase experimental foram tratadas amostras correspondentes aos três

concentrados e três rejeitos gerados na espiral de Humphrey, além de uma amostra adicional de rejeito in natura, todas com massa individual de 2 kg.

A aplicação da separação magnética como etapa complementar é amplamente empregada em rotas de beneficiamento, sobretudo quando se busca maximizar o aproveitamento de minerais magnéticos remanescentes em produtos previamente concentrados por métodos gravíticos. Conforme descrito por Chaves (2010), a eficiência desse tipo de operação está associada à adequada interação entre intensidade de campo, características da matriz e propriedades magnéticas das partículas.

Para a realização dos testes, as amostras foram depositadas no bojo do equipamento, onde se encontrava instalada a matriz magnética composta por bolas de moinho com dois diâmetros distintos: 80 mm e 120 mm. A distribuição adotada foi de 60% de bolas de 80 mm e 40% de bolas de 120 mm, configuração que favorece a geração de gradientes de campo e amplia os pontos de captura de partículas suscetíveis magneticamente. A literatura técnica destaca que a presença de matrizes ferromagnéticas aumenta significativamente a probabilidade de retenção das partículas magnéticas, uma vez que promove a intensificação local do campo aplicado Chaves (2010).

O separador operou com corrente elétrica ajustada em 5 A. Após o acionamento do equipamento, aguardou-se um período de 1 minuto para estabilização do campo magnético antes do início da etapa de lavagem. Esse procedimento é importante para assegurar que as condições de separação atinjam regime permanente, reduzindo variações que possam comprometer a repetibilidade dos resultados.

Com o campo estabelecido, procedeu-se à lavagem do material presente no bojo, removendo-se as partículas não magnéticas até que não fosse mais visualizada a saída de sólidos carregados pela água. O material removido nessa etapa foi classificado como rejeito não magnético (fração não retida). Segundo princípios clássicos da separação magnética, as partículas com menor susceptibilidade tendem a ser arrastadas pelo fluxo hidráulico, enquanto aquelas fortemente influenciadas pelo campo permanecem presas à matriz.

Posteriormente, o equipamento foi desligado, eliminando a ação do campo magnético. Em seguida, realizou-se nova lavagem do interior do bojo para recuperação do material retido, constituindo o concentrado magnético. Ambos os produtos foram então secados para

determinação de massa, etapa fundamental para os cálculos de balanço e avaliação de desempenho do processo.

Após a secagem, concentrados e rejeitos foram submetidos à análise granulométrica, permitindo futuras correlações entre tamanho de partícula e resposta à separação. Adicionalmente, foram retiradas alíquotas de 100 g de cada fração para envio às análises químicas, mantendo-se o restante do material armazenado como contraprova.

O procedimento experimental adotado encontra respaldo nas práticas laboratoriais consolidadas para ensaios de separação magnética, nas quais o controle rigoroso das condições operacionais e a correta recuperação dos produtos são indispensáveis para obtenção de resultados confiáveis e comparáveis Chaves (2010).

4.2.4 Produção dos blocos intertravados

A produção dos blocos intertravados foi realizada em parceria com a Premoldados Nunes, empresa localizada no município de Ouro Branco. Os traços adotados foram definidos pela equipe técnica da empresa, tomando como base práticas industriais correntes para fabricação de artefatos de concreto vibroprensados e a meta de desempenho mecânico indicada na carta de traço, correspondente a resistência a compressão estimado de 35 MPa aos 28 dias.

A definição prévia do traço, como mostra a Tabela 4.2.4, por parte do parceiro industrial foi fundamental para garantir a aderência entre os resultados laboratoriais e as condições reais de produção, aproximando o estudo da aplicação prática e possibilitando futura transferência tecnológica.

Tabela 4.2.4 Traços produzidos

Traço	Cimento	Brita 0	Pó de pedra	Areia	Rejeito	Traço global
1ª batelada – parcial areia	1	0,88	3,56	0,44	0,66	01:05,5
2ª batelada – total areia	1	0,88	3,94	0	0,72	01:05,5
3ª batelada – parcial pó de pedra	1	0,88	2,77	0,72	1,17	01:05,5

Fonte: Próprio Autor adaptado de relatório da Pré-Moldados Nunes

Os blocos foram moldados em equipamento que opera segundo o princípio de compactação, no qual a mistura de concreto com baixa relação água/cimento é submetida simultaneamente à

vibração e à pressão mecânica, ilustrado na Figura 4.2.4. Esse procedimento promove elevado empacotamento das partículas, redução do índice de vazios e melhora do desempenho físico-mecânico, características essenciais para pavimentos intertravados.

Figura 4.2.4 Produção dos blocos intertravados



Fonte: Próprio Autor

Para cada formulação foram produzidas 100 unidades, permitindo quantidade suficiente para ensaios tecnológicos, contraprovas e eventuais repetições. Após a moldagem, os blocos seguiram os procedimentos usuais de cura adotados pela empresa.

4.2.5 Testes de compressão dos blocos produzidos

Os ensaios de resistência à compressão utilizando prensa hidráulica destinada ao rompimento de artefatos de concreto. O objetivo desta etapa foi avaliar o desenvolvimento da resistência mecânica dos blocos intertravados produzidos com os diferentes traços, bem como verificar a influência da substituição de agregados naturais por rejeito ao longo do tempo de cura.

Para cada formulação foram ensaiadas 15 unidades de cada traço e cada idade, totalizando três idades de ruptura: 7, 28 e 65 dias. Essa distribuição permitiu acompanhar a evolução da hidratação do cimento em curto, médio e prazo mais avançado, fornecendo base comparativa consistente entre os materiais.

O procedimento experimental consistiu na aplicação de carga monotônica crescente até a ruptura completa do bloco. Antes do ensaio, as superfícies de contato foram verificadas quanto à regularidade e ao correto posicionamento do corpo de prova na prensa, de modo a garantir alinhamento e transmissão uniforme dos esforços. A carga máxima registrada no momento do colapso foi utilizada para determinação da resistência à compressão.

A metodologia empregada seguiu as práticas recomendadas para peças destinadas à pavimentação intertravada. De maneira geral, tais procedimentos estabelecem que o carregamento deve ser aplicado de forma contínua e sem choques, assegurando que o valor obtido represente efetivamente a capacidade resistente do material. Além disso, a padronização do número de amostras por idade de cura contribui para a confiabilidade estatística dos resultados e para a comparação entre diferentes composições.

A condução do ensaio, o preparo das amostras, o posicionamento na prensa e a forma de obtenção da carga de ruptura foram realizados em consonância com as diretrizes estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, conforme preconizado na ABNT NBR 9781:2013, que define requisitos e métodos de ensaio aplicáveis às peças de concreto para pavimentação. Em termos gerais, essa norma orienta que a resistência deve ser determinada a partir da carga máxima suportada pela peça, garantindo uniformidade metodológica e rastreabilidade dos resultados.

Os valores obtidos nos ensaios foram posteriormente organizados em planilhas, possibilitando o cálculo de resistências médias e comparações entre traços e idades. Essas informações constituem a base para a avaliação do desempenho técnico dos blocos contendo rejeito frente ao material de referência.

5 Resultados e discussões

5.1 Caracterização granulométrica do rejeito tratado

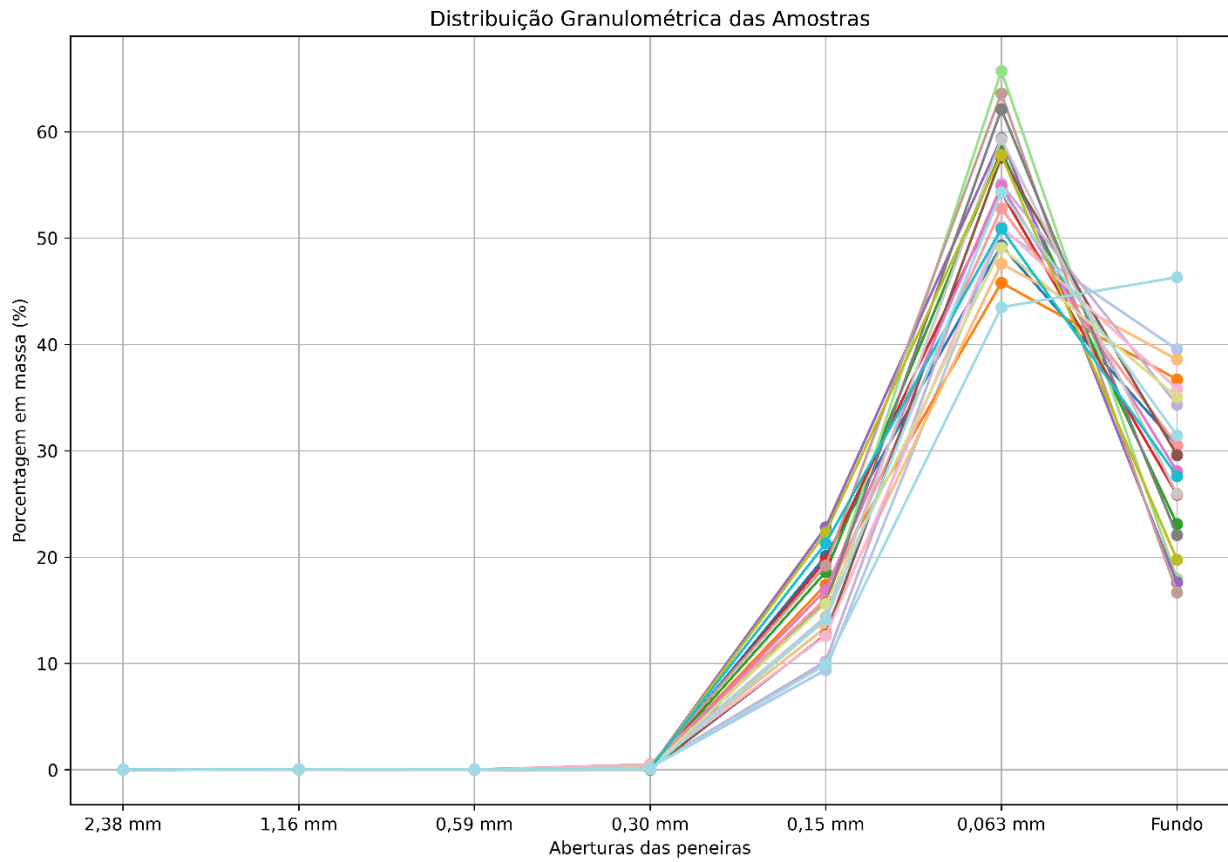
A Tabela 5.1 mostra a análise granulométrica do rejeito tratado feita através do método descrito em 4.2.1.1, A Figura 5.1.1 mostra a distribuição granulométrica das amostras e a Figura 5.1.2 é a legenda.

Tabela 5.1 Análise granulométrica do rejeito tratado e in natura

Descrição	Massa(g)	2,38mm (g)	2,38mm (%)	1,16mm(g)	1,16mm (%)	0,59mm(g)	0,59mm (%)	0,3mm(g)	0,3mm (%)	0,15mm(g)	0,15mm (%)	0,063mm(g)	0,063mm (%)	Fundo(g)	Fundo (%)
Rejeito in Natura	100	0,01	0,01%	0,03	0,03%	0,01	0,01%	0,04	0,04%	20,1	20,10%	49,3	49,30%	30,51	30,51%
Rejeito Espiral 1	100	0,01	0,01%	0,04	0,04%	0,01	0,01%	0,2	0,20%	9,4	9,40%	50,8	50,80%	39,54	39,54%
Concentrado Espiral 1	100	0,03	0,03%	0,03	0,03%	0,02	0,02%	0,01	0,01%	17,4	17,40%	45,8	45,80%	36,71	36,71%
Rejeito Espiral 2	100	0	0,00%	0,06	0,06%	0,03	0,03%	0,33	0,33%	13,4	13,40%	47,6	47,60%	38,58	38,58%
Concentrado Espiral 2	100	0,01	0,01%	0,04	0,04%	0,01	0,01%	0,03	0,03%	18,6	18,60%	58,2	58,20%	23,11	23,11%
Concentrado Espiral 3	100	0,02	0,02%	0,04	0,04%	0,03	0,03%	0,45	0,45%	15,8	15,80%	65,7	65,70%	17,96	17,96%
Rejeito Espiral 3	100	0	0,00%	0,05	0,05%	0,01	0,01%	0,07	0,07%	19,7	19,70%	54,3	54,30%	25,87	25,87%
Concentrado Magnético Concentrado Espiral 1	100	0,01	0,01%	0,03	0,03%	0,02	0,02%	0,51	0,51%	16,1	16,10%	52,8	52,80%	30,53	30,53%
Rejeito Magnético Concentrado Espiral 1	100	0	0,00%	0,03	0,03%	0,02	0,02%	0,12	0,12%	22,8	22,80%	59,4	59,40%	17,63	17,63%
Concentrado Magnético Rejeito Espiral 1	100	0,01	0,01%	0,04	0,04%	0,04	0,04%	0,28	0,28%	10,2	10,20%	55,1	55,10%	34,33	34,33%
Rejeito Magnético Rejeito Espiral 1	100	0	0,00%	0,03	0,03%	0,03	0,03%	0,04	0,04%	12,7	12,70%	57,6	57,60%	29,6	29,60%
Concentrado Magnético Concentrado Espiral 2	100	0,02	0,02%	0,07	0,07%	0,05	0,05%	0,38	0,38%	19,2	19,20%	63,6	63,60%	16,68	16,68%
Rejeito Magnético Concentrado Espiral 2	100	0,03	0,03%	0,03	0,03%	0,02	0,02%	0,06	0,06%	16,9	16,90%	54,9	54,90%	28,06	28,06%
Concentrado Magnético Rejeito Espiral 2	100	0,01	0,01%	0,05	0,05%	0,01	0,01%	0,42	0,42%	12,6	12,60%	51,1	51,10%	35,81	35,81%
Rejeito Magnético Rejeito Espiral 2	100	0	0,00%	0,03	0,03%	0,01	0,01%	0,07	0,07%	15,7	15,70%	62,1	62,10%	22,09	22,09%
Concentrado Magnético Concentrado Espiral 3	100	0,02	0,02%	0,05	0,05%	0,01	0,01%	0,26	0,26%	14,4	14,40%	59,3	59,30%	25,96	25,96%
Rejeito Magnético Concentrado Espiral 3	100	0,01	0,01%	0,03	0,03%	0,02	0,02%	0,08	0,08%	22,3	22,30%	57,8	57,80%	19,76	19,76%
Concentrado Magnético Rejeito Espiral 3	100	0	0,00%	0,04	0,04%	0,03	0,03%	0,19	0,19%	15,6	15,60%	49,1	49,10%	35,04	35,04%
Rejeito Magnético Rejeito Espiral 3	100	0,02	0,02%	0,03	0,03%	0,04	0,04%	0,1	0,10%	21,3	21,30%	50,9	50,90%	27,61	27,61%
Concentrado Magnético Rejeito in Natura	100	0,01	0,01%	0,05	0,05%	0,05	0,05%	0,17	0,17%	9,9	9,90%	43,5	43,50%	46,32	46,32%
Rejeito Magnético Rejeito in Natura	100	0,01	0,01%	0,03	0,03%	0,06	0,06%	0,06	0,06%	14,1	14,10%	54,3	54,30%	31,44	31,44%

Fonte: Próprio Autor

Figura 5.1.1 Gráfico de distribuição granulométrica das amostras



Fonte: Próprio Autor

Figura 5.1.2 Legenda do gráfico de distribuição granulométrica das amostras

- | | |
|---|---|
| ● Rejeito in Natura | ● Concentrado Magnético Concentrado Espiral 2 |
| ● Rejeito Espiral 1 | ● Rejeito Magnético Concentrado Espiral 2 |
| ● Concentrado Espiral 1 | ● Concentrado Magnético Rejeito Espiral 2 |
| ● Rejeito Espiral 2 | ● Rejeito Magnético Rejeito Espiral 2 |
| ● Concentrado Espiral 2 | ● Concentrado Magnético Concentrado Espiral 3 |
| ● Concentrado Espiral 3 | ● Rejeito Magnético Concentrado Espiral 3 |
| ● Rejeito Espiral 3 | ● Concentrado Magnético Rejeito Espiral 3 |
| ● Concentrado Magnético Concentrado Espiral 1 | ● Rejeito Magnético Rejeito Espiral 3 |
| ● Rejeito Magnético Concentrado Espiral 1 | ● Concentrado Magnético Rejeito in Natura |
| ● Concentrado Magnético Rejeito Espiral 1 | ● Rejeito Magnético Rejeito in Natura |
| ● Rejeito Magnético Rejeito Espiral 1 | |

Fonte: Próprio Autor

5.2 Análise química do rejeito tratado

A Tabela 5.2 apresenta a análise química das amostras de rejeito tratado e em natura executados como descrito no item 4.2.1.2.

Tabela 5.2 Análise química das amostras de rejeito tratado e em natura

Descrição	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PPC	MnO	CaO	MgO	TiO ₂	Fech.
Rejeito in Natura	8,89	86,43	0,28	0,009	0,5	0,001	0,027	0,024	0,009	100
Concentrado Espiral 1	5,37	91,88	0,11	0,007	0,25	0,001	0,029	0,034	0,003	100
Rejeito Espiral 1	4,79	92,85	0,03	0,007	0,2	0,001	0,017	0,036	0,001	100
Concentrado Espiral 2	5,71	91,4	0,13	0,008	0,23	0,001	0,021	0,037	0,001	100
Rejeito Espiral 2	5,5	91,53	0,14	0,009	0,38	0,001	0,023	0,045	0,001	100
Concentrado Espiral 3	19,5	71,35	0,14	0,01	0,54	0,003	0,023	0,032	0,014	100
Rejeito Espiral 3	4,33	93,37	0,16	0,007	0,19	0,001	0,023	0,051	0,002	100
Concentrado Magnético Concentrado Espiral 1	15,49	77,24	0,05	0,01	0,49	0,002	0,018	0,029	0,006	100
Rejeito Magnético Concentrado Espiral 1	1,06	98,38	0,01	0,004	0,04	0,001	0,015	0,026	0,001	100
Concentrado Magnético Rejeito Espiral 1	18,25	73,17	0,11	0,01	0,55	0,003	0,025	0,019	0,013	100
Rejeito Magnético Rejeito Espiral 1	4,71	92,76	0,14	0,008	0,28	0,001	0,026	0,038	0,002	100
Concentrado Magnético Concentrado Espiral 2	17,09	74,9	0,05	0,011	0,55	0,001	0,019	0,019	0,007	100
Rejeito Magnético Concentrado Espiral 2	2,29	96,1	0,01	0,005	0,58	0,001	0,014	0,003	0,001	99,99
Concentrado Magnético Rejeito Espiral 2	3,97	94,1	0,01	0,006	0,13	0,001	0,018	0,001	0,001	99,95
Rejeito Magnético Rejeito Espiral 2	2,14	96,8	0,06	0,006	0,07	0,001	0,019	0,025	0,001	100,05
Concentrado Magnético Concentrado Espiral 3	19,77	71,6	0,06	0,011	0,05	0,002	0,018	0,017	0,01	100,05
Rejeito Magnético Concentrado Espiral 3	3,25	95,1	0,15	0,005	0,1	0,001	0,017	0,001	0,001	100,03
Concentrado Magnético Rejeito Espiral 3	22,62	66,9	0,08	0,011	0,58	0,005	0,018	0,001	0,018	99,97
Rejeito Magnético Rejeito Espiral 3	3,22	95,19	0,04	0,006	0,11	0,001	0,017	0,011	0,001	99,99
Concentrado Magnético Rejeito in Natura	28,75	94,15	0,17	0,015	0,86	0,012	0,029	0,001	0,029	100,02
Rejeito Magnético Rejeito in Natura	3,31	94,7	0,17	0,007	0,27	0,001	0,02	0,031	0,001	99,94

Fonte: Próprio Autor adaptado do relatório enviado pela Samarco

5.3 Testes de compressão dos blocos

5.3.1 Substituição parcial de areia

A Tabela 5.3.1.1 apresenta os resultados dos testes de compressão de 15 corpos de prova com tempo de cura do concreto de 7, 28 e 65 dias respectivamente, seguindo a metodologia citada no item 4.2.5.

Tabela 5.3.1.1 Resultados de teste de compressão dos blocos produzidos com substituição parcial de areia

7 dias de cura		28 dias de cura		65 dias de cura	
CP	TR (MPa)	CP	TR (MPa)	CP	TR (MPa)
1	31,7	16	20,5	31	25,5
2	36,7	17	24,8	32	32,5
3	33,9	18	34,1	33	24,8
4	28,8	19	29,6	34	27,5
5	36	20	26	35	27,5
6	42,2	21	38,8	36	30,5
7	34,5	22	33,7	37	28,5
8	39,6	23	19,5	38	28,9
9	31,9	24	25	39	22,7
10	27,4	25	33,4	40	29,6
11	22,2	26	26,6	41	27
12	28,4	27	27,1	42	29,6
13	21,2	28	39,1	43	28,2
14	28,6	29	39,1	44	35,4
15	27,3	30	33,2	45	27,9
Médias (MPa):		31,36	30,033	28,407	

Fonte: Próprio Autor adaptado do relatório feito pela Pré-moldados Nunes

5.3.2 Substituição total de areia

A Tabela 5.3.2.1 apresenta os resultados dos testes de compressão de 15 corpos de prova com tempo de cura do concreto de 7, 28 e 65 dias respectivamente, seguindo a metodologia citada no item 4.2.5.

Tabela 5.3.2.1 Resultados de teste de compressão dos blocos produzidos com substituição total de areia.

7 dias de cura		28 dias de cura		65 dias de cura	
CP	TR (MPa)	CP	TR (MPa)	CP	TR (MPa)
1	24,9	16	26,1	31	27,8
2	21,9	17	23,5	32	28
3	20,7	18	26,1	33	26,7
4	15,8	19	34,7	34	27,4
5	22,5	20	25,1	35	38,3
6	24,4	21	28,6	36	28,8
7	17,5	22	35,1	37	28,9
8	22,9	23	29,8	38	38
9	23,2	24	25,6	39	29,8
10	22,6	25	23,6	40	27
11	15,8	26	28,7	41	31,6
12	21,6	27	29,1	42	36,7
13	19,8	28	34,3	43	27,9
14	24,6	29	43,9	44	27,7
15	35,4	30	26,5	45	27
Médias (MPa):	22,24		29,38		30,107

Fonte: Próprio Autor adaptado do relatório feito pela Pré-moldados Nunes

5.3.3 Substituição parcial de pó de pedra

A Tabela 5.3.3.1 apresenta os resultados dos testes de compressão de 15 corpos de prova com tempo de cura do concreto de 7, 28 e 65 dias respectivamente, seguindo a metodologia citada no item 4.2.5.

Tabela 5.3.3.1 Resultados de teste de compressão dos blocos produzidos com substituição parcial de pó de pedra

7 dias de cura		28 dias de cura		65 dias de cura	
CP	TR (MPa)	CP	TR (MPa)	CP	TR (MPa)
1	33,3	16	24,4	31	27,1
2	38,5	17	32,2	32	27,7
3	30,4	18	27,6	33	31,4
4	31,2	19	42,6	34	28,4
5	33,6	20	27,1	35	31,5
6	27,5	21	47,9	36	27,7
7	33,7	22	17,5	37	26,1
8	21,3	23	29,1	38	33,5
9	23,4	24	33,1	39	37,8
10	40,2	25	23,3	40	29,9
11	33,6	26	37	41	30,8
12	29,2	27	45,8	42	34,1
13	36,2	28	24,8	43	28
14	36,6	29	34,8	44	28
15	29,3	30	26,7	45	19,4
Médias (MPa):		31,867	31,593	29,427	

Fonte: Próprio Autor adaptado do relatório feito pela Pré-moldados Nunes

5.4 Discussão sobre a rota de tratamento adotada

A rota de tratamento proposta neste trabalho baseou-se na aplicação sequencial de concentração gravítica em espiral de Humphrey, seguida por separação magnética de média intensidade, com o objetivo de promover simultaneamente a recuperação de ferro e a adequação do rejeito remanescente para utilização na construção civil. A análise integrada dos resultados granulométricos (item 5.1) e químicos (item 5.2) permite compreender o impacto de cada etapa do processo e justificar tecnicamente a escolha dessa estratégia.

Os dados apresentados na Tabela 5.1 evidenciam modificações na distribuição granulométrica do material após o tratamento. Observa-se tendência de redução da fração associada aos

minerais mais densos nos produtos destinados ao reaproveitamento, indicando que parte significativa das partículas ricas em ferro foi removida ao longo do circuito. Esse comportamento é coerente com o princípio de funcionamento das espirais concentradoras, nas quais a ação combinada da gravidade, da força centrífuga e do arraste hidráulico promove a migração diferencial das partículas conforme densidade e tamanho.

Na literatura especializada em práticas laboratoriais de tratamento de minérios, ressalta-se que a eficiência da separação em espirais está diretamente associada à capacidade de promover estratificação hidrodinâmica da polpa, favorecendo a concentração de minerais pesados e a rejeição de materiais leves Chaves (2010). Assim, os resultados obtidos confirmam que a etapa gravítica atuou como um processo de pré-concentração, retirando parcela expressiva do ferro antes da aplicação do campo magnético.

A avaliação química apresentada na Tabela 5.2 reforça essa interpretação. Nota-se que os teores de ferro nos concentrados aumentam em relação ao material de alimentação, enquanto os rejeitos apresentam redução relativa desse elemento. Esse comportamento demonstra que a espiral foi capaz de gerar correntes diferenciadas quanto à composição mineralógica, preparando o material para uma etapa subsequente mais seletiva.

A introdução da separação magnética após a concentração gravítica mostrou-se particularmente estratégica. Em circuitos de beneficiamento, a combinação entre métodos físicos distintos é frequentemente utilizada para elevar a eficiência global, explorando diferentes propriedades das partículas. Conforme discutido por Chaves (2010), a presença de matrizes ferromagnéticas em separadores de média intensidade aumenta a probabilidade de captura das partículas suscetíveis, intensificando o gradiente de campo e permitindo a recuperação de frações que não foram totalmente separadas por métodos densitários.

Nesse contexto, a etapa magnética atuou como polimento do processo, removendo minerais ainda portadores de ferro presentes tanto nos concentrados quanto nos rejeitos da espiral. A consequência direta é a geração de dois ganhos simultâneos: aumento da recuperação metálica e obtenção de um resíduo final com menor teor de ferro, condição desejável para aplicações em concreto.

A redução do conteúdo de ferro no material destinado à fabricação dos blocos é relevante porque influencia propriedades como massa específica, absorção de água e empacotamento das

partículas. Ao tornar o agregado mais estável e previsível, melhora-se a compatibilidade com os requisitos tecnológicos exigidos para artefatos de pavimentação.

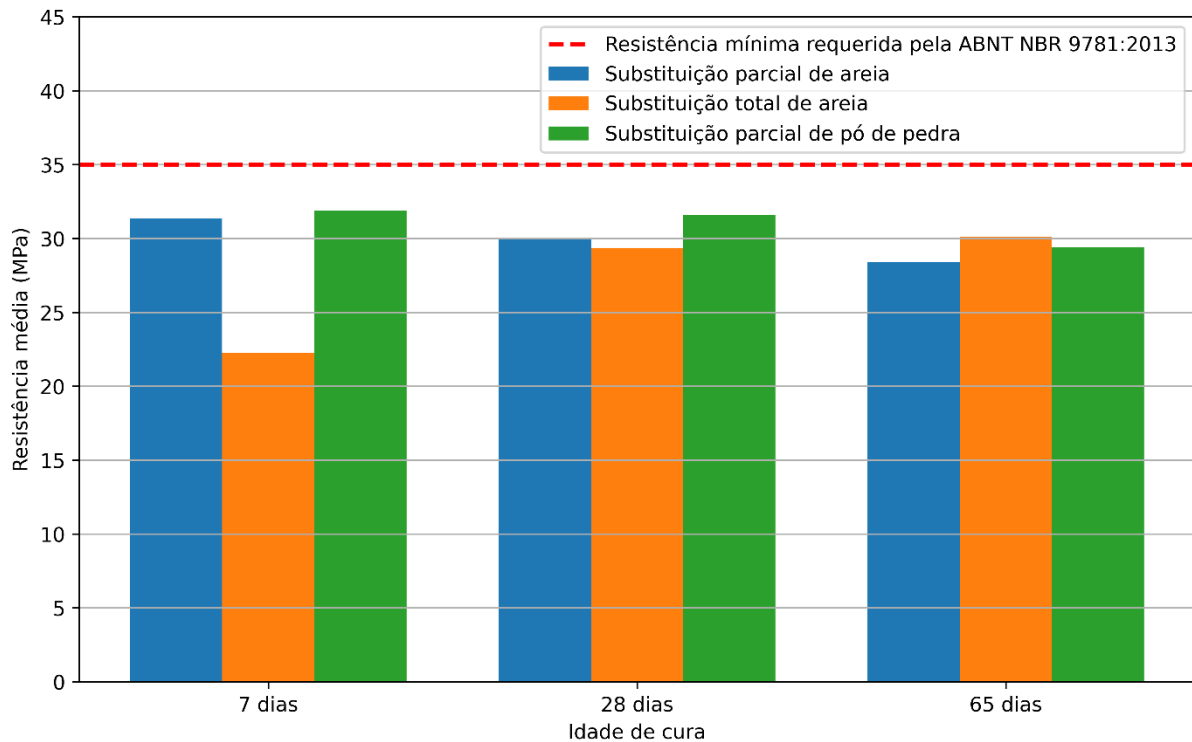
Outro aspecto importante refere-se à lógica de aproveitamento máximo do recurso mineral. Ao empregar inicialmente um método de menor custo operacional e elevada capacidade volumétrica, como a espiral, reduz-se a carga sobre o separador magnético, que passa a atuar em correntes mais enriquecidas e, portanto, com maior probabilidade de sucesso na captura das partículas remanescentes.

Portanto, a interpretação conjunta das Tabelas 5.1 e 5.2 demonstra que a rota adotada apresentou coerência técnica e aderência aos fundamentos clássicos do beneficiamento mineral. A espiral promoveu a separação primária baseada em densidade, enquanto o separador magnético complementou o processo por meio da susceptibilidade magnética, configurando uma estratégia integrada capaz de transformar rejeitos em insumos com potencial de aplicação industrial.

5.5 Discussão sobre a viabilidade dos blocos produzidos

Os resultados apresentados no item 5.3 evidenciam o comportamento mecânico dos blocos intertravados produzidos com a incorporação do rejeito tratado ao longo da rota proposta. Observa-se que, embora tenha ocorrido ganho de resistência com a evolução da idade de cura, os valores médios obtidos permanecem abaixo do patamar mínimo requerido para fins de comercialização segundo as normas brasileiras aplicáveis a peças de pavimentação que é 35MPa como é explicitado na Figura 5.5.

Figura 5.5 Gráfico das médias de resistências dos blocos



Fonte: Próprio Autor

A resistência à compressão constitui o principal parâmetro de aceitação tecnológica para blocos intertravados, pois está diretamente relacionada à capacidade de suporte de cargas e à durabilidade do pavimento em serviço. As normas técnicas nacionais estabelecem valores mínimos que devem ser atendidos em função da classe de utilização, de modo a assegurar desempenho adequado frente às solicitações do tráfego.

Ao comparar os resultados obtidos neste trabalho com aqueles reportados por Sant'Ana Filho (2013), observa-se diferença significativa de desempenho. Em seu estudo, o autor verificou que a adição controlada de resíduos de minério promoveu aumento de densidade e redução de porosidade, resultando em resistências médias superiores a 50 MPa, valor compatível com aplicações severas e tráfego pesado. O ganho mecânico foi atribuído principalmente ao chamado efeito filler, no qual partículas finas ocupam vazios da matriz cimentícia, promovendo empacotamento mais eficiente.

No presente trabalho, apesar de a substituição de agregados também ter buscado esse mecanismo, os resultados indicam que o empacotamento alcançado ainda não foi suficiente

para atingir o desempenho normativo. Tal fato pode estar relacionado a variáveis como distribuição granulométrica, teor de finos, umidade de moldagem, energia de compactação ou mesmo ao grau de interação entre pasta e agregado.

A literatura demonstra que pequenas alterações na proporção entre partículas miúdas e graúdas podem produzir impactos relevantes na resistência final do concreto vibroprensado. Sant’Ana Filho (2013) ressalta que a otimização do traço e do processo de compactação é determinante para redução da porosidade e conseqüente elevação da resistência. Dessa forma, os resultados aqui obtidos sugerem que a rota de tratamento mineral foi eficaz em melhorar a qualidade do resíduo, porém ainda demanda ajustes tecnológicos na etapa de formulação do concreto.

Do ponto de vista normativo, a não obtenção da resistência média mínima implica que os blocos não podem ser destinados ao mercado consumidor. As especificações da ABNT NBR 9781:2013 estabelecem critérios objetivos de aceitação que visam garantir segurança estrutural e desempenho em campo. Assim, mesmo que os blocos apresentem viabilidade ambiental e potencial econômico, sua aplicação comercial depende obrigatoriamente do atendimento integral a esses requisitos.

É importante destacar que o fato de não atingir o valor exigido não invalida a pesquisa. Pelo contrário, evidencia que a rota proposta representa uma etapa inicial de desenvolvimento tecnológico, na qual a comprovação de tendência de ganho de resistência ao longo da cura já constitui resultado relevante. Demonstra-se que o material possui potencial, mas requer otimização adicional.

Portanto, a análise comparativa com a literatura indica que o caminho para viabilização comercial envolve aprimoramento do empacotamento granulométrico, eventual ajuste do consumo de cimento, controle mais rigoroso da umidade e aumento da energia de vibrocompactação. A partir dessas melhorias, é plausível esperar aproximação dos valores mínimos

6 Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade de utilização de rejeitos de minério de ferro, previamente submetidos a uma rota de beneficiamento composta por concentração gravítica em espiral de Humphrey seguida de separação magnética de média intensidade, como matéria-prima alternativa na produção de blocos intertravados de concreto.

Os resultados demonstraram que a rota mineral adotada foi tecnicamente coerente com os fundamentos clássicos do tratamento de minérios, promovendo a remoção progressiva de frações ricas em ferro e contribuindo para a obtenção de um material com características mais compatíveis com aplicações na construção civil. A etapa gravítica atuou como pré-concentração, enquanto a separação magnética exerceu função complementar de polimento, ampliando o aproveitamento do recurso mineral e reduzindo o teor de contaminantes indesejáveis no resíduo final.

Do ponto de vista da aplicação tecnológica, os blocos produzidos apresentaram evolução de resistência com o aumento da idade de cura, confirmando o potencial de interação entre o resíduo tratado e a matriz cimentícia. Entretanto, as resistências médias observadas permaneceram abaixo dos valores mínimos exigidos para comercialização segundo os critérios estabelecidos pelas normas brasileiras aplicáveis às peças de pavimentação.

A comparação com estudos da literatura evidencia que desempenhos superiores são possíveis quando se alcança melhor empacotamento granulométrico e maior eficiência de compactação, fatores que reduzem a porosidade e aumentam a densidade do material. Assim, entende-se que a limitação verificada não decorre da inviabilidade do uso do rejeito, mas sim da necessidade de otimização dos parâmetros de dosagem e processamento.

Dessa forma, conclui-se que a pesquisa cumpriu seu papel ao comprovar que o resíduo possui potencial técnico real para aplicação em artefatos de concreto, ainda que ajustes adicionais sejam necessários para o pleno atendimento normativo. O estudo também reforça a relevância ambiental da proposta, ao indicar alternativa concreta para redução do passivo de barragens e substituição parcial de agregados naturais.

Por fim, a rota investigada representa base promissora para desenvolvimentos futuros, nos quais melhorias no controle granulométrico, na energia de vibrocompactação e na formulação dos traços poderão conduzir ao alcance dos níveis de resistência requeridos pelo mercado. Assim,

o trabalho abre caminho para avanços que aproximam a engenharia mineral da economia circular

7 Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados obtidos nesta pesquisa demonstraram que a rota de tratamento mineral aplicada ao rejeito apresenta capacidade de modificar suas características físicas e químicas, tornando-o mais compatível com aplicações na construção civil. Entretanto, também ficou evidente que a transposição do processo para uma condição de produção industrial exige avanços adicionais, sobretudo no que se refere à disponibilidade de volume de material tratado e à otimização dos parâmetros de dosagem dos concretos.

Nesse sentido, recomenda-se como continuidade do estudo a implementação de uma investigação em escala piloto ou semi-industrial, capaz de processar quantidades significativamente superiores de rejeito. Tal abordagem permitiria avaliar a estabilidade operacional da rota, a reprodutibilidade dos resultados e a viabilidade logística de fornecimento contínuo de agregado tratado para a fabricação de blocos intertravados. Além disso, a ampliação de escala possibilitaria ajustes finos de granulometria, umidade e empacotamento de partículas, fatores diretamente relacionados ao desempenho mecânico dos artefatos.

Outro desdobramento relevante refere-se ao aproveitamento dos concentrados de minério de ferro recuperados nas etapas de concentração gravítica e magnética. Embora nesta pesquisa o foco principal tenha sido a qualificação do rejeito para uso em concreto, os produtos enriquecidos em ferro representam uma fração de valor metalúrgico que merece investigação específica.

Dessa forma, sugere-se o desenvolvimento de estudos voltados à caracterização física, química e metalúrgica desses concentrados, com vistas à sua aplicação na produção de aglomerados para a siderurgia, como briquetes, sinter feed ou pelotas. Avaliações de redutibilidade, resistência mecânica, degradação sob aquecimento e comportamento em atmosferas redutoras poderiam indicar a adequação desse material para utilização em processos de alto-forno.

A integração entre o reaproveitamento do rejeito na construção civil e a valorização metalúrgica do concentrado configura uma estratégia alinhada aos princípios da sustentabilidade industrial. Tal abordagem maximiza o aproveitamento do recurso mineral, reduz a necessidade de disposição em barragens e contribui para a geração de novos fluxos de receita.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211:2009 – Agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9781:2013

– Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 9516: Minérios de ferro — Determinação de vários elementos por espectrometria de fluorescência de raios X por pastilha fundida. Rio de Janeiro, 2019.

ANDRADE, LUANA. Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil. [dissertation]. Federal University of Viçosa; 2014.

CARMIGNANO, O. R. et al. Iron ore tailings characterization and applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021.

CHAVES, Arthur Pinto. Tratamento de minérios: práticas laboratoriais. 5. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

DAUCE, P. D.; ROCHA, G. M.; LIMA, M. M. F.; LIMA, R. M. F. Concentração de rejeito de circuito de jigagem de minério de ferro por espiral de Humphreys. In: ENTMME, 2017.

LARA, L. F. S. Estudos de recuperação de ferro em rejeitos por separação magnética. [dissertation]. Federal Center for Technological Education of Minas Gerais; 2025.

MARTINI, Rachel J. et al. Deposição de rejeitos de minério de ferro em reservatórios: aspectos geotécnicos e ambientais. *Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, Taubaté, v. 11, n. 3, p. 1-14, 2016.

MENDES, Marcelo Ferreira; SILVA, André Carlos. Redução do teor de ferro no rejeito por separação magnética utilizando matrizes de alta eficiência. *Revista Foco*, v. 16, n. 7, 2023.

OLIVEIRA, M. S. Aproveitamento de resíduos de mineração em artefatos de concreto. Trabalho acadêmico. Federal Center for Technological Education of Minas Gerais; 2019.

SANT'ANA FILHO, JN. Estudos de reaproveitamento de resíduos das barragens de minério de ferro para uso na pavimentação de rodovias e fabricação de blocos intertravados [dissertation]. Federal Center for Technological Education of Minas Gerais; 2013.

SILVEIRA, M. D. Utilização de resíduos de mineração na construção civil. Dissertação – UFMG, 2015.

SOUZA, J.; GUEDES, M. O rejeito de minério de ferro e suas aplicações na construção civil. IX SBEA, 2017.