

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

Marlo Souza Duarte

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO MECÂNICO E DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA  
NO DESEMPENHO DO REJEITO DA MINERAÇÃO DE FERRO COMO MATERIAL  
CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR**

Belo Horizonte  
Agosto, 2021

Marlo Souza Duarte

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO MECÂNICO E DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA  
NO DESEMPENHO DO REJEITO DA MINERAÇÃO DE FERRO COMO MATERIAL  
CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Tecnologia na Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Teresa  
Paulino Aguilár

Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sofia Araújo  
Lima Bessa

Co-orientador: Prof. Dr. Augusto Cesar da  
Silva Bezerra

Belo Horizonte

2021

D812i

Duarte, Marlo Souza.

Influência do tratamento mecânico e da separação magnética no desempenho do rejeito da mineração de ferro como material cimentício suplementar [recurso eletrônico] / Marlo Souza Duarte. – 2021.

1 recurso online (69 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Maria Teresa Paulino Aguiar.

Coorientadores: Sofia Araújo Lima Bessa, Augusto Cesar da Silva Bezerra.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 57-69.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses. 3. Minérios de ferro - Teses. 4. Resíduos de mineração - Teses. 5. Separação magnética de minério - Teses. I. Aguiar, Maria Teresa Paulino. II. Bessa, Sofia Araújo Lima. III. Bezerra, Augusto Cesar da Silva. IV. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. V. Título.

CDU: 691(043)

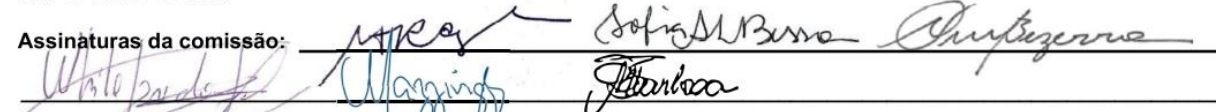
ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL Nº: 223, do aluno **MARLO SOUZA DUARTE**

Às dez horas do dia nove de agosto de dois mil e vinte e um, reuniu-se, por meio de sistema de interação de áudio e vídeo em tempo real, a Comissão Examinadora de Dissertação de Mestrado, aprovada *ad referendum* pela Coordenação do Colegiado do Curso de Mestrado em Construção Civil - EE.UFMG, para julgar, em exame final, o trabalho intitulado **INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO MECÂNICO E DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA NO DESEMPENHO DO REJEITO DA MINERAÇÃO DE FERRO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR**, requisito final para a obtenção do Grau de Mestre em Construção Civil na área de Tecnologia na Construção Civil. Abrindo a sessão, a Presidente da Comissão, Profa. Dra. **Maria Teresa Paulino Aguilár**, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra ao candidato para apresentação do seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Logo após, sem a participação do candidato na transmissão, houve o julgamento e expedição do resultado final pela Comissão. Foram atribuídas as seguintes indicações (aprovado ou reprovado):

<b>PROFA. MARIA TERESA PAULINO AGUILAR</b>	( X )	APROVADO	( )	REPROVADO
<b>PROFA. SOFIA ARAÚJO LIMA BESSA</b>	( X )	APROVADO	( )	REPROVADO
<b>PROF. AUGUSTO CÉSAR DA SILVA BEZERRA</b>	( X )	APROVADO	( )	REPROVADO
<b>PROF. WHITE JOSÉ DOS SANTOS</b>	( X )	APROVADO	( )	REPROVADO
<b>PROF. DOUGLAS BATISTA MAZZINGHY</b>	( X )	APROVADO	( )	REPROVADO
<b>PROFA. MARIA TERESA GOMES BARBOSA</b>	( X )	APROVADO	( )	REPROVADO

Pelas indicações dos membros acima, o candidato foi considerado **APROVADO**. Caso tenham sido sugeridas correções no trabalho, conforme pareceres anexos, o candidato terá o prazo máximo de 60 (sessenta) dias para efetuá-las e entregar a versão final da dissertação à Secretaria do Curso de Mestrado em Construção Civil. O resultado final foi comunicado ao candidato pela Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, a Presidente encerrou a transmissão e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora. Belo Horizonte, nove de agosto de dois mil e vinte e um.

Assinaturas da comissão:



Obs.: Este documento não terá validade sem a assinatura e carimbo da Coordenação do Curso de Mestrado em Construção Civil.

\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Eduardo Chahud**  
Coordenador do Curso de Mestrado em Construção Civil

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus orientadores, Maria Teresa Paulino Aguilár, Sofia Araújo Lima Bessa e Augusto Cesar da Silva Bezerra por minha formação como pesquisador. Também, agradeço a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) por oferecerem a infraestrutura necessária para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

Apesar da grande importância da mineração de ferro na economia brasileira e da otimização dos processos de produção, volumes expressivos de rejeitos com elevado teor de ferro são gerados no processo de beneficiamento do minério. Esse rejeito, composto majoritariamente por ferro e silício e de granulometria mais fina que da areia natural de rio, vem sendo utilizado para a produção de materiais destinados à construção civil. Mesmo com a elevada cristalinidade, estudos mostram que o rejeito de minério de ferro (RMF) pode ser utilizado como material cimentício suplementar (MCS). A literatura ainda apresenta que a redução no tamanho das partículas pode aumentar a reatividade de um material. Neste contexto, este trabalho analisa a influência do tratamento mecânico e da separação magnética no desempenho do RMF como MCS. Para tal, foi avaliado o desempenho de compostos cimentícios (pastas e argamassas para fins estruturais) produzidos com e sem substituição de 15% do cimento por RMF. Foi utilizado o rejeito *in natura* (como coletado) e o rejeito submetido à separação magnética e/ou tratamento mecânico, que foram caracterizados em cada condição, em relação às suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. Pastas cimentícias foram moldadas para análises térmicas de calorimetria de condução isotérmica e termogravimetria. O desempenho das argamassas foi avaliado quanto à trabalhabilidade, porosidade aberta e absorção de água por imersão, calor de hidratação, resistividade elétrica e resistência à compressão aos 28 e 91 dias. Também se analisou a viabilidade de se reprocessar o material residual rico em ferro, procedente da separação magnética. Os resultados mostraram que, mesmo com a moagem secundária, os rejeitos não apresentaram atividade pozolânica. De modo geral, na trabalhabilidade, porosidade aberta e absorção de água, a influência do rejeito após a tratamento mecânico e/ou separação magnética foi semelhante ao rejeito *in natura*. O rejeito com separação magnética e moagem secundária influenciou no calor de hidratação, devido ao maior efeito de nucleação, em relação aos outros rejeitos. Para essa amostra, maior resistência à compressão foi alcançada entre as amostras produzidas com RMF. O material residual rico em ferro, ao ser submetido a um processo de flotação, produziu um material com características economicamente interessantes.

**Palavras-chave:** Rejeito da Mineração de Ferro. Tratamento Mecânico. Separação Magnética. Material Cimentício Suplementar.

## ABSTRACT

Despite the great importance of iron mining in the Brazilian economy and the optimization of production processes, significant volumes of tailings with high iron content are generated in the ore processing. This tailing, composed mostly of iron and silicon and with a finer grain size than natural river sand, has been used for the production of materials for civil construction. Even with its high crystallinity, studies show that iron ore tailing (IOT) can be used as a supplementary cementitious material (SCM). The literature also shows that particle size reduction can increase the reactivity of a material. In this context, this work analyzes the influence of mechanical treatment and magnetic separation on the performance of IOT as SCM. The performance of cementitious compounds (pastes and mortars for structural purposes) produced with and without replacement of 15% of cement by IOT was evaluated. *In natura* tailings (as collected) and tailings submitted to magnetic separation and/or mechanical treatment were used, which were characterized in each condition, in relation to their physical, chemical and mineralogical properties. Cementitious pastes were molded for thermal analysis by isothermal conduction calorimetry and thermogravimetry. The performance of the mortars was evaluated regarding workability, open porosity and water absorption by immersion, electrical resistivity and compressive strength at 28 and 91 days. The feasibility of reprocessing the iron-rich waste material originated from magnetic separation was also analyzed. The results showed that, even with secondary grinding, the tailings did not show pozzolanic activity. In general, in the workability, open porosity and water absorption, the influence of the tailings after mechanical treatment and/or magnetic separation was similar to the *in natura* tailings. The tailing with magnetic separation and secondary grinding influenced the heat of hydration, due to the greater nucleation effect, compared to other tailings. For this sample, greater compressive strength was achieved among the samples produced with IOT. The iron-rich waste material, when subjected to a flotation process, produced a material with economically interesting characteristics.

**Keywords:** Iron ore tailings. Mechanical Treatment. Magnetic Separation. Supplementary Cement Material.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Localização e limites do Quadrilátero Ferrífero.....	15
Figura 3.2 - Planta de beneficiamento do minério de ferro.....	16
Figura 4.1 - Programa experimental da pesquisa.....	25
Figura 4.2 - Redução da granulometria em função do tempo de moagem. ....	27
Figura 4.3 - Esquema de flotação mineral.....	32
Figura 5.1 - Fotos das amostras a) Rejeito in natura (IN), b) Rejeito in natura moagem primária (INMP), c) Rejeito rico em sílica moagem primária (RSMP) d) Rejeito rico em sílica moagem secundária (RSMS). ....	34
Figura 5.2 - Foto do material residual rico em ferro.....	35
Figura 5.3 - Difratoograma de raios-X dos rejeitos.....	36
Figura 5.4 - Curvas de distribuição granulométrica dos rejeitos.....	37
Figura 5.5 - Imagens de MEV-BSE dos rejeitos a) in natura (IN), in natura moagem primária (INMP), rico em sílica moagem primária (RSMP), rico em sílica moagem secundária (RSMS). ....	38
Figura 5.6 - Fluxo de calor das pastas de referência e com RMF. ....	40
Figura 5.7 - Curva de calor acumulado durante a hidratação das pastas. ....	43
Figura 5.8 - Curvas de análise termogravimétrica aos 28 dias de cura das pastas. .	44
Figura 5.9 - Análise comparativa do teor de hidróxido de cálcio aos 28 dias de cura das pastas.....	45
Figura 5.10 - Curvas de análise termogravimétrica aos 240 dias de cura das pastas. ....	46
Figura 5.11 - Análise comparativa do teor de hidróxido de cálcio aos 240 dias de cura das pastas.....	46
Figura 5.12 - Índice de consistência (espalhamento) das argamassas.....	48
Figura 5.13 - Padrão de espalhamento das argamassas com RMF. ....	48
Figura 5.14 - Absorção de água por imersão e porosidade aberta das argamassas. ....	49
Figura 5.15 - Resistividade elétrica das argamassas.....	50
Figura 5.16 - Resistência à compressão das argamassas.....	52



## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Propriedades físicas e químicas do cimento CP V – ARI.....	24
Tabela 4.2 - Tratamento mecânico secundário do rejeito de minério de ferro.....	27
Tabela 4.3 - Composição das pastas e argamassas estudadas. ....	29
Tabela 5.1 - Composição química dos rejeitos (%). ....	35
Tabela 5.2 - Diâmetro médio, superfície específica, massa específica e porosidade das partículas dos rejeitos.....	37
Tabela 5.3 - Calor de hidratação liberado pelas pastas nas regiões B a E. ....	41
Tabela 5.4 - Ensaio de flotação de bancada. ....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>a/c</b>	Relação água-cimento
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ANM</b>	Agência Nacional de Mineração
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<b>BET</b>	Brunauer, Emmett e Taller
<b>BJH</b>	Barret, Joyner e Halenda
<b>BSE</b>	Elétrons Retroespalhados
<b>CH</b>	Hidróxido de Cálcio - Portlandita
<b>COD</b>	<i>Crystallography Open Database</i>
<b>CPV - ARI</b>	Cimento Portland tipo V de Alta Resistência Inicial
<b>C-S-H</b>	Silicato de Cálcio Hidratado
<b>d<sub>médio</sub></b>	Diâmetro médio
<b>DNPM</b>	Departamento Nacional de Produção Mineral
<b>DRX</b>	Difração de Raios-X
<b>FEAM</b>	Fundação Estadual do Meio Ambiente
<b>FRX</b>	Fluorescência de Raios-X
<b>IBRAM</b>	Instituto Brasileiro de Mineração
<b>IN</b>	<i>In Natura</i>
<b>INMP</b>	<i>In Natura</i> com Moagem Primária
<b>MCS</b>	Material Cimentício Suplementar
<b>MEV</b>	Microscopia de Varredura por Elétrons
<b>PIB</b>	Produto Interno Bruto
<b>RMF</b>	Rejeito de minério de ferro
<b>RSMP</b>	Rico em Sílica com Moagem Primária
<b>RSMS</b>	Rico em Sílica com Moagem Secundária
<b>TG</b>	Termogravimetria

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
<b>3.1</b>	<b>Rejeito da mineração de ferro e separação magnética</b> .....	<b>14</b>
<b>3.2</b>	<b>Materiais cimentícios suplementares e o tratamento mecânico</b> .....	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>24</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiais</b> .....	<b>24</b>
<b>4.2</b>	<b>Métodos</b> .....	<b>25</b>
4.2.1	Tratamento dos rejeitos de minério de ferro .....	26
4.2.2	Caracterização dos rejeitos de minério de ferro .....	27
4.2.3	Produção e caracterização dos compostos cimentícios .....	29
4.2.4	Flotação de bancada .....	32
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>34</b>
<b>5.1</b>	<b>Caracterização dos rejeitos</b> .....	<b>34</b>
<b>5.2</b>	<b>Caracterização das pastas</b> .....	<b>39</b>
5.2.1	Calorimetria .....	40
5.2.2	Termogravimetria .....	43
<b>5.3</b>	<b>Caracterização das argamassas para fins estruturais</b> .....	<b>47</b>
5.3.1	Índice de consistência .....	47
5.3.2	Porosidade aberta e absorção de água por imersão .....	49
5.3.3	Resistividade elétrica .....	50
5.3.4	Resistência à compressão .....	51
<b>5.4</b>	<b>Flotação de bancada</b> .....	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Parte significativa do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro advém da indústria extrativa mineral (DNPM, 2017; IBRAM, 2019). Em 2019, o Brasil exportou um volume de 358,7 milhões de toneladas de bens minerais (IBRAM, 2019), sendo 67% desse volume referente ao minério de ferro (ANM, 2019). Embora a mineração gere benefícios à economia, a alta demanda por derivados de ferro bruto leva à geração volumes expressivos de rejeitos, originados no processo de beneficiamento do minério. Calcula-se que, na etapa de beneficiamento, cada tonelada de minério extraído gere 400 kg de rejeito de minério de ferro (RMF) (DAUCE *et al.*, 2019). Comumente, esse rejeito é disposto em barragens, que representam um alto custo financeiro de construção e manutenção (ZHANG *et al.*, 2020), ocupam extensas áreas verdes e colocam em risco à segurança em regiões de mineração (ANDRADE, 2014; HUANG; RANADE; LI, 2013; WANG *et al.*, 2014; YUNHONG *et al.*, 2016).

Em geral, o RMF possui granulometria inferior à granulometria da areia natural de rio (FONTES *et al.*, 2016) e é composto majoritariamente por ferro e silício (ANDRADE, 2014; BASTOS *et al.*, 2016; SANT'ANA FILHO *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2020). Devido a essas características, o RMF é considerado como matéria-prima viável para produtos destinados à construção civil (PEIXOTO *et al.*, 2016; ZHANG; TANG; LIU, 2021), podendo ser utilizado em diferentes materiais. Estudos apresentam diferentes aplicações do RMF como: material para infraestrutura rodoviária, como camadas para pavimentação de estradas e como agregado na fabricação de blocos de concreto intertravados (BASTOS *et al.*, 2016; SANT'ANA FILHO *et al.*, 2017); pigmento para tintas (GALVÃO *et al.*, 2018); na composição de tijolos para alvenaria de vedação e tijolos autoclavados de alta resistência, quando associado à cal e a areia (MENDES *et al.*, 2019; ZHAO *et al.*, 2012); em substituição parcial do agregado miúdo ou do cimento na produção de argamassas (CARRASCO *et al.*, 2017; MAGALHÃES *et al.*, 2018; FONTES *et al.*, 2016; MAGALHÃES *et al.*, 2020; MORAIS *et al.*, 2021), concretos convencionais (KURANCHIE *et al.*, 2015; LV *et al.*, 2019; SHETTIMA *et al.*, 2016; YUNHONG *et al.*, 2016), concreto aerado (CAI *et al.*, 2016; MA; CAI; JIAN, 2016) e concreto de ultra-alto desempenho (ZHANG *et al.*, 2020; ZHAO; FAN; SUN, 2014) e como precursor para a síntese de geopolímeros (DEFÁVERI *et al.*, 2019;

DUAN *et al.*, 2016; KURANCHIE; SHUKLA; HABIBI, 2016; OBENAU-EMLER; FALAH; ILLIKAINEN, 2020; YANG *et al.*, 2020).

Os RMF podem ser utilizados como materiais cimentícios suplementares (MCS) (MAGALHÃES *et al.*, 2018; MAGALHÃES *et al.*, 2020; MORAIS *et al.*, 2021; YAO *et al.*, 2020a; YUNHONG *et al.*, 2016), atuando de forma física e/ou química nos compostos. De acordo com a literatura, a redução no tamanho das partículas pode aumentar a reatividade de um material (BENEZET; BENHASSAINE, 1999, 2009; BERODIER; SCRIVENER, 2014; CORDEIRO; KURTIS, 2017; MAGALHÃES *et al.*, 2018; KADRI *et al.*, 2010). Dessa forma, o tratamento mecânico de cominuição poderia contribuir para uma maior reatividade dos rejeitos como MCS e, por consequência, aumentar o teor de substituição do cimento na matriz cimentícia (ZHANG; TANG; LIU, 2021).

Considerando que grande parte do RMF do Quadrilátero Ferrífero depositado nas barragens, nas últimas décadas, apresenta teores de ferro semelhantes a alguns minérios explorados atualmente (DAUCE *et al.*, 2018), também há um grande potencial de reaproveitamento desse rejeito nas etapas de concentração do minério bruto. Esse reaproveitamento se justifica em função do esgotamento das jazidas de minério com alto teor em ferro no estado (JUNIA; SILVA; BRANDÃO, 2018; LIMA; LOPES; GONTIJO, 2011). Dessa forma, pode ser possível recuperar milhões de toneladas de ferro descartado. A partir da separação magnética, por exemplo, o material residual rico em ferro poderia ser reaproveitado como carga circulante na rota de concentração de minério de ferro bruto (RIBEIRO *et al.*, 2017) e, o material pobre em ferro, aplicado como MCS em materiais cimentícios.

O reaproveitamento do RMF como MCS, além de reduzir o custo de armazenamento em barragens (ZHANG; TANG; LIU, 2021), pode contribuir para o desenvolvimento de um cimento mais ecológico, com redução no consumo de energia e nas emissões de dióxido de carbono (HUANG; RANADE; LI, 2013; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). Neste contexto, este trabalho analisa a influência do tratamento mecânico e da separação magnética na produção de rejeitos com maior potencial de uso em substituição ao cimento e a possibilidade de reaproveitamento do ferro procedente da separação magnética.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência do tratamento mecânico e da separação magnética no desempenho do rejeito de minério de ferro como material cimentício suplementar.

Para alcançar o objetivo geral, pode-se destacar os seguintes objetivos específicos:

- analisar a pozolanicidade do RMF *in natura* (como coletado), com tratamento mecânico e/ou com separação magnética;
- analisar o desempenho de compostos cimentícios produzidos com substituição parcial do cimento Portland no teor de 15% por RMF *in natura* (como coletado), com tratamento mecânico e/ou com separação magnética, e
- analisar a viabilidade do material residual rico em ferro retornar como carga circulante na rota de concentração do minério de ferro bruto.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O aproveitamento do RMF pode envolver quatro grandes aspectos: i) a matéria-prima para construção civil; ii) o reprocessamento de minerais ferrosos; iii) o preenchimento de áreas mineradas, e iv) a recuperação de terras agrícolas. Nesta pesquisa, serão abordados os aspectos do aproveitamento do RMF como matéria-prima para a construção civil e o reprocessamento de minerais ferrosos. Os tópicos a seguir descrevem o contexto dos rejeitos da mineração de ferro, suas características, o potencial de recuperação de ferro a partir dos rejeitos e os conceitos e propriedades importantes dos MCS.

#### 3.1 Rejeito da mineração de ferro e separação magnética

A Austrália é o país que mais exporta minério de ferro no mundo, com uma participação de mercado de 53%, seguida pelo Brasil, com participação de 25% (LÖF; ERICSSON; LÖF O., 2019). Grande parte da exportação mundial é destinada à China que, apesar de ser uma grande produtora de minério de ferro e de ter aumentado a sua produção local nos últimos anos, ainda necessita importar 88% do minério de ferro consumido no país (LÖF; ERICSSON; LÖF O., 2019). Para atender à alta demanda de ferro mundial, o estado de Minas Gerais produz, na região do Quadrilátero Ferrífero (Figura 3.1), aproximadamente metade de todo o volume de minério de ferro extraído no Brasil (ANM, 2019; DNMP, 2017; IBRAM, 2019).

Na região do Quadrilátero Ferrífero mineiro, são extraídos os minérios itabiríticos, compostos principalmente por minerais de sílica e de ferro (hematita, magnetita e algumas variedades de carbonatos e silicatos) (CARVALHO *et al.*, 2014; ARAÚJO, *et al.*, 2013). Devido ao teor médio de ferro variar entre 20 e 55% (CARVALHO *et al.*, 2014), etapas de beneficiamento são necessárias, visando concentrar o minério bruto, separando os minerais de valor dos minerais de ganga<sup>1</sup>. Como consequência

---

<sup>1</sup> Sem valor comercial

do processo de beneficiamento, uma polpa é produzida e denominada rejeito (CHAVES; FILHO; BRAGA, 2010).

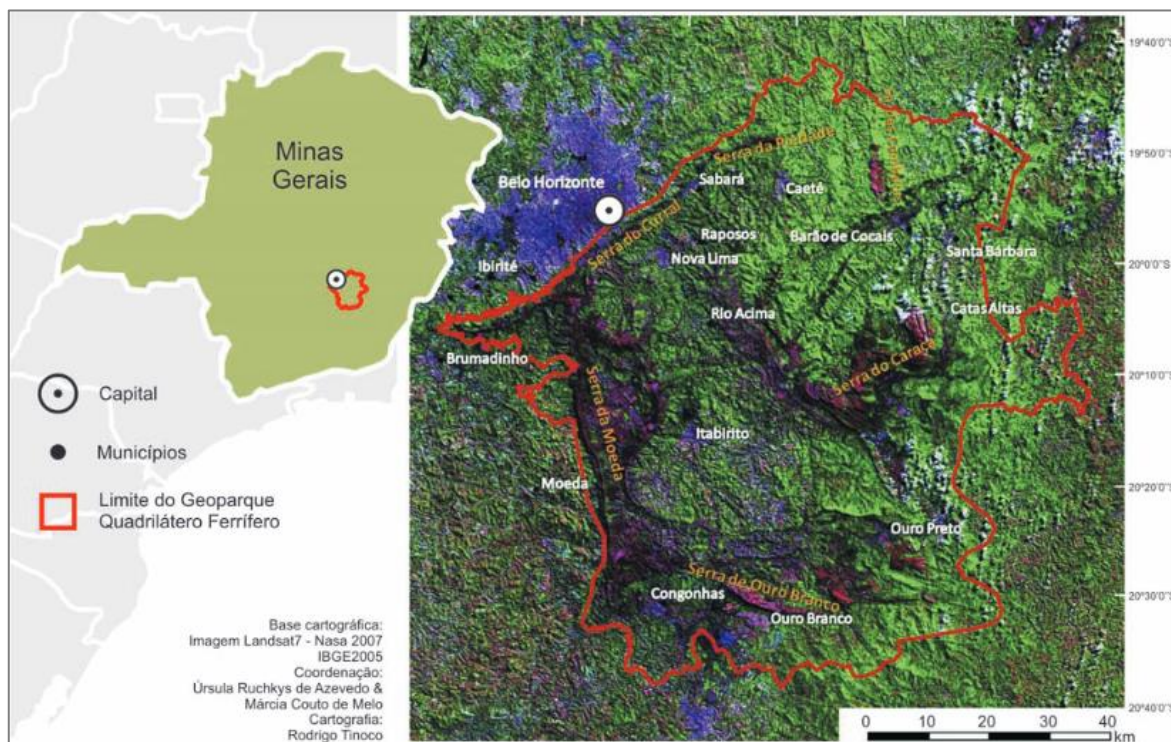


Figura 3.1 - Localização e limites do Quadrilátero Ferrífero

Fonte: AZEVEDO *et al.* (2012).

Estima-se que, para cada tonelada de minério de ferro bruto extraído no Quadrilátero Ferrífero, 400 kg de rejeito são gerados e armazenados em barragens (DAUCE *et al.*, 2019). Esse rejeito pode ser bastante heterogêneo, pois está associado ao local de extração do minério e aos diferentes processos de beneficiamento aplicados (FONTES *et al.*, 2016; ZHANG; TANG; LIU, 2021; ALMADA, 2021). Na Figura 3.2, é ilustrado um modelo de planta para o beneficiamento do minério de ferro da região.

A geração e o armazenamento do RMF em barragens não é um problema exclusivo de Minas Gerais ou do Brasil. Na Austrália, o beneficiamento de uma tonelada de minério bruto pode gerar até duas toneladas de rejeito (KURANCHIE; SHUKLA; HABIBI, 2015). Considerando a produção mundial, milhões de toneladas são



geradas a cada ano e bilhões de toneladas já estão armazenadas em barragens (WANG *et al.*, 2014).

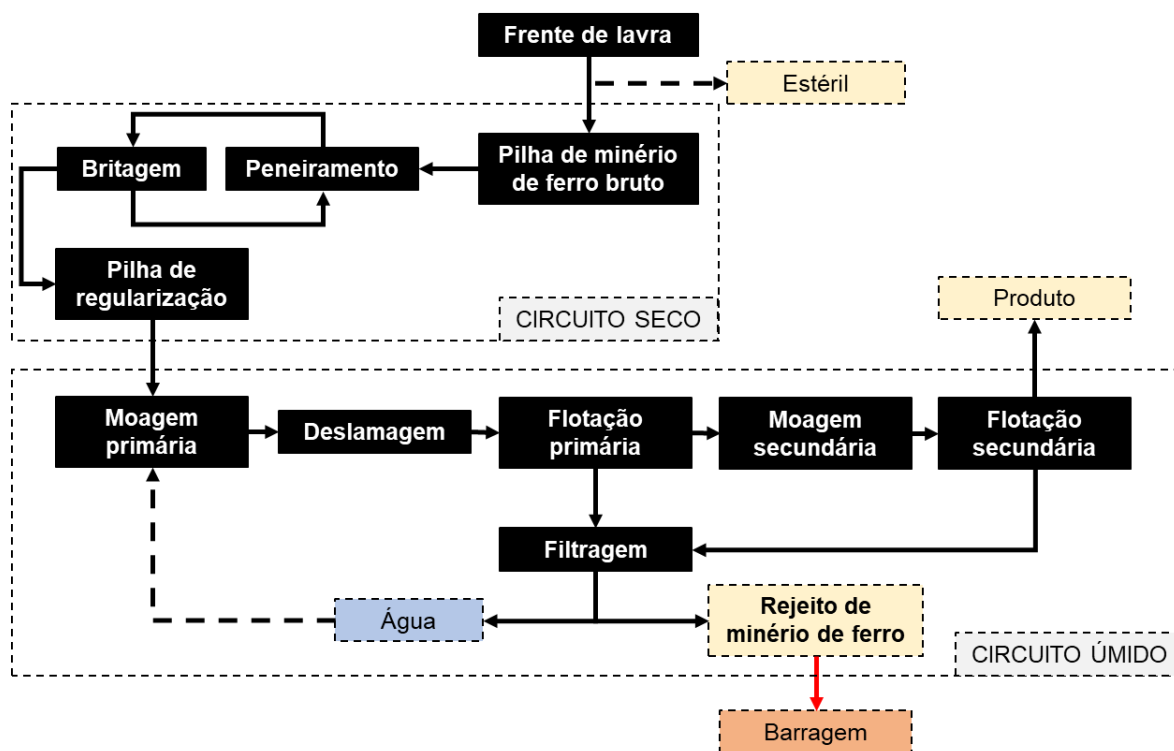


Figura 3.2 - Planta de beneficiamento do minério de ferro.

Fonte: Adaptado de Chaves *et al.* (2010) para o modelo de planta de beneficiamento do material desta pesquisa.

Minas Gerais é o estado que possui o maior número de barragens destinadas à mineração no Brasil (FEAM, 2017). Essas barragens, além do alto custo financeiro para a construção e manutenção (ZHANG; TANG; LIU, 2021), ocupam extensas áreas verdes e colocam em risco à segurança em região próximas de mineração (ANDRADE, 2014; HUANG; RANADE; LI, 2013; WANG *et al.*, 2014; YUNHONG *et al.*, 2016). Após os rompimentos das barragens em Mariana/MG, em 2015, e Bumadinho/MG, em 2019 (O GLOBO, 2019), o RMF passou a ser visto como um grande passivo ambiental. No entanto, apesar do RMF estar associado a muitos problemas ambientais, existem alternativas para o seu aproveitamento.

Conforme Bstos *et al.* (2016) e Fontes *et al.* (2016), o RMF não apresenta características perigosas, como toxicidade, corrosividade ou inflamabilidade. Em

geral, esse material contém granulometria mais fina que a granulometria da areia natural de rio (FONTES *et al.*, 2016) e apresenta superfície rugosa e irregular, com vértices e arestas (ZHAO; FAN; SUN, 2014). Além da hematita e do quartzo, podem ser encontrados os minerais goetita, magnetita e outros minerais em menor proporção (DAUCE *et al.*, 2019; JUNIA; SILVA; BRANDÃO, 2018; ZHANG; TANG; LIU, 2021). Por consequência, ferro e silício são os principais elementos na composição química do RMF (ANDRADE, 2014; BASTOS *et al.*, 2016; CARRASCO *et al.*, 2017; MAGALHÃES *et al.*, 2018; FONTES *et al.*, 2016; MAGALHÃES *et al.*, 2020; MORAIS *et al.*, 2021; PEIXOTO *et al.*, 2016).

De acordo com Dauce *et al.* (2019), grande parte dos RMF depositados em barragens nas últimas décadas, apresentam teores de ferro semelhantes a alguns minérios explorados atualmente. Segundo os autores, isso sugere a possibilidade de recuperação de milhões de toneladas de ferro descartado, a partir do reprocessamento desse resíduo. Com o avanço tecnológico, desenvolvimento de super WHIMS<sup>2</sup> e matrizes magnéticas de grandes fluxos, a recuperação metálica em larga escala torna-se aplicável a esse material (RIBEIRO *et al.*, 2017). Nesse sentido, a separação magnética, visando concentrar minérios de baixo teor, e o reprocessamento do ferro contido nos RMF descartados nas barragens, vêm sendo discutidos por diversos pesquisadores (DAUCE *et al.*, 2019; JUNIA; SILVA; BRANDÃO, 2018; LI *et al.*, 2010a; RIBEIRO *et al.*, 2017; SUTHERS *et al.*, 2014; YAKUBAILIK; BALAEV; GANZHENKO, 2017).

Junia, Silva e Brandão (2018) analisaram a eficiência da separação magnética em dois diferentes tipos de minérios: com presença de óxidos de ferro tipicamente magnetítica (50,89%) e com predominância de hematita (61,44%). Em função do elevado teor de magnetita, que é fortemente atraída pelo campo magnético, o concentrado do primeiro minério apresentou aumento no teor de ferro de 28,03% para 56,43%, recuperação em peso de 44,83% e recuperação metálica de 88,24%. O minério composto majoritariamente por hematita também apresentou aumento no teor de ferro (de 36,32% para 65,46%), mas com recuperação em peso e

---

<sup>2</sup> Separador magnético de alta intensidade

recuperação metálica mais baixas (24,44% e 44,06%, respectivamente). Segundo os autores, mesmo que a recuperação em peso e metálica tenham sido mais baixas no segundo minério, o resultado pode considerado positivo, devido ao elevado teor de ferro apresentado na hematita.

Quando o RMF é submetido à separação magnética, a recuperação de ferro em peso pode ser superior à 40% e a recuperação metálica à 64% (DAUCE *et al.*, 2019). Por consequência do processo, um rejeito rico em silício é produzido. Andrade (2014) estudou o método de segregação e separação magnética, desenvolvido por Peixoto, Oliveira e Barros (2013), aplicado ao RMF e obteve concentrados de sílica que variaram entre 79,21% a 90,34%. Segundo o autor, esses concentrados de sílica apresentam potencial para a aplicação em materiais da construção civil.

A utilização do RMF como fonte de matéria-prima para a construção civil foi amplamente estudada em infraestrutura rodoviária (BASTOS *et al.*, 2016; SANT'ANA FILHO *et al.*, 2017), pigmento para tintas (GALVÃO *et al.*, 2018), tijolos (LI *et al.*, 2019; MENDES *et al.*, 2019; YANG *et al.*, 2014; ZHAO *et al.*, 2012), produção de argamassas (CARRASCO *et al.*, 2017; MAGALHÃES *et al.*, 2018; FONTES *et al.*, 2016; MAGALHÃES *et al.*, 2020; MORAIS *et al.*, 2021) e concretos (CAI *et al.*, 2016; KURANCHIE *et al.*, 2015; LV *et al.*, 2019; MA; CAI; JIAN, 2016; SHETTIMA *et al.*, 2016a; YUNHONG *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2020; ZHAO; FAN; SUN, 2014).

Atualmente, percebe-se um crescente interesse em estudos que melhorem a reatividade do RMF visando sua utilização como MSC. Estudos mostram que a reatividade pode ser melhorada por meio de tratamento mecânico (MAGALHÃES *et al.*, 2018; WU *et al.*, 2020; XIONG *et al.*, 2017; YAO *et al.*, 2020a, 2020b; YUNHONG *et al.*, 2016), tratamento térmico (MAGALHÃES *et al.*, 2020; YI *et al.*, 2009) ou tratamento químico (DEFÁVERI *et al.*, 2019; DUAN *et al.*, 2016; KURANCHIE; SHUKLA; HABIBI, 2016; OBENAU-EMLER; FALAH; ILLIKAINEN, 2020; YANG *et al.*, 2020).

### 3.2 Materiais cimentícios suplementares e o tratamento mecânico

A construção civil consome mais matéria-prima do que qualquer outra atividade econômica no mundo e, com o crescimento populacional e o desenvolvimento de grandes metrópoles, esse consumo tende a aumentar (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2012). O cimento é o material mais utilizado no setor, quando comparado ao aço, madeira, cerâmica e o asfalto (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). Nesse sentido, os MCS vêm sendo estudados como substitutos parciais do cimento Portland.

Uma gama de aluminossilicatos e subprodutos industriais com diferentes disponibilidades podem ser utilizados como MCS. Dentre eles, estão as cinzas do bagaço da cana de açúcar (BEZERRA *et al.*, 2017; CORDEIRO; KURTIS, 2017; SOARES *et al.*, 2016), o pó de areia quartzosa (MENEZES *et al.*, 2018), pó de quartzo e sílica ativa (TAVARES JUNIOR *et al.*, 2020), cinzas da casca de arroz (RÊGO *et al.*, 2015), metacaulim e fíler calcário (HOPPE FILHO *et al.*, 2017), pó de rochas ornamentais (ALMADA *et al.*, 2020), fítilo sericítico (MORAIS *et al.*, 2018), cinzas de eucalipto (RESENDE *et al.*, 2014) e também o rejeito de minério de ferro (MAGALHÃES *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2010b; LUO *et al.*, 2016; MAGALHÃES *et al.*, 2020; MORAIS *et al.*, 2021; YAO *et al.*, 2020a; YI *et al.*, 2009; YOUNG; YANG, 2019; YUNHONG *et al.*, 2016).

De acordo com Metha e Monteiro (2008), esses materiais, quando incorporados à composição do cimento Portland, podem ser classificados como adições inertes ou ativas. As adições inertes são materiais não reativos, denominados fíler, e contribuem com o efeito físico de empacotamento granulométrico, não possuindo atividade química. Por apresentarem granulometria semelhante ou mais fina que a do cimento, preenchem os espaços vazios na matriz cimentícia e podem, ainda, favorecer a formação de Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H), atuando como agentes nucleantes. Ainda conforme os autores, as adições ativas podem ser de dois tipos: adições cimentantes ou pozolânicas. As cimentantes são aquelas que, quando hidratadas, dão origem aos mesmos compostos presentes no cimento Portland hidratado. As pozolânicas, apesar de não serem materiais aglomerantes,

em temperatura ambiente e no contato com a água, reagem quimicamente com o Hidróxido de Cálcio (CH), produto do processo de hidratação do cimento, e formam C-S-H.

Uma prerrogativa importante para que os MCS consigam ter uma boa interação física e/ou química com o cimento é o tamanho da partícula. Nesse sentido, o tratamento mecânico a partir da moagem é um método amplamente utilizado para redução no diâmetro das partículas dos materiais (BURRIS; JUENGER, 2016; CORDEIRO; KURTIS, 2017; MAGALHÃES *et al.*, 2018; FLORES *et al.*, 2011; ILIĆ *et al.*, 2016; MAGALHÃES *et al.*, 2020; MENEZES *et al.*, 2018; MITROVIĆ; ZDUJIĆ, 2014; RÊGO *et al.*, 2015; SOURI *et al.*, 2015; TAVARES JUNIOR *et al.*, 2020; YAO *et al.*, 2020a; YUNHONG *et al.*, 2016). Contudo, como resultado da alta energia aplicada por longos períodos, partículas ultrafinas tendem a se aglomerar, diminuindo a eficiência do processo de moagem, conforme relatado por Burris e Juenger (2016) e Yunhong *et al.* (2016). De acordo com Flores *et al.* (2011), a aglomeração de partículas ocorre, possivelmente, devido às forças de Van de Waals, forças eletrostáticas e pela contaminação provocada pelos corpos moedores. Os autores destacam que variáveis importantes como frequência de rotação, quantidade de material (porcentagem de sólidos) e tamanho de esferas (preenchimento de vazios) podem influenciar na eficiência do tratamento mecânico.

Para Benezet e Benhassaine (1999, 2009), além de reduzir o diâmetro das partículas, o tratamento mecânico pode, ao mesmo tempo, aumentar a reatividade de um material. Para isso, é recomendada a maior redução possível no tamanho de partículas. Minerais com dimensões de partículas muito pequenas possuem grandes superfícies específicas, favorecendo a criação de pontos para a nucleação de C-S-H e acelerando a taxa de hidratação do cimento, quando aliada a composição química rica em sílica (BERODIER; SCRIVENER, 2014; KADRI *et al.*, 2010; SAEDI; JAMSHIDI-ZANJANI; DARBAN, 2020).

Os ensaios de calorimetria isotérmica e resistividade elétrica podem fornecer informações sobre o comportamento de um MCS na matriz cimentícia. Tavares Junior *et al.* (2020) substituíram 20% do cimento Portland por sílica ativa (material

pozolânico) ou pó de quartzo (material inerte) e observaram que o pico exotérmico das curvas de calorimetria foi adiantado para a composição com sílica ativa e atrasado para a composição com pó de quartzo. Isso quer dizer que diferentes tipos de adições provocam diferentes influências no tempo de pega do composto. Em relação à resistividade elétrica, os resultados indicaram que a incorporação de sílica ativa levou a um aumento de três a quatro vezes dessa propriedade. Por outro lado, o pó de quartzo não promoveu alterações representativas na argamassa, quando comparada à amostra de referência, produzida sem MCS. Tais observações indicam que o grau de reatividade de um MCS pode influenciar o calor de hidratação do cimento e a resistividade elétrica dos compostos.

A reatividade de um MCS também pode ser analisada por termogravimetria (TG) (CORDEIRO; KURTIS, 2017; MENEZES *et al.*, 2018; YAO *et al.*, 2019, 2020b; YUNHONG *et al.*, 2016). A perda de massa que ocorre em faixas de temperaturas próximas de 400 a 550 °C pode ser atribuída à desidroxilação da portlandita e, conseqüentemente, ao seu teor presente na pasta de cimento (HOPPE FILHO *et al.*, 2017; RUPASINGHE *et al.*, 2017). Assim, comparando-se os teores de CH nas pastas sem e com substituição do cimento é possível analisar se o MCS apresentou consumo de CH por reatividade pozolânica durante o processo de hidratação.

Cordeiro e Kurtis (2017) estudaram a reatividade de cinzas do bagaço da cana de açúcar com tratamento mecânico em moinho vibratório por períodos de 8, 30, 120 e 960 minutos. As moagens levaram a diferentes granulometrias das cinzas, cujas reatividades foram analisadas por meio da calorimetria e termogravimetria em pastas de cimento com substituição do aglomerante no teor de 20%. Os resultados indicaram que partículas com diâmetro médio ( $d_{\text{médio}}$ ) de 29,6  $\mu\text{m}$  apresentaram comportamento semelhante à uma adição mineral inerte e partículas com  $d_{\text{médio}}$  de 4,4  $\mu\text{m}$  apresentaram um aumento considerável na reatividade. Além disso, as partículas finas anteciparam o período de indução, produziram um leve aumento na inclinação da curva durante o período de aceleração e atingiram maior fluxo de calor, quando comparadas às partículas grosseiras. A TG mostrou que existe uma correlação direta de consumo de CH com a redução da granulometria. Dessa

forma, observa-se que o aumento da superfície específica de um MCS pode melhorar sua reatividade.

O aumento da reatividade após tratamento mecânico também foi analisado por termogravimetria em uma argila, cujos principais constituintes são os minerais caulinita (51,5%) e quartzo (40,6%) (MITROVIĆ; ZDUJIĆ, 2014). Segundo os autores, a moagem em moinho de bolas horizontal convencional à 46 rpm promoveu aumento contínuo na reatividade em relação ao tempo de moagem, realizada por períodos de 10, 30, 60, 120, 600 e 1200 minutos. A maior reatividade foi constatada para a argila com  $d_{\text{médio}}$  de partículas de 6,34  $\mu\text{m}$ .

Menezes *et al.* (2018) utilizaram um moinho planetário de alta energia à 300 rpm, com recipientes e esferas de zircônio, para atingir um  $d_{\text{médio}}$  de 3,6  $\mu\text{m}$  em areia quartzosa, material considerado inerte em maior granulometria. A reatividade do pó de areia produzido foi analisada por TG em pasta de cimento com substituição parcial do aglomerante no teor de 15%. Nessa análise, foi identificada menor perda de massa na região de desidroxilação do CH, comparando-se à perda de massa obtida na pasta de referência, produzida apenas com cimento. O resultado indica que ocorreu reação entre o pó de areia e o cimento no processo de hidratação.

O RMF também é passível de ter sua reatividade aumentada por tratamento mecânico (YAO *et al.*, 2020 a, 2020b). Segundo Yao *et al.* (2020a), a moagem realizada com 125 g de rejeito em um moinho planetário com esferas de aço, em velocidade de rotação de 500 rpm produziu partículas com  $d_{\text{médio}}$  de 13,70  $\mu\text{m}$ . No estudo, o consumo de CH foi analisado por termogravimetria aos 3 e 28 dias de cura. Aos 3 dias, foi identificado pico referente à perda de massa do CH. Aos 28 dias, o mesmo pico desapareceu, o que pode indicar que o RMF consumiu o CH presente.

Yunhong *et al.* (2016) observaram um aumento de reatividade no RMF após 210 minutos de moagem, com o  $d_{\text{médio}}$  das partículas de 9,42  $\mu\text{m}$ . As análises de TG em pastas de cimento mostraram que, para a pasta de referência, o teor de CH era de 21,37%. Ao substituir o cimento por RMF em 20% e 30%, o teor de CH nas pastas

caiu para 16,85% e 15,06%, respectivamente. Os autores concluem que o RMF foi responsável pela reação secundária e que quanto maior teor de rejeito na mistura, maior o consumo de CH.

Com o aumento da reatividade do RMF, sua função como MCS pode ser resumida em três pontos: 1) aumentar a densidade de empacotamento pelo efeito filer, 2) aumentar os pontos de nucleação, induzindo e promovendo hidratação secundária e, 3) aumentar o desenvolvimento de resistência à compressão de longo prazo devido à atividade pozolânica (ZHANG; TANG; LIU, 2021).



## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo, são descritos os materiais, métodos e equipamentos utilizados para a realização de cada experimento, bem como as especificidades de análise das propriedades medidas por cada um, quando conveniente.

### 4.1 Materiais

O RMF estudado advém de uma barragem localizada na região de Mariana (Quadrilátero Ferrífero), em Minas Gerais – Brasil, e foi coletado e disponibilizado para a pesquisa pela mineradora. Esse rejeito, de aspecto arenoso, foi disposto na barragem após a etapa de flotação e, somente então, coletado. Uma quantidade inicial de RMF (20 kg) foi mantida em estufa na temperatura de 100 °C ( $\pm 5$ ) por 24 horas, para a retirada de umidade e, posteriormente, foi acondicionada em recipientes fechados.

Para a produção das pastas e argamassas, foi utilizado cimento Portland CP V – ARI, cujas propriedades físicas e químicas são apresentados na Tabela 4.1, areia natural silicosa tratada e água potável. A areia foi igualmente proporcionada em quatro frações: material retido nas peneiras entre 2,40 mm e 1,20 mm; entre 1,20 mm e 0,60 mm; entre 0,60 mm e 0,30 mm; 0,30 mm e 0,15 mm. A água utilizada foi fornecida pela companhia de saneamento de Belo Horizonte.

Tabela 4.1 - Propriedades físicas e químicas do cimento CP V – ARI.

Propriedades físicas		Propriedades químicas (%)	
Área Específica (Blaine) (cm <sup>2</sup> /g)	4,52	Resíduo Insolúvel	1,47
Finura pela peneira 45 µm (%)	1,49	Trióxido de Enxofre – SO <sub>3</sub>	3,26
Início de pega (min)	133	Óxido de Magnésio – MgO	0,97
Fim de Pega (min)	192	Óxido de Sódio – Na <sub>2</sub> O	0,00
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,13	Óxido de Potássio – K <sub>2</sub> O	0,04
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	54,30	Perda ao fogo	3,74

Fonte: Fornecido pela Companhia Nacional de Cimento / referência julho 2019.

## 4.2 Métodos

Após a secagem do RMF, o material foi homogeneizado, sendo parte armazenada e parte submetida aos tratamentos de separação magnética e/ou tratamento mecânico. Os rejeitos *in natura* (IN), *in natura* com moagem primária (INMP), rico em sílica com moagem primária (RSMP) e rico em sílica com moagem secundária (RSMS) foram utilizados para a produção de pastas e argamassas para fins estruturais. As amostras de rejeito foram caracterizadas e os compostos cimentícios foram estudados no estado fresco e endurecido. Com o subproduto da separação magnética se avaliou a viabilidade de aproveitamento do ferro pelo ensaio de flotação em bancada. O programa experimental é ilustrado na Figura 4.1.

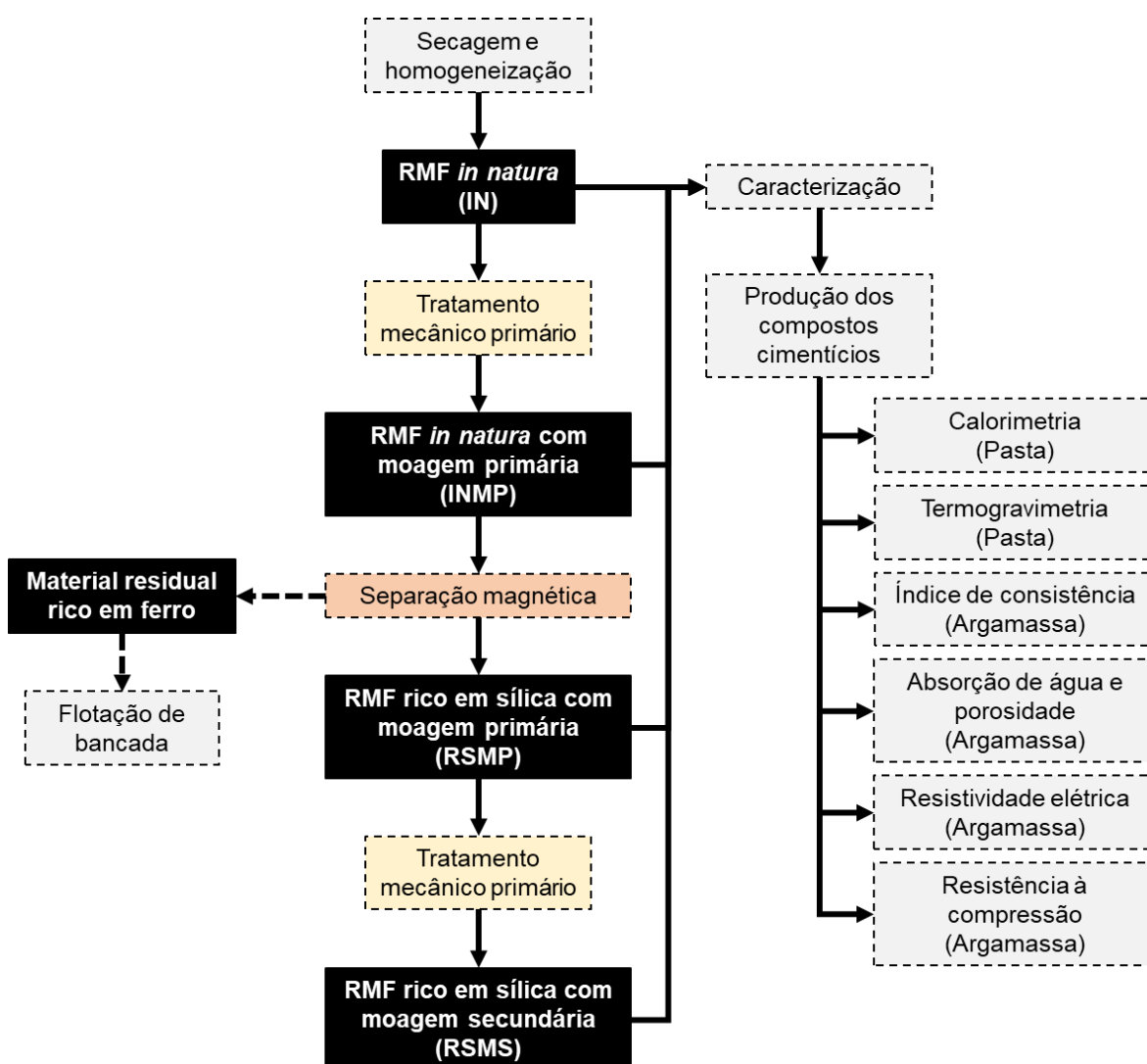


Figura 4.1 - Programa experimental da pesquisa.

#### 4.2.1 Tratamento dos rejeitos de minério de ferro

A amostra INMP foi obtida a partir do tratamento mecânico primário do RMF *in natura* em um moinho de barras fabricado pela PAVITEST – Contenco Indústria e Comércio LTDA. O objetivo deste tratamento foi a liberação dos minerais ferrosos. A moagem primária foi realizada com cerca de 6 kg de RMF por vez, por via seca, durante 15 minutos, em uma frequência de 38 Hz, utilizando-se 39 barras de aço de peso médio aproximado de 1,4 kg cada. Após o procedimento, parte do material foi armazenada e parte foi destinada à sequência.

Com a amostra INMP foi realizado o processo de separação magnética, com o objetivo de se obter um rejeito rico em sílica e um material residual rico em ferro. Utilizou-se um separador magnético de alta intensidade, à úmido, Modelo WHIMS 3X4L do Fabricante Carpco Inc, com corrente elétrica de 7 A, equivalente ao campo magnético de 11000 Gauss. No processo, adotou-se uma mistura de 400 g de RMF em 1 litro de água, que foi cuidadosamente lançada no funil. Após o procedimento, uma parte do RMF foi armazenada e o restante foi destinado a moagem secundária. Também armazenou-se o material residual rico em ferro, retido no campo magnético.

A fim de se obter a maior redução possível na granulometria do RMF, foi realizado o tratamento mecânico secundário. A moagem secundária foi realizada por via seca, em um moinho planetário FRITSCH modelo Pulverisette 5, em recipientes e esferas compostos por óxido de zircônio (94,2%  $ZrO_2$ ), com densidade de 5,7  $g/cm^3$ . Para alcançar a maior eficiência da moagem, o tratamento foi aplicado por até 240 minutos, sendo a distribuição granulométrica do material verificada à cada 40 minutos, em granulômetro à laser MasterSizer 2000 - Malvern Instruments. A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros utilizados no processo.

A redução do tamanho das partículas em função do tempo é apresentada na Figura 4.2. Em razão da estabilização na redução da granulometria ao longo do tempo, foi adotado o tempo total final de 240 minutos para a moagem secundária. Ainda que nesta configuração de moagem tenha havido maior consumo energético, devido à

duração e ao aumento da frequência, esta foi adotada por promover a maior redução granulométrica, objetivo do processo.

Tabela 4.2 - Tratamento mecânico secundário do rejeito de minério de ferro.

Tempo (min)	00-40	40-80	80-120	120-160	160-200	200-240
Quantidade de material (g)	400	300	100	100	100	100
Número de esferas	25	25	97	97	97	97
Diâmetro das esferas (mm)	20	20	5	5	5	5
Frequência (rpm)	300	300	320	320	350	360

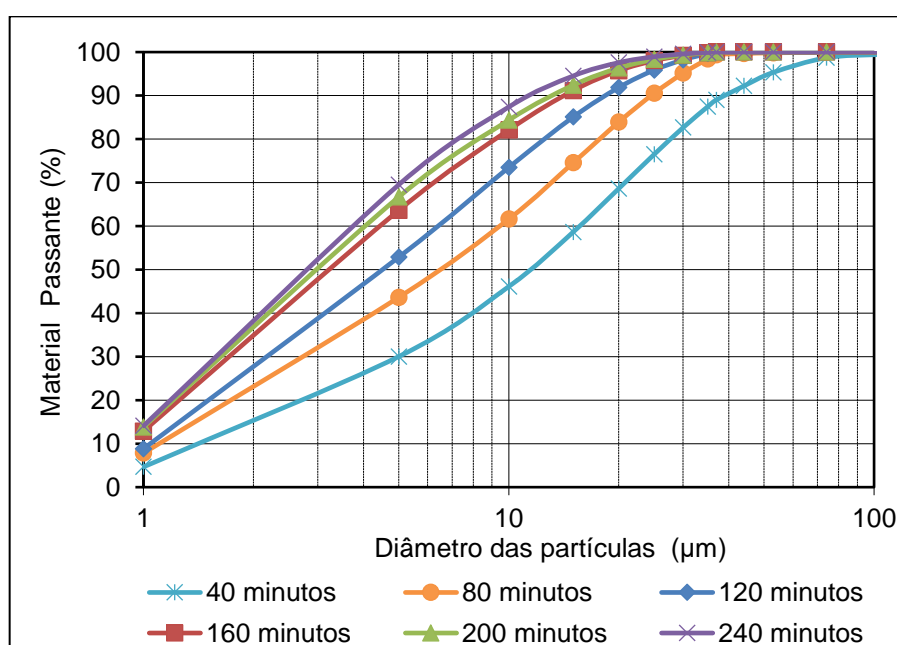


Figura 4.2 - Redução da granulometria em função do tempo de moagem.

#### 4.2.2 Caracterização dos rejeitos de minério de ferro

Os diferentes rejeitos foram caracterizados quanto à composição química e mineralógica, granulometria, superfície específica, massa específica e microestrutura.

Na análise química, utilizou-se o método de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), por leitura direta com o equipamento Shimadzu EDX-7000. O ensaio foi realizado com os rejeitos em pó e na granulometria abaixo de 38  $\mu\text{m}$ . Nessas

mesmas condições, a análise mineralógica foi realizada, utilizando difratometria de raios-X (DRX), em um equipamento Panalytical da Philips, sistema 1710. Foram utilizados detector tipo fotomultiplicador, tubo de anodo de Cobre ( $\text{CuK}\alpha$ :  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ) e passo de  $0,018^\circ/\text{s}$  entre as faixas de varredura ( $2\theta$ ) de  $10^\circ$  e  $90^\circ$ . Para a identificação das fases minerais adotou-se a base de dados *Crystallography Open Database* (COD).

A distribuição do tamanho de partículas foi determinada por difração à laser no equipamento MasterSizer 2000 - Malvern Instruments. A ASE e porosidade do material foram determinados pelo ensaio de sorção gasosa, utilizando o equipamento Quantachrome Instruments Nova 1200e. Para a ASE, adotou-se o método Braunauer, Emmet e Teller (BET) e, para a análise da porosidade aplicou-se o modelo Barrett, Joyner e Halenda (BJH). No ensaio, as amostras foram previamente aquecidas sob vácuo à  $150^\circ\text{C}$  por 48 h para limpeza da superfície e, em seguida, submetidas ao processo de sorção de nitrogênio, com tolerância de pressão de 0,050/0,050 (adsorção/dessorção).

Na determinação da massa específica, utilizou-se o método de picnometria de gás hélio (He) com equipamento Quantachrome Instruments Multi Pycnometer MVP-1. O gás He é utilizado por ser inerte e, devido ao pequeno tamanho dos seus átomos, penetra nos poros acessíveis da amostras. Previamente à realização do ensaio, o material foi seco em estufa à  $90^\circ\text{C}$  por 12 h.

A análise microestrutural dos materiais foi realizada utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) TM3000 Tabletop Microscope, fabricado pela Hitachi. As amostras em pó foram coladas em fita autoadesiva de carbono e, em seguida, inseridas no porta amostras para geração das imagens por elétrons retroespalhados (BSE). O equipamento realiza uma primeira varredura mais rápida para localizar a região escolhida para análise e, após este procedimento, é realizada uma segunda varredura, dessa vez mais lenta para melhorar a resolução da imagem gerada.

### 4.2.3 Produção e caracterização dos compostos cimentícios

Após os tratamentos e a caracterização dos RMF, compostos cimentícios (pastas e argamassas) foram produzidos para análises no estado fresco e endurecido. Adotou-se o teor de 15% de substituição do cimento (em massa) por RMF, valor intermediário dos teores de substituição adotados pela literatura que, em geral, variou de 10% a 40% (HUANG *et al.*, 2013; YUNHONG, *et al.*, 2016; MAGALHÃES *et al.*, 2018; HAN *et al.*, 2017). Como referências, também foram produzidas pastas e argamassas sem rejeito, conforme composição apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Composição das pastas e argamassas estudadas.

	Pastas			Argamassas			
	Cimento	Rejeito	Água	Cimento	Rejeito	Areia	Água
Referência	1,00	-	0,50	1	-	3,00	0,50
Composto com Rejeito	0,85	0,15		0,85	0,15		

#### 4.2.3.1 Pastas

No estado fresco, o fluxo de calor das pastas foi analisado por calorimetria de condução isotérmica, no equipamento ICal 2000H – Calmetrix com temperatura controlada em 23 °C. Nesse ensaio, a pasta de referência era constituída por 40 g de cimento e 20 g de água. Para as pastas com RMF, foram utilizados 34 g de cimento e 6 g de rejeito (em cada condição de tratamento), previamente misturados, e 20 g de água. A água foi inserida no sistema pelo equipamento, automaticamente, após 30 minutos do início do ensaio e homogeneizada pelo misturador acoplado.

No estado endurecido, as pastas foram analisadas por termogravimetria (TG) no equipamento SDT600 - TA Instruments. Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 25 mm de diâmetro e 50 mm de altura, utilizando-se adensamento manual em uma camada. Após 28 dias de cura submersa em água, os corpos de prova foram finamente moídos, à seco, em almofariz e pistilo de ágata e armazenados imersos em acetona PA, por 24 horas, para interrupção do processo de hidratação. Em seguida, as amostras foram estocadas em dessecador

contendo sílica gel, com aplicação de vácuo, por dois dias, para remoção da água e da acetona remanescentes. Para a TG, utilizou-se 15 mg da pasta seca moída, que foram aquecidos até 1000 °C, sob taxa de aquecimento de 10 ° C/ min, em fluxo de gás nitrogênio de alta pureza, 100 ml/min.

Com os resultados, foi calculado o teor de CH pela equação 1 (RUPASINGHE *et al.*, 2017), em que  $m_s$  é a quantidade de pasta utilizada no ensaio,  $m_{400t}$  é a massa da amostra na temperatura de 400 °C,  $m_{550t}$  é a massa da amostra na temperatura de 550 °C e a fração 74,09/18,01 é a razão de massa molar entre CH e H<sub>2</sub>O:

$$CH_1 (t) = (74,09/18,01) \times ((m_{400t} - m_{550t}) / (m_s)) \quad (1)$$

Contudo, de acordo com Rupasinghe *et al.* (2017), também é necessário considerar o efeito de uma possível carbonatação ocorrida no preparo das amostras. Para isso, foi calculada a perda de massa entre as faixas de temperatura de 600 e 800 °C, quando ocorre a decomposição do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). Esse cálculo é descrito pela equação 2, onde  $m_{600t}$  é a massa da amostra na temperatura de 600 °C,  $m_{800t}$  é a massa da amostra na temperatura de 800 °C e a fração 100,09/44,01 é a razão molar entre o carbonato de cálcio e o monóxido de carbono (CO):

$$CO (t) = (100,09/44,01) \times ((m_{600t} - m_{800t}) / (m_s)) \quad (2)$$

Assim, o teor real de CH na pasta, levando em consideração o efeito da carbonatação, foi obtido conforme a equação 3, onde a fração 74,09/100,09 é a razão molar entre o CH e o carbonato de cálcio.

$$CH (t) = CH_1 (t) + (74,09/100,09) \times CO (t) \quad (3)$$

#### 4.2.3.2 Argamassas

As argamassas foram analisadas no estado fresco pelo ensaio de índice de consistência, conforme NBR 13276 (ABNT, 2016). Neste ensaio, foi utilizada uma

mesa horizontal lisa e plana de metal não corrosível, molde rígido troncocônico e soquete de metal para adensamento. A argamassa foi forçada a se deformar mediante 30 quedas padronizadas dessa mesa. A medida de espalhamento considerou a média de três diferentes pontos no diâmetro, após a aplicação das quedas.

No estado endurecido, as argamassas foram analisadas nos ensaios de absorção de água por imersão e porosidade aberta, resistividade elétrica e resistência à compressão. Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, utilizando-se adensamento em mesa vibratória em três camadas, sendo cessada a vibração ao se observar exsudação uniforme sobre cada camada. Os corpos de prova foram desmoldados dentro de  $48 \text{ h} \pm 10 \text{ h}$ , identificados e curados submersos em água, por 28 dias.

No ensaio de absorção de água por imersão e porosidade aberta, dois corpos de prova de cada composição foram colocados em estufa por 72 horas, em temperatura de  $105 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 5)$ , para determinação de sua massa na condição seca. Para a determinação da sua massa em condição saturada e submersa, os corpos de prova foram submergidos em água em temperatura de  $23 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 2)$ , por 72 horas. Utilizou-se uma balança hidrostática para avaliação da massa submersa. Os valores da absorção de água por imersão e da porosidade foram obtidos de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005).

No ensaio de resistividade elétrica, foram analisados três corpos de prova de cada composição aos 150 dias de cura. Os corpos de prova ficaram submersos em água nas 12 horas anteriores ao ensaio, para saturação. Após a saturação, os corpos de prova foram imediatamente alocados entre duas placas de cobre de seção quadrada de 100 mm x 100 mm, conforme NBR 9204 (ABNT, 2012). Lã de aço úmida foi utilizada como um contato entre a base da amostra e as placas de cobre, para garantir a passagem de corrente elétrica. Nesse circuito, foi aplicada uma tensão de 8 V, com uma frequência de 40 Hz, com o Gerador de Função Digital FG-8102 da Politerm. Para determinação da resistividade elétrica volumétrica foi utilizada a Lei de Ohm.



Para a determinação da resistência à compressão, quatro corpos de prova de cada composição foram analisados aos 28 e 91 dias de cura, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019). Os corpos de prova com 28 dias de idade foram ensaiados logo após o período de cura úmida. Os corpos de prova com 91 dias, ficaram em cura úmida por 28 dias e, depois desse período, foram armazenados em temperatura ambiente até a data do ensaio. Foi utilizada prensa EMIC modelo GR048 com capacidade máxima de 300 kN e velocidade de carregamento equivalente à  $0,25 \text{ MPa} \pm (0,05)$ .

Em situações que se fizeram necessárias, foram realizadas análises estatísticas pela Análise de Variância (ANOVA) e/ou “Teste t de student para duas amostras independentes”. Os cálculos foram realizados pela análise de dados no *software* Excel, com nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ).

#### 4.2.4 Flotação de bancada

Com o material residual rico em ferro, obtido no processo de separação magnética da amostra INMP, foi realizado o ensaio de flotação pela mineradora que forneceu o RMF desta pesquisa. O ensaio consiste em um sistema de agitação e aeração, com o objetivo de concentrar os minerais de ferro a partir das diferenças nas propriedades de superfície das partículas, conforme ilustra a Figura 4.3.

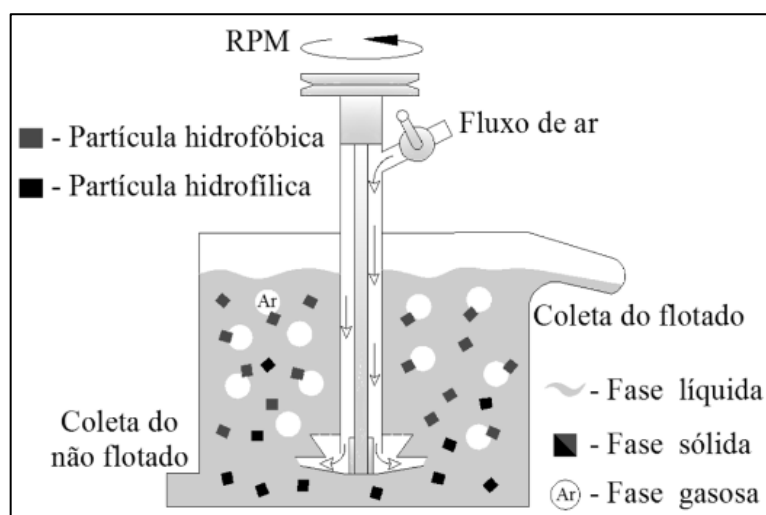


Figura 4.3 - Esquema de flotação mineral.

Fonte: Adaptado de Silva (2011).

Utilizou-se uma célula em escala de bancada do fabricante Wemco (cuba de 5,5 litros, 1.500 rpm no rotor e livre injeção de ar). Como reagentes, utilizou-se amido de mandioca como depressor, amina como coletor e soda cáustica como modificador e controle de pH, que foi fixado em 10,5.

Os resultados do ensaio foram expressos em termos de recuperação em peso (RP), que se refere à massa de material concentrado obtida ao final do ensaio; teor de ferro na alimentação (A), ou seja, teor de ferro no material ensaiado (material residual rico em ferro, oriundo do processo de separação magnética), e recuperação metálica (RM), referente ao teor de ferro do material concentrado em relação ao teor do material ensaiado. Os parâmetros RP, A e RM podem ser calculados pelas equações 4, 5 e 6, respectivamente, conforme cálculos utilizados pela mineradora:

$$RP = (m_{\text{concentrado}} / m_{\text{total}}) \times 100 \quad (4)$$

$$A = (Fe_{\text{concentrado}} \times RP) + ((100 - RP) \times Fe_{\text{rejeito}}) / 100 \quad (5)$$

$$RM = (((Fe_{\text{concentrado}} \times RP) / 100) / A) \quad (6)$$

Onde  $m_{\text{concentrado}}$  é a massa do material concentrado, obtido após a flotação,  $m_{\text{total}}$  é a massa utilizada no início do ensaio e  $Fe_{\text{concentrado}}$  e  $Fe_{\text{rejeito}}$  são os teores de ferro no material concentrado e no rejeito do processamento, respectivamente. Os teores de ferro do material concentrado e do rejeito gerado na flotação foram obtidos por análise química.

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se os resultados e discussões de caracterização dos RMF e dos compostos cimentícios no estado fresco e endurecido e o estudo de viabilidade de utilização do material residual procedente da separação magnética.

### 5.1 Caracterização dos rejeitos

Na Figura 5.1, são apresentadas as diferenças visuais das amostras de RMF nas quatro diferentes condições: a) *in natura*, sem tratamento; b) *in natura*, com moagem primária; c) rico em sílica, com moagem primária; d) rico em sílica, com moagem secundária. Na Figura 5.2, é apresentado o material residual rico em ferro procedente da separação magnética. Nota-se que a separação magnética foi efetiva em reduzir o teor de ferro das amostras RSMP e RSMS, uma vez que a cor acinzentada, associada aos minerais ferrosos, foi reduzida.



Figura 5.1 - Fotos das amostras a) Rejeito *in natura* (IN), b) Rejeito *in natura* moagem primária (INMP), c) Rejeito rico em sílica moagem primária (RSMP) d) Rejeito rico em sílica moagem secundária (RSMS).



Figura 5.2 - Foto do material residual rico em ferro.

Os resultados da composição química dos rejeitos são apresentados na Tabela 5.1. O RMF, na sua condição natural, é composto majoritariamente por silício e ferro, o que condiz com os resultados encontrados na literatura (ANDRADE, 2014; BASTOS *et al.*, 2016; DAUCE *et al.*, 2018; JUNIA; SILVA; BRANDÃO, 2018; PEIXOTO *et al.*, 2016; ZHANG; TANG; LIU, 2021). Após a separação magnética, nas amostras RSMP e RSMS, observa-se um aumento de 54,10% para 83,19% do SiO<sub>2</sub>, e uma redução de 44,80% para 15,56% do teor de ferro, o que indica que o processo foi efetivo, produzindo um rejeito rico em sílica.

Tabela 5.1 - Composição química dos rejeitos (%).

Amostras	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	SO <sub>3</sub>	Total
IN e INMP	54,10	44,80	0,43	0,43	0,03	0,05	0,06	0,11	100%
RSMP e RSMS	83,19	15,56	1,00	-	0,06	0,06	0,07	0,06	100%

Os minerais identificados na DRX dos rejeitos, apresentada na Figura 5.3, são condizentes com os elementos identificados na composição química. Em todos os rejeitos pode-se observar a presença do quartzo, hematita e goethita. Além disso, foram identificados pequenos picos característicos da caulinita em todos os rejeitos. Essa baixa intensidade dos picos da caulinita pode ser devido ao elevado teor e cristalinidade do quartzo nas amostras, o que alterou a escala relativa dos outros picos, dificultando a identificação das fases minoritárias. Além disso, presença da caulinita pode explicar o baixo teor de Al, identificado na composição química.

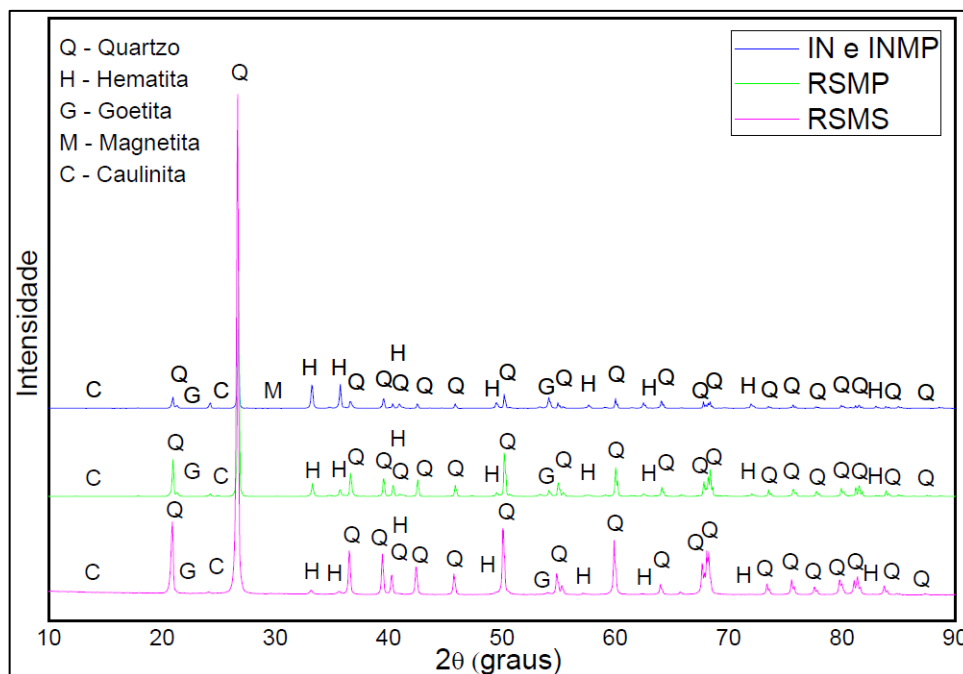


Figura 5.3 - Difratoograma de raios-X dos rejeitos.

Nas amostras com separação magnética, observa-se um aumento relativo da intensidade dos picos de quartzo e uma redução dos picos de hematita, além do completo desaparecimento do pico de magnetita. A linearidade do background e a existência de muitos picos bem definidos nos difratogramas indicam que os rejeitos não apresentam amorficidade. Esses resultados são consistentes aos encontrados por outros autores (DAUCE *et al.*, 2018; JUNIA; SILVA; BRANDÃO, 2018; ZHANG; TANG; LIU, 2021).

Na Figura 5.4, são apresentados os resultados da análise granulométrica. Observa-se, pelas curvas das amostras IN e INMP, que o tratamento mecânico primário levou ao refinamento das partículas, com redução do  $d_{\text{médio}}$  em 43%. No entanto, a separação magnética fez com que o rejeito RSMP voltasse a apresentar uma curva granulométrica semelhante à do IN. Isso pode estar relacionado à diferença de dureza e granulometria dos minerais ferrosos e do quartzo. A menor eficiência do tratamento primário nas partículas de quartzo era esperada, uma vez que esse mineral apresenta uma elevada dureza. Assim, possivelmente, as partículas de quartzo se apresentam em maior granulometria, quando comparadas às partículas de minerais ferrosos. No processo de separação magnética, grande parte das

partículas desses minerais foram removidas e essa amostra resultou em uma composição majoritariamente de partículas de quartzo.

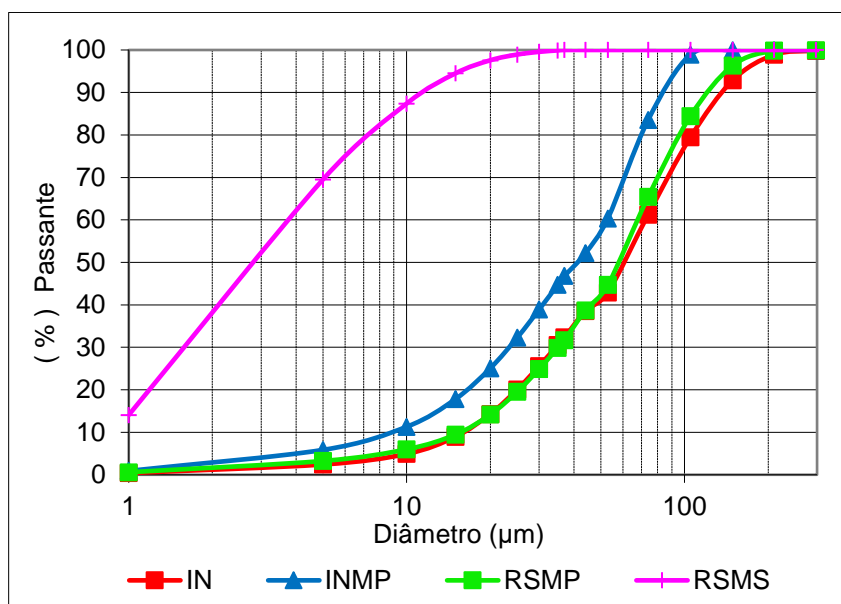


Figura 5.4 - Curvas de distribuição granulométrica dos rejeitos.

A curva apresentada pelo rejeito RSMS mostra a eficiência na redução do diâmetro das partículas com a moagem secundária. Essa amostra apresentou 100% das partículas inferiores à 30  $\mu\text{m}$ . O diâmetro médio, bem como a superfície específica, massa específica e porosidade dos rejeitos são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Diâmetro médio, superfície específica, massa específica e porosidade das partículas dos rejeitos.

Amostras	IN	INMP	RSMP	RSMS
Diâmetro $d_{\text{médio}}$ ( $\mu\text{m}$ )	75,00	42,66	71,00	4,66
Superfície específica ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	1,16	1,73	1,32	5,52
Massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,83	2,80	2,71	2,72
Diâmetro médio dos poros (nm)	1,332	1,186	1,222	3,296
Volume total de poros ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )	0,082	0,093	0,074	0,226

De acordo com Benezet e Benhassaine (1999), partículas de areia (sílica cristalina) de 5  $\mu\text{m}$  e superfície específica de 10  $\text{m}^2/\text{g}$  podem atuar como materiais pozolânicos. Apesar da eficiência na redução do tamanho de partículas no RSMS, a relação entre o  $d_{\text{médio}}$  (4,66  $\mu\text{m}$ ) e a superfície específica (5,52  $\text{m}^2/\text{g}$ ), não alcançou os

parâmetros recomendados pelos autores, o que indicaria que os rejeitos não são pozolânicos. O tratamento mecânico secundário, além de reduzir o diâmetro das partículas e, por consequência, aumentar a superfície específica, triplicou o diâmetro médio e o volume total de poros da amostra RSMS.

Os resultados mostram também que as massas específicas dos RMF são inferiores à do cimento CP V – ARI, que possui em torno de  $3,1 \text{ g/cm}^3$  (Tabela 4.1). Dessa forma, ao se substituir 15% de cimento por rejeito (em massa), foi adicionado um maior volume de sólidos. Assim, do ponto de vista prático, pode-se dizer que a área de molhagem e volume de sólidos foram aumentados, o que, consequentemente, altera a demanda de água dos compostos.

As imagens de MEV-BSE com ampliação de 500x das amostras IN, INMP, RSMP e de 1000x da amostra RSMS podem ser visualizadas na Figura 5.5.

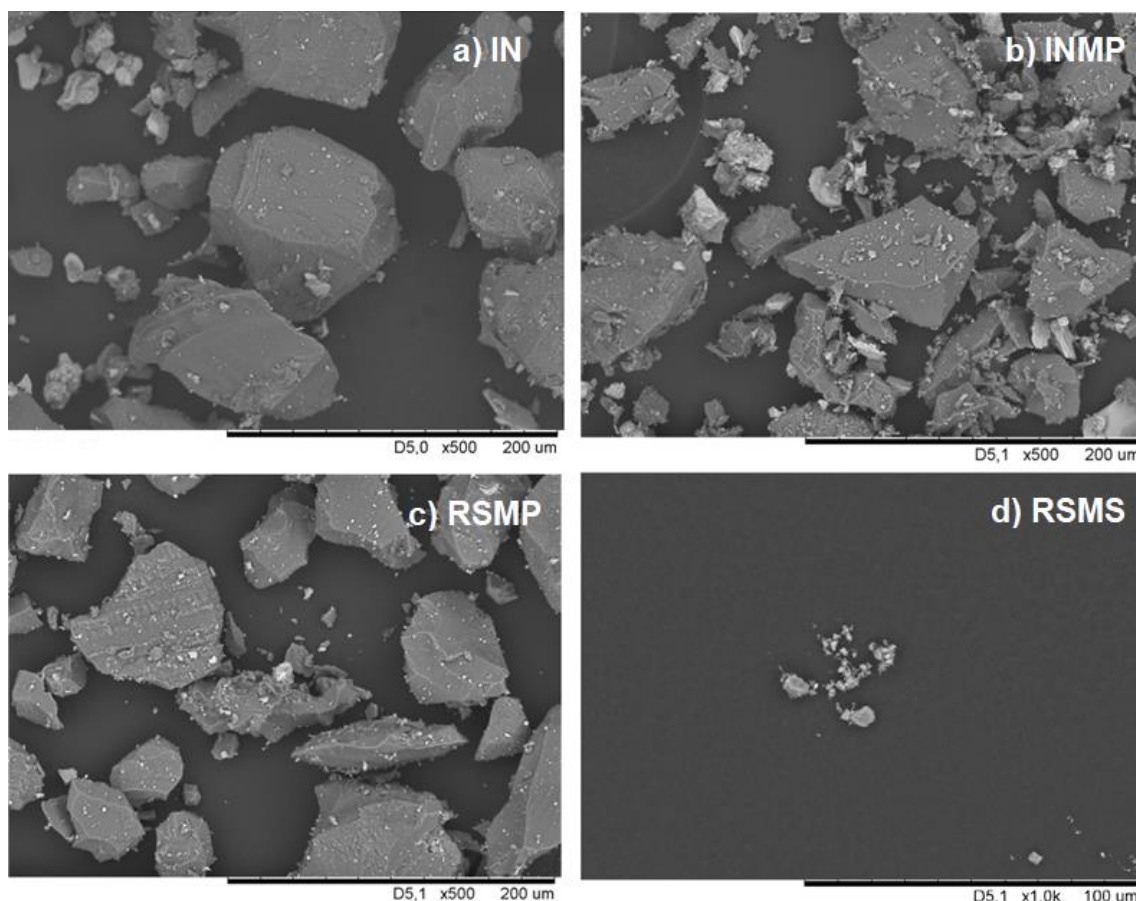


Figura 5.5 - Imagens de MEV-BSE dos rejeitos a) in natura (IN), in natura moagem primária (INMP), rico em sílica moagem primária (RSMP), rico em sílica moagem secundária (RSMS).

Observa-se que, para as amostras IN, INMP e RSMP, as partículas apresentaram dimensões inferiores à 200  $\mu\text{m}$ , o que condiz com o resultado da análise granulométrica. Em relação à morfologia, as partículas de quartzo são prismáticas e apresentam vértices, arestas e bordas afiadas (SHETTIMA *et al.*, 2016b; ZHAO; FAN; SUN, 2014), enquanto as partículas hematíticas são granulares e tabulares (DAUCE *et al.*, 2019; ZHANG; TANG; LIU, 2021). As partículas de minerais ferrosos também podem ser diferenciadas das partículas de quartzo pelas diferenças nos tons de cinza. Quanto maior a massa atômica do material, mais clara é sua representação na imagem gerada. O quartzo contém, principalmente, silício, que possui massa atômica de 28.086, enquanto as partículas dos minerais ferrosos, são constituídos sobretudo por ferro, que tem massa atômica de 55.845. Assim, as partículas de quartzo são representadas por tons escuros e, as dos minerais ferrosos, por tons mais brilhantes. Portanto, percebe-se que as partículas maiores apresentam características de quartzo e as menores de hematita. Isso corrobora com o resultado de maior granulometria da amostra RSMP em relação à INMP.

Na amostra INMP, é possível observar partículas de quartzo fraturadas, com arestas mais acentuadas que a IN, devido ao processo de moagem primária. Além disso, para esse rejeito, há uma maior quantidade de grãos com tamanhos intermediários e acúmulo de grãos finos fixados na superfície das partículas. Na amostra RSMP, é perceptível a redução do número de partículas dos minerais ferrosos, representados pela cor cinza clara, havendo predominância de partículas de tons escuros características de quartzo. Isso indica que o processo de separação magnética foi eficaz. A remoção dos minerais ferrosos observada também justifica a redução da massa específica dos rejeitos RSMP e RSMS, quando comparados ao IN. Apesar do diâmetro reduzido das partículas da amostra RSMS, sua morfologia exibe formas características de quartzo.

## **5.2 Caracterização das pastas**

As pastas de referência e com RMF foram avaliadas pelas análises térmicas de calorimetria e TG, cujos resultados são apresentados a seguir.



### 5.2.1 Calorimetria

Os resultados da calorimetria de condução isotérmica são apresentados na Figura 5.6. As curvas e os valores de calor das pastas com RMF foram normalizadas em relação ao teor de cimento. Em geral, o comportamento térmico durante a hidratação do cimento de todas pastas é semelhante.

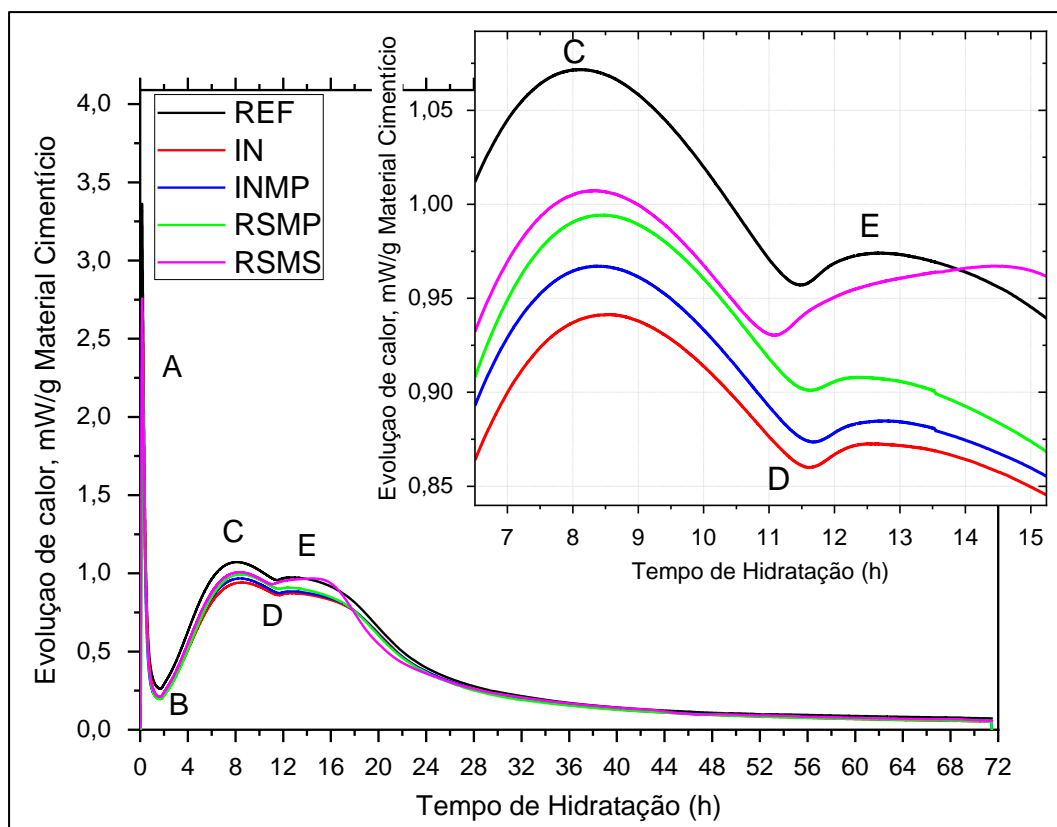


Figura 5.6 - Fluxo de calor das pastas de referência e com RMF.

Nota: Região de energia térmica inicial por dissolução do cimento e hidratação inicial do cimento (A), período de indução (B), pico principal associado às reações de hidratação que contribuem para a pega e o início do desenvolvimento de resistência (C), ponto de depleção de sulfato (D), hidratação dos aluminatos (E).

De acordo com a norma C1679-17 (ASTM, 2018), a curva de calor de hidratação de pastas de cimento apresenta, num período inicial curto (região A), um pico de energia térmica muito elevado, quando ocorre uma alta dissolução das fases do clínquer. Em seguida, inicia-se o período de indução das pastas e, posteriormente, o período de aceleração (região B). Por volta de 1 hora e 42 minutos, reações exotérmicas ocorreram de forma intensa, caracterizando o início da pega do cimento, quando há rápida formação de C-S-H e CH (LI; LU; GAO, 2020; TAYLOR,

1995). Após atingirem os picos máximos de calor dessa etapa (região C), as curvas entram na fase de desaceleração das reações, com depleção de sulfato, na região D. Entre 11 e 11,5 horas, as curvas indicam uma reação secundária, com liberação máxima de calor na região E, induzida pela hidratação dos aluminatos (BENTZ *et al.*, 2018).

Na Tabela 5.3, são apresentados os valores de calor liberados nas regiões de interesse. Para todas as amostras nota-se uma energia térmica muito baixa, variando entre 0,20 mW/g e 0,26 mW/g durante o período de indução. As pastas produzidas com RMF apresentaram um atraso de alguns minutos em relação à pasta de referência, nesse período, sendo maior para as amostras IN e INMP (de maior teor de ferro). No entanto, essa diferença não se deu ao ponto de alterar o início da pega do cimento, que está coerente com o período indicado pelo fabricante do cimento (Tabela 4.1), para todas as pastas.

Tabela 5.3 - Calor de hidratação liberado pelas pastas nas regiões B a E.

	Região B		Região C		Região D		Região E	
	Calor (mW/g)	Tempo (H)	Calor (mW/g)	Tempo (H)	Calor (mW/g)	Tempo (H)	Calor (mW/g)	Tempo (H)
<b>REF</b>	0,26	1,67	1,07	7,80	0,96	11,40	0,97	12,50
<b>IN</b>	0,21	1,79	0,94	8,10	0,86	11,60	0,87	12,50
<b>INMP</b>	0,20	1,75	0,97	8,10	0,87	11,60	0,89	12,50
<b>RSMP</b>	0,20	1,70	0,99	8,00	0,9	11,60	0,91	12,20
<b>RSMS</b>	0,21	1,70	1,01	8,00	0,93	11,00	0,97	14,20

Após a pega do cimento, observa-se uma aceleração linear em todas as pastas, atingindo o maior fluxo de calor entre 7 horas e 48 minutos e 8 horas e 6 minutos (região C). Essa aceleração linear é responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica das pastas, induzida principalmente pela formação de C-S-H (BEDIAKO, 2018; BENTZ *et al.*, 2018; BERODIER; SCRIVENER, 2014). A pasta de referência apresentou maior inclinação da curva e maior fluxo de calor (1,07 mW/g), enquanto que a pasta IN apresentou 0,94 mW/g, a INMP 0,97 mW/g, a RSMP 0,99 mW/g e a RSMS 1,01 mW/g. A redução no calor de hidratação em pastas de cimento produzidas com RMF também foi relatada por Luo *et al.* (2016). Isso pode estar associado à redução do teor de clínquer nas misturas (KADRI E

DUVAL, 2002). Em geral, a substituição parcial do cimento por MCS promove uma redução no calor de hidratação, conforme relata a literatura (KADRI *et al.*, 2010; LAWRENCE; CYR; LI; LU; GAO, 2020; RINGOT, 2003; TAVARES JUNIOR *et al.*, 2020).

Após o fluxo de calor atingir o desenvolvimento máximo, ocorre o período de desaceleração e, em seguida, inicia-se um segundo pico, entre 11 horas e 10 minutos e 11 horas e 40 minutos, referente à reação de conversão de etringita em monossulfato. Nesta etapa, apenas a pasta RSMS apresentou comportamento ligeiramente distinto, com adiantamento da reação e maior liberação de calor que as outras amostras. Provavelmente, isso ocorreu devido às partículas ultra-finas da amostra (KHAN; ASHRAF, 2019; POPPE; DE SCHUTTER, 2005). A literatura apresenta a possibilidade do pico secundário estar atribuído às reações pozolânicas, que ocorrem em taxas mais lentas (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018; KLEMCZAK; BATOG, 2016).

A Figura 5.7 mostra o fluxo de calor acumulado das pastas de cimento após 8 horas de hidratação. Embora a substituição do cimento por MCS resulte em um menor teor de clínquer, mesmo adições inertes promovem aumento de liberação total de calor, devido ao efeito de nucleação do material, como relatado por Wadsö *et al.* (2016). Segundo os autores, materiais reativos têm o mesmo efeito e promovem um aumento adicional de liberação de calor devido à participação nas reações de hidratação.

Mesmo com a normalização dos resultados desta pesquisa em relação ao teor de cimento, as amostras com RMF apresentaram menor calor de hidratação total. Entre essas amostras, a RSMS foi a que obteve maior calor acumulado, o que demonstra uma maior interação das partículas do rejeito com o cimento. Contudo, o efeito de nucleação dos RMF não compensou a redução do teor de clínquer ocasionado pela substituição do cimento.

De forma geral, observa-se que a separação magnética afetou os resultados de calorimetria isotérmica, uma vez que as amostras de pastas produzidas com rejeito

rico em sílica (RSMP e RSMS) adiantaram, ligeiramente, o período de indução. Essas amostras também apresentaram maior inclinação da curva no período de aceleração e maior fluxo de calor em relação às outras amostras com o rejeito em sua condição natural de composição química. O tratamento mecânico secundário promoveu uma alteração na interação entre as partículas do rejeito e do cimento, provavelmente, aumentando os sítios de nucleação dos produtos de hidratação. Isso culminou no adiantamento da reação secundária e na maior liberação de calor em relação às amostras com RMF.

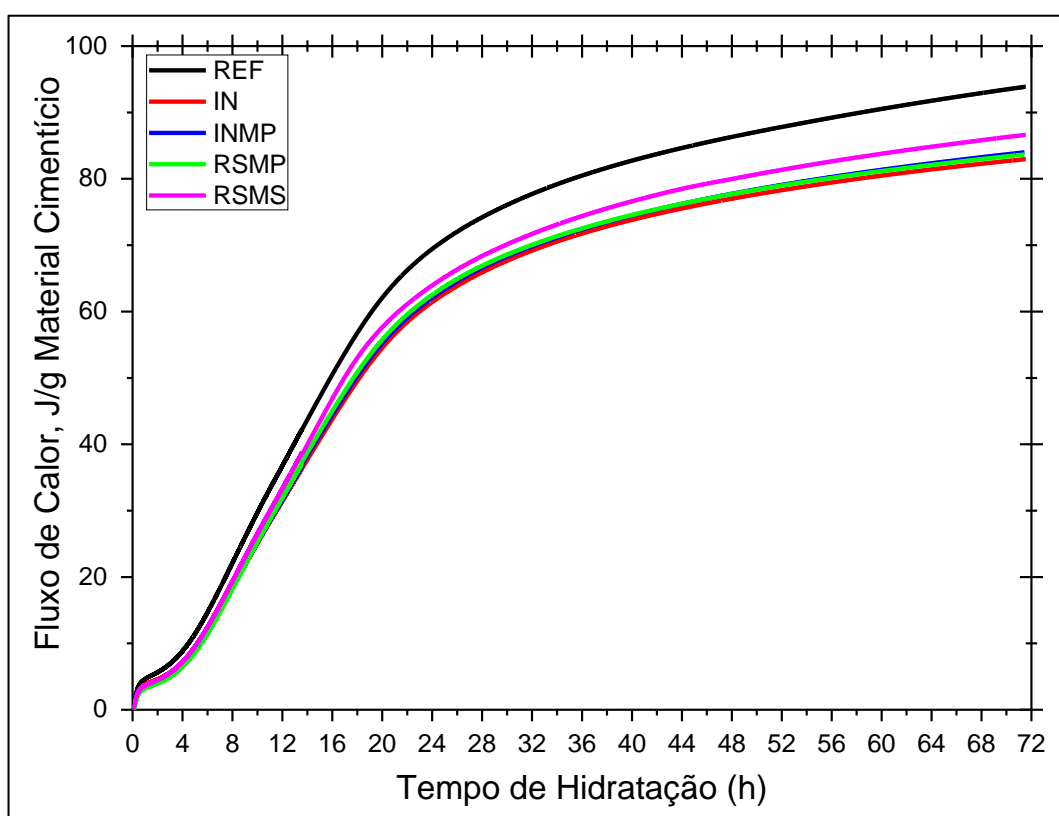


Figura 5.7 - Curva de calor acumulado durante a hidratação das pastas.

### 5.2.2 Termogravimetria

Na Figura 5.8, são apresentadas as curvas de TG das pastas aos 28 dias de cura. Foram identificadas três regiões de variações significativas de perda de massa. Na região A, entre as temperaturas 30 e 400 °C, ocorreu a perda de água quimicamente combinada, que pode ser atribuída à decomposição do C-S-H, da

etringita e outros compostos hidratados (NOCHAIYA; WONGKEO; CHAIPANICH, 2010; SONG *et al.*, 2018). Nessa faixa de temperatura, a curva da pasta RSMS foi a que mais se aproximou da pasta de referência. Isso indica que o aumento da superfície específica e a alteração da natureza química das partículas do RMF podem ter afetado a eficiência de nucleação para maior formação desses produtos de hidratação (BERODIER; SCRIVENER, 2014; KADRI *et al.*, 2010). Esse resultado é consistente com o encontrado no ensaio de calorimetria e, também, com o encontrado por Yao *et al.* (2020a), ao ativarem mecanicamente o RMF.

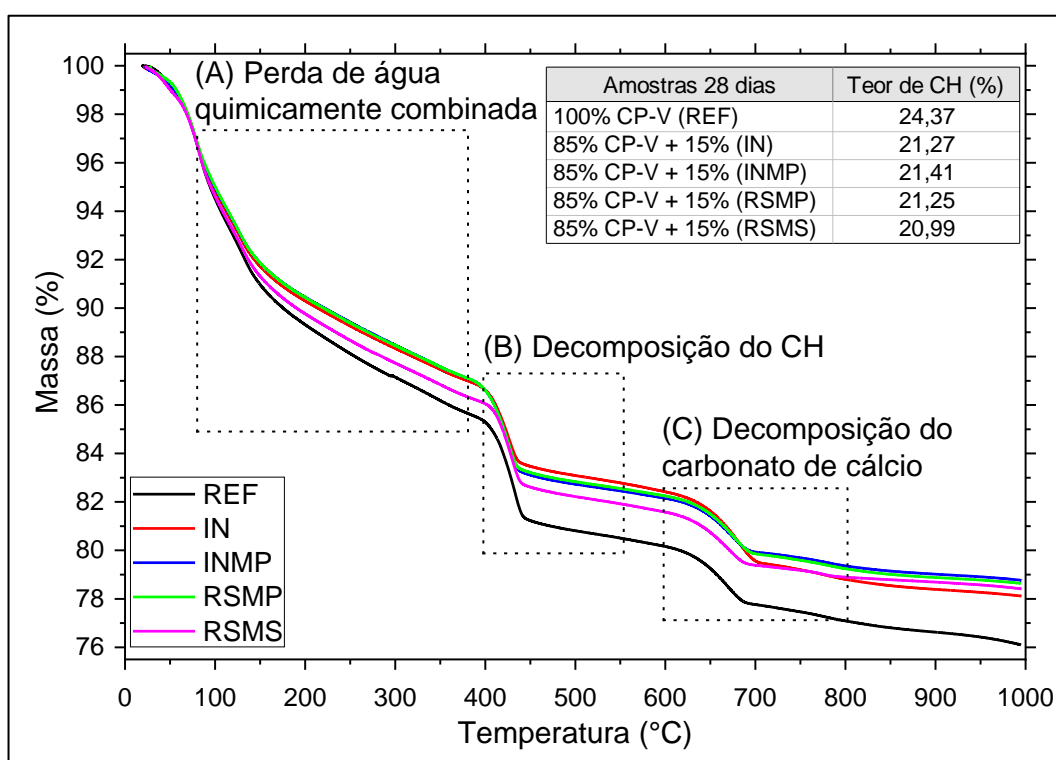


Figura 5.8 - Curvas de análise termogravimétrica aos 28 dias de cura das pastas.

A região B, entre as temperaturas de 400 e 550 °C, representa a faixa de temperatura de decomposição do CH (HOPPE FILHO *et al.*, 2017a). Utilizando as equações apresentadas por Rupasinghe *et al.* (2017), o teor real de CH presente nas pastas foi calculado, conforme resultados apresentados na Figura 5.9. Observa-se um maior teor de CH na amostra de referência (24,37%). O teor de CH nas pastas produzidas com RMF foi de 21,27% na amostra IN, de 21,41% na INMP, de 21,25% na RSMP e de 20,99% na RSMS. Entretanto, existe uma diferença no conteúdo de cimento entre as composições com e sem RMF. A menor formação de

CH nas pastas produzidas com RMF, possivelmente, ocorreu devido à redução do teor do cimento (para 85% em relação a amostra referência) e não devido às reações pozolânicas (TAVARES JUNIOR *et al.*, 2020; YUNHONG *et al.*, 2016). Para minimizar essa diferença, o teor teórico de CH produzido por uma pasta de cimento com 85% do teor de clínquer da pasta de referência ( $0,85 \cdot CH_{REF}$ ) foi identificado com uma linha tracejada. Considerou-se que o teor de CH é linearmente proporcional ao teor de cimento.

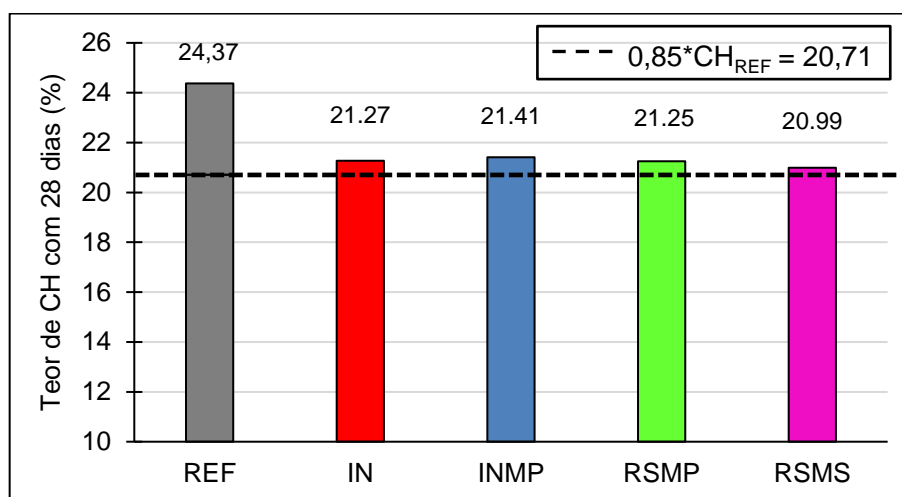


Figura 5.9 - Análise comparativa do teor de hidróxido de cálcio aos 28 dias de cura das pastas.

Pelos resultados, observa-se que todas as amostras produzidas com RMF, aos 28 dias de cura, apresentaram valores superiores à linha tracejada, ou seja, teores de CH acima da produção de referência. Esse resultado indica que o RMF não reagiu quimicamente com o cimento consumindo CH em uma reação secundária. Assim, reduziu-se a possibilidade da reatividade tardia mostrada no ensaio de calorimetria ser atribuída à uma reação pozolânica.

Na Figura 5.10, são apresentadas as curvas de TG das pastas aos 240 dias de cura. As curvas apresentam comportamento similar às curvas das pastas com 28 dias de cura, indicando perdas de massa mais intensas nas mesmas faixas de temperatura. Nesta idade, observa-se uma maior quantidade de CH na amostra referência (23,23%), conforme mostra a Figura 5.11. O teor de CH nas pastas produzidas com RMF foi de 22,35% na IN, de 22,04% na INMP, de 22,21% na RSMP e de 20,71% na RSMS. Da mesma maneira, foi identificado, com uma linha

tracejada, o teor de CH produzido por uma pasta de cimento com 85% do teor de clínquer da pasta de referência com 240 dias de cura ( $0,85 \cdot CH_{REF}$ ).

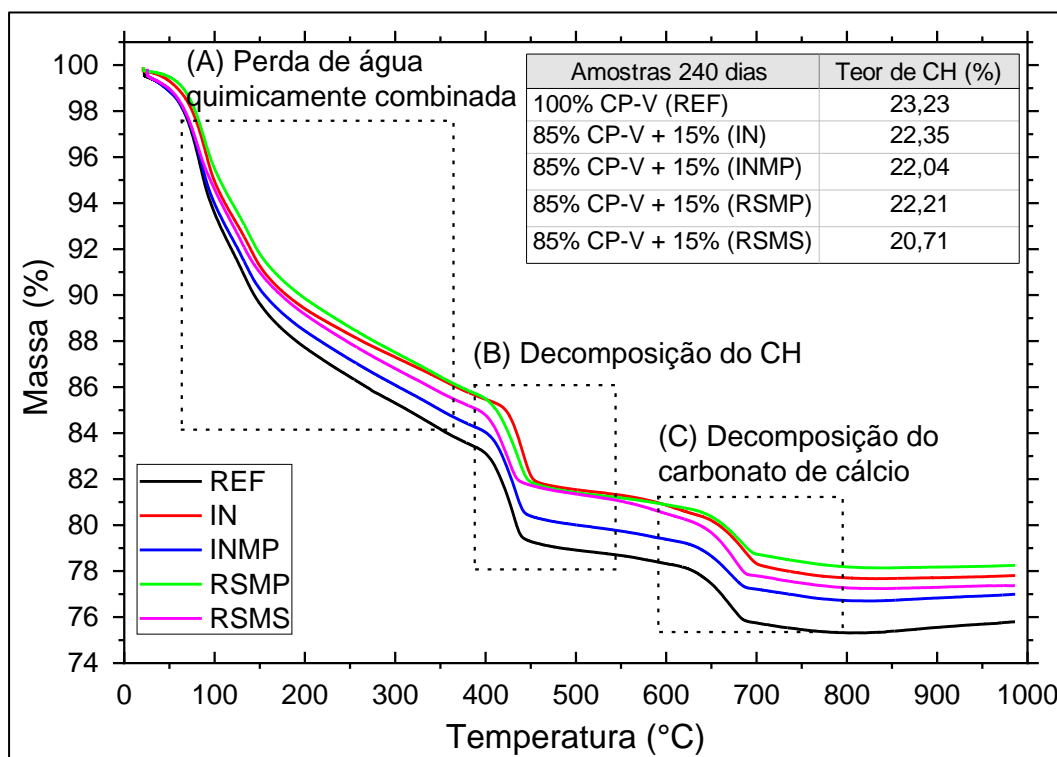


Figura 5.10 - Curvas de análise termogravimétrica aos 240 dias de cura das pastas.

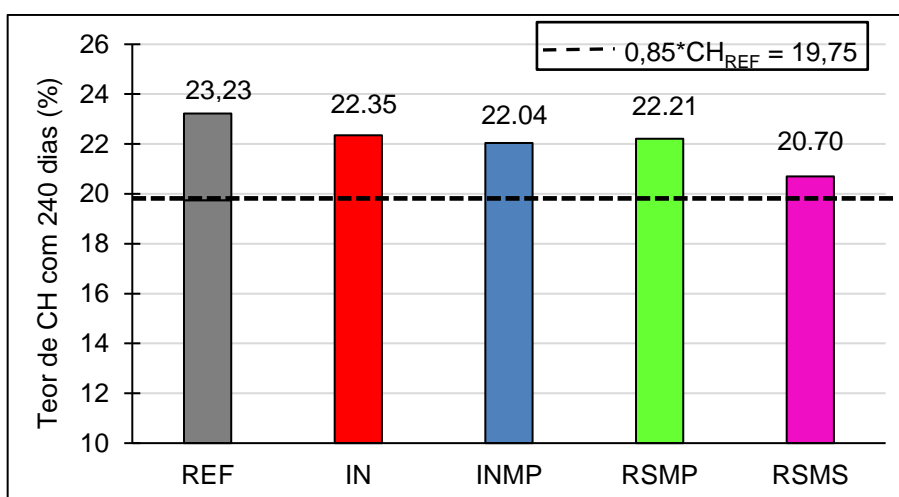


Figura 5.11 - Análise comparativa do teor de hidróxido de cálcio aos 240 dias de cura das pastas.

Acreditava-se que o RSMS poderia apresentar consumo de CH a longo prazo em função do tamanho reduzido das partículas e da composição química rica em sílica da amostra. Contudo, isso não ocorreu, uma vez que os teores de CH

remanescentes nas pastas com RMF ficaram acima do valor da pasta teórica. Os resultados contrariam os encontrados por Yao *et al.* (2020a), que mostraram que o RMF tratado mecanicamente, com redução do tamanho de partículas para  $d_{\text{médio}}$  de 13,70  $\mu\text{m}$ , consumiu CH. No entanto, na pesquisa, foi estudado um sistema de RMF, CaO e anidrita e o consumo de CH pode está relacionado à utilização de CaO como ativador, que induziu as reações pozolânicas.

Observa-se que, na condição de substituição parcial do cimento pelo RMF no teor de 15%, tanto a separação magnética, produzindo um rejeito rico em sílica (83,19%), como o tratamento mecânico secundário, produzindo partículas com  $d_{\text{médio}}$  de 4,66  $\mu\text{m}$  e com superfície específica de 5,52  $\text{m}^2/\text{g}$ , não foram eficientes para promover reações pozolânicas. Esse resultado sugere que a sílica, na forma de quartzo, nessa granulometria, não é reativa quando se analisa o composto cimentício.

### **5.3 Caracterização das argamassas para fins estruturais**

As argamassas de referência e com substituição do cimento por RMF foram avaliadas em relação ao índice de consistência, absorção de água e porosidade aberta, resistividade elétrica e resistência à compressão, cujos resultados são apresentados a seguir.

#### **5.3.1 Índice de consistência**

As medidas de espalhamento das argamassas no ensaio de consistência (*flow table*) são apresentadas na Figura 5.12. A argamassa de referência apresentou o maior espalhamento entre as amostras. Com o aumento do volume de sólidos, devido à substituição em massa do cimento por RMF (de menor massa específica), observa-se uma propensão ao aumento na demanda de água das argamassas com rejeito. Entretanto, esse efeito não é intenso, uma vez que a maior diferença de espalhamento, entre a amostra REF e RSMS, foi de 7%.



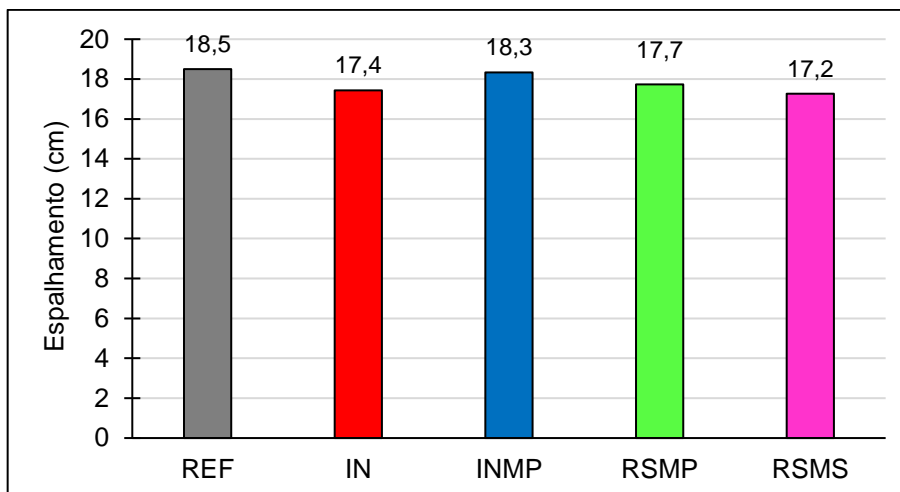


Figura 5.12 - Índice de consistência (espalhamento) das argamassas.

Comparando-se os resultados dos rejeitos IN e RSMP, que possuem granulometria semelhante, é possível observar que a separação magnética não apresentou interferência no comportamento de espalhamento das argamassas. Apesar da diferença granulométrica entre os rejeitos INMP e RSMS, os resultados de espalhamentos das argamassas foram similares. Isso indica que o tratamento mecânico secundário também não afetou negativamente a demanda de água.

Destaca-se que, em todas as argamassas produzidas com RMF, ocorreu uma pequena exsudação, conforme ilustrado na Figura 5.13. Essa exsudação pode estar relacionada à superfície lisa das partículas de quartzo do RMF, influenciando a interação água-partícula.



Figura 5.13 - Padrão de espalhamento das argamassas com RMF.

### 5.3.2 Porosidade aberta e absorção de água por imersão

Na Figura 5.14, são apresentados os valores médios dos resultados de porosidade aberta e absorção de água por imersão das argamassas, assim como o desvio padrão para cada situação analisada. Todas as argamassas apresentaram porosidade aberta com valores próximos de 17% e absorção de água por imersão abaixo de 10%, que são resultados consistentes aos encontrados por Almada (2021) para argamassas com adição de RMF.

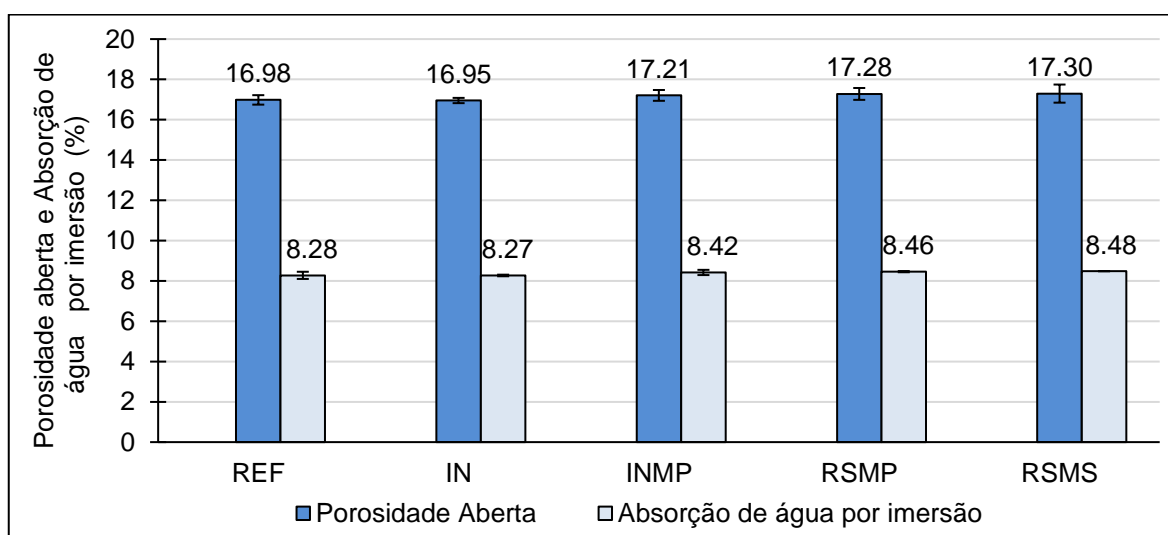


Figura 5.14 - Absorção de água por imersão e porosidade aberta das argamassas.

Para verificar se há diferenças significativas nos resultados, foi realizada uma análise estatística do tipo ANOVA (Análise de Variância) entre todos os valores individuais e as médias dos resultados, conforme apresenta a literatura (BEZERRA *et al.*, 2017; FONTES *et al.*, 2016b; SHETTIMA *et al.*, 2016). O objetivo da análise foi não rejeitar a hipótese de igualdade entre os valores do ensaio de porosidade aberta e de absorção de água por imersão entre todas as composições (TRIOLA, 2017). Para a porosidade aberta, foram obtidos o valor-P de 0,57, o valor de F de 0,79 e o F-crítico de 5,19. Portanto, a hipótese de igualdade não pode ser rejeitada. Para a absorção de água por imersão, foram obtidos valor-P de 0,45, o valor de F de 1,08 e o F-crítico de 5,19. Portanto, a hipótese de igualdade também não pode ser rejeitada.

A partir das análises, observa-se que a porosidade aberta e de absorção de água por imersão não foram influenciadas pela substituição do cimento por RMF no teor de 15% e nem pelos tratamentos de separação magnética e moagem (primária e secundária) dos rejeitos. Dessa forma, manteve-se o desempenho da argamassa de referência.

### 5.3.3 Resistividade elétrica

Na Figura 5.15, são apresentados os valores médios do ensaio de resistividade elétrica volumétrica das argamassas, assim como o desvio padrão para cada situação analisada. Observa-se que, para as amostras IN, INMP e RSMP os valores médios de resistividade foram inferiores ao da amostra de referência, enquanto que da amostra RSMS foi superior. Contudo, há pouca variação dos resultados, considerando os desvios padrão.

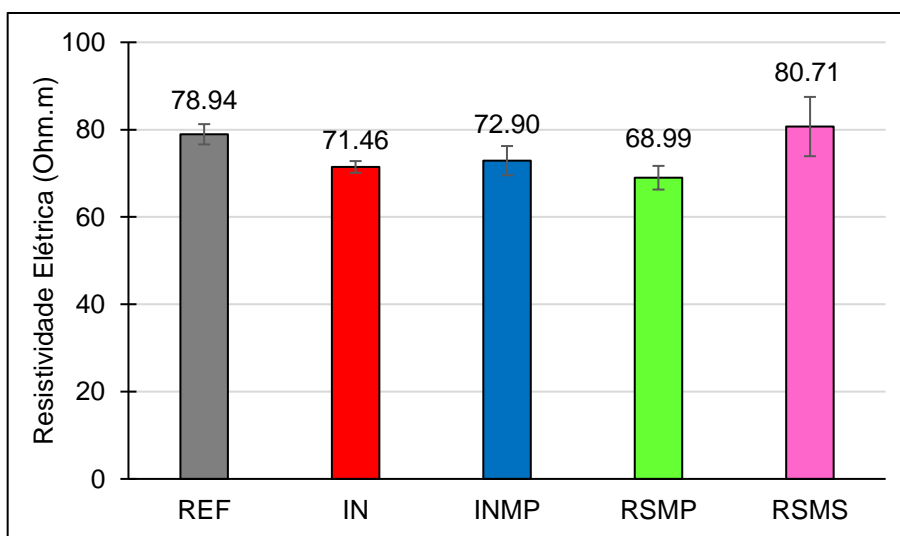


Figura 5.15 - Resistividade elétrica das argamassas.

Pela análise ANOVA, foi obtido o valor-P de 0,0154, o valor de F de 5,243 e o F-crítico de 3,478. Portanto, a hipótese de igualdade foi rejeitada. Entretanto, também realizou-se uma análise estatística do tipo “Teste t de *student* para duas amostras independentes” entre os valores individuais e as médias das amostras de referência e RSMS. O objetivo da análise foi de não rejeitar a hipótese de igualdade entre os

valores dessas duas composições. Como resultado, obteve-se o valor-P de 0,691, o valor de T-teste de 0,438 e o T-crítico de 3,182. Logo, a hipótese de igualdade não pode ser rejeitada. Isso indica que, para o rejeito com maior grau de tratamento, a resistividade elétrica mantém valores semelhantes aos da amostra de referência. Assim, pode-se concluir que a separação magnética e o tratamento mecânico não alteraram o comportamento da resistividade elétrica volumétrica das argamassas com teor de 15% de substituição do cimento por RMF.

De acordo com os resultados obtidos por Tavares Junior *et al.* (2020), quando a substituição parcial do cimento é realizada por pó de quartzo (inerte), o comportamento é semelhante a argamassa referência. E, quando a substituição é realizada por sílica ativa (pozolânica), a resistividade elétrica atinge valores de três a quatro vezes superiores ao da produção de referência. De forma geral, os MCS reativos tendem a aumentar a resistividade elétrica dos compostos, por refinarem a microestrutura através das reações pozolânicas, o que restringe a condução elétrica através da solução dos poros (MEDEIROS JÚNIOR E LIMA, 2016; RAMEZANIANPOUR *et al.*, 2011). Dessa forma, a pozolanicidade das adições também pode influenciar na resistividade elétrica dos compostos.

Nesse sentido, é possível observar que os rejeitos apresentaram comportamento semelhante às adições minerais inertes. Esse resultado é condizente com as análises da TG, que mostraram a não ocorrência de reações secundárias, e de absorção de água e porosidade, que indicaram manutenção das propriedades.

#### 5.3.4 Resistência à compressão

Na Figura 5.16, são apresentados os valores médios de resistência à compressão das argamassas, assim como o desvio padrão para cada situação analisada, aos 28 e 91 dias de cura. Aos 28 dias de cura, a resistência à compressão da argamassa de referência atingiu 44,2 MPa, enquanto a argamassa IN atingiu 33,5 MPa, a INMP 33,7 MPa, a RSMP 33,9 MPa e a RSMS 37,1 MPa. Os valores de resistência para as argamassas com rejeito, IN, INMP, RSMP e RSMS,

apresentaram queda de 24,2%, 23,8%, 23,3% e 16,1%, respectivamente, em relação à argamassa de referência. Esse comportamento para argamassas com a substituição parcial do cimento por RMF também foi relatada por Magalhães *et al.* (2018) e Yunhong *et al.* (2016).

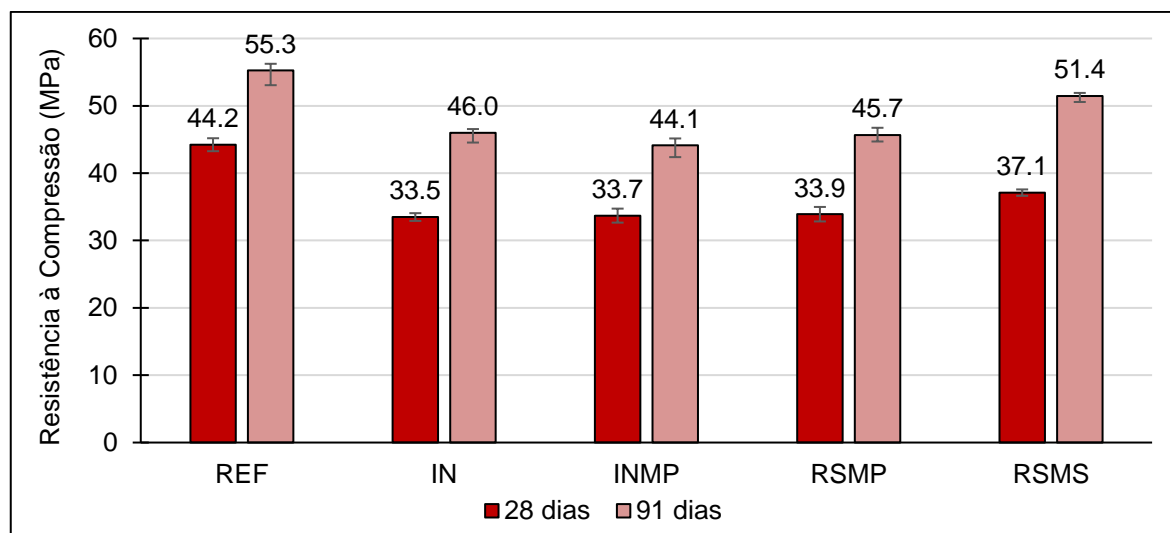


Figura 5.16 - Resistência à compressão das argamassas.

Percebe-se que as variações de resistência à compressão das argamassas produzidas com o RMF apresentaram valores superiores ao teor de substituição do cimento, que foi de 15%. De acordo com Zhang, Tang e Liu (2021) a queda na resistência ocorre devido aos minerais do RMF, como o quartzo e a hematita, serem inertes, e não são cimentantes, como o cimento Portland. Desta forma, o efeito fíler do RMF não compensou a redução do teor de cimento nas composições, que promoveu menor formação dos produtos de hidratação (XIONG *et al.*, 2017). Esses resultados são coerentes com os resultados apresentados nos ensaios de TG e calorimetria, que indicaram menor formação de produtos de hidratação nas pastas produzidas com RMF. A argamassa RSMS, rica em sílica e com granulometria mais fina, apresentou maior resistência entre argamassas produzidas com rejeito, possivelmente, induzida pelo maior efeito de nucleação e de preenchimento de vazios.

Aos 91 dias de cura, a argamassa de referência alcançou resistência à compressão de 55,3 MPa. Para as argamassas com RMF, as resistências foram de 46,0 MPa,

44,1 MPa, 5,7 MPa e 51,4 MPa, para as amostras IN, INMP, RSMP e RSMS, respectivamente. Para essas amostras, a redução da resistência em relação à amostra REF foi de 16,8%, 20,7%, 17,4% e 7,1%, respectivamente. Comparando esses resultados com os obtidos aos 28 dias, observa-se que, em idades avançadas, todas as argamassas produzidas com RMF tiveram ganhos de resistência superiores ao da argamassa referência. De acordo com Zhang *et al.* (2021), ao utilizar o RMF como MCS, o desenvolvimento de resistência à compressão de longo prazo ocorre em função de atividade pozolânica ao oferecer locais de nucleação para induzir e promover hidratação secundária. No entanto, tal atividade pozolânica não foi identificada no ensaio de TG.

Em relação às amostras com RMF, pela análise ANOVA, obtiveram-se os seguintes resultados para 28 dias de cura: valor-P de 0,04, valor de F de 4,48 e F-crítico de 4,06. E, para 91 dias de cura: valor-P de 0,01, valor de F de 6,93 e F-crítico de 4,06. Logo, a hipótese de igualdade foi rejeitada para ambas as idades. Isso sugere que os tratamentos interferiram no desempenho da resistência à compressão. Essa diferença entre às amostras se deve, principalmente, aos resultados da amostra RSMS. Com o tratamento mecânico secundário, a resistência à compressão aos 28 dias foi superior, alcançando desempenho mecânico próximo ao da amostra de referência aos 91 dias. Portanto, esse tratamento se apresentou mais benéfico que o primário.

#### 5.4 Flotação de bancada

Na Tabela 5.4, são apresentados os resultados do ensaio de flotação de bancada, realizado no material residual rico em ferro procedente da separação magnética.

Tabela 5.4 - Ensaio de flotação de bancada.

Amostra	Dados							Resultados		
	Reagentes (g/t)		Massa Teste (g)			Fe (%)		Recuperação (%)		A (%)
	Amido	Amina	Conc.*	Rejeito	Total	Conc.*	Rejeito	Peso	Metálica	
<b>Material residual</b>	275	68	163,8	185,0	348,8	56,70	23,17	46,96	68,42	38,92

Nota: \*Concentrado, A – teor de ferro na alimentação

Os resultados mostram que, com a separação magnética do RMF, é possível obter um produto com teor de ferro de 38,92%. Esse produto, ao ser submetido a um processo de flotação, pode produzir um concentrado de 56,70% de ferro e pode alcançar recuperação em massa de 46,95% e recuperação metálica de 68,42% em peso. Portanto, o reprocessamento do rejeito pode gerar um produto com composição de ferro similar aos minérios beneficiados utilizados pelas indústrias.

Esse resultado é consistente aos encontrados na literatura (DAUCE *et al.*, 2018; JUNIA; SILVA; BRANDÃO, 2018). Junia, Silva e Brandão (2018) aplicaram a separação magnética em minério com predominância de magnetita, com teor de ferro de 28,03%, e produziram um concentrado de 56,43% de ferro, com recuperação em peso de 44,83% e recuperação metálica de 88,24%. No estudo, a separação magnética aplica em minério com predominância de hematita, de teor de ferro de 36,32%, produziu um concentrado de 65,46%, mas com recuperação em peso de 24,44% e recuperação metálica de 44,06%. Os resultados mostram que a recuperação do material residual rico em ferro alcançou patamares de recuperação em massa e metálica interessantes economicamente, o que indica a viabilidade econômica de reaproveitamento do material.

## 6 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, RMF submetidos à diferentes tratamentos (separação magnética, moagem primária e moagem secundária) foram caracterizados e utilizados como MCS em pastas e argamassas, sendo estas estudadas no estado fresco e endurecido. Além disso, o subproduto da separação magnética foi avaliado quanto à viabilidade de reaproveitamento.

A partir dos resultados foi observado que a separação magnética foi eficiente, reduzindo o teor de ferro de 44,80% para 15,56%, de acordo com a FRX. Além disso, de acordo com a DRX, os picos associados à magnetita, identificados na amostra in natura, desapareceram nas amostras com separação magnética. A difratometria também indicou a elevada cristalinidade dos rejeitos, mesmo após a moagem secundária.

Com a moagem secundária, o rejeito RSMS apresentou 100% de suas partículas inferiores à 30  $\mu\text{m}$ , com  $d_{\text{médio}}$  (4,66  $\mu\text{m}$ ), o que foi mais de 10 vezes inferior às outras amostras. Contudo, a ASE dessa amostra (5,52  $\text{m}^2/\text{g}$ ) não foi suficiente para ser considerada pozolânica, conforme parâmetros da literatura.

Pelos resultados da calorimetria de condução isotérmica, as amostras com RMF apresentaram menor calor de hidratação, devido ao menor teor de cimento e não reatividade dos rejeitos. Entretanto, o tempo de pega de todas as amostras não foi alterado de forma representativa. Em geral, as pastas com RMF apresentaram comportamento similar ao da pasta de referência.

As análises de termogravimetria com 28 dias e com 240 dias de cura mostraram que o tratamento mecânico e a separação magnética não influenciaram a reatividade do material. No ensaio, constatou-se que os rejeitos não consumiram CH em uma reação pozolânica e o menor teor de portlandita observado foi devido à menor formação do produto, em razão do menor teor de cimento nas pastas.



No estado fresco, embora tenha-se aumentado o volume de sólidos nos compostos com substituição (em massa) do cimento Portland por RMF, a demanda de água não foi alterada consideravelmente. No estado endurecido, a argamassa com o rejeito mais fino e com separação magnética (RSMS) apresentou comportando similar ao da argamassa sem rejeito, o que indica que o rejeito atuou como fíler e agente nucleante para as reações de hidratação. Essa amostra apresentou maior potencial de uso em substituição ao cimento.

Comparando-se as amostras de granulometria similar (IN e RSMP), observou-se que os comportamentos em relação às propriedades no estado endurecido eram semelhantes. Portanto, a elevação no teor de sílica de 54,10% para 83,19% não alterou o desempenho dos compostos cimentícios produzidos com substituição parcial do cimento no teor de 15%.

Ao final das análises, pôde-se observar que o produto oriundo da separação magnética do RMF possuía teor de ferro de 38,92%. Quando submetido a um processo de flotação, foi possível produzir um concentrado de 56,40% de ferro, alcançando patamares de recuperação em massa e metálica interessantes economicamente. Dessa forma, destaca-se que o aproveitamento mais nobre do rejeito de minério de ferro se dá a partir do seu reprocessamento, que permite utilização tanto a utilização do material na própria indústria da mineração, quanto o aproveitamento em materiais de construção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMADA, B. S. **Influência da heterogeneidade de rejeitos de minério de ferro utilizados como adição mineral nas propriedades de microconcretos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

ALMADA, B. S.; MELO, L. S.; DUTRA, J. B.; BUBANI, L. C.; SILVA, G. J. B.; SANTOS, W. J.; AGUILAR, M. T. P. Influence of the heterogeneity of waste from wet processing of ornamental stones on the performance of Portland cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120036, 2020.

American Society for Testing and Materials: **ASTM C1679-17**: Standard practice for measuring hydration kinetics of hydraulic cementitious mixtures using isothermal calorimetry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ANDRADE, L. C. R. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

ANM. **Informe mineral**. Julho-Dezembro de 2019, p. 1–27, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/informes/informe-mineral-2019-2o-semester>. Acesso em: 20/07/21.

ARAÚJO, A. C.; AMARANTE, S. C.; SOUZA, C. C.; SILVA, R. R. R., Ore Mineralogy and its Relevance for Selection of Concentration Methods in processing of Brazilian Iron Ores, **Mineral Processing and Extractive Metallurgy**, v. 112:1, p. 54-64, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão, Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_ **9204**: Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrico-volumétrica — Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_ **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_ **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência, Rio de Janeiro, 2016.

AZEVEDO, U. R. de; MACHADO, M. M. M.; CASTRO, P. T. A.; RENGER, F. E.; TREVISOL, A.; BEATO, D. A. C., **Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG): proposta.** Capítulo de livro Repositório Institucional de Geociências, CPRM, 2012. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17149>. Acesso em: 25/08/2021.

BASTOS, L. A. DE C.; SILVA, G. C.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. Using Iron Ore Tailings from Tailing Dams as Road Material. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 10, p. 04016102, 2016.

BEDIAKO, M. Pozzolanic potentials and hydration behavior of ground waste clay brick obtained from clamp-firing technology. **Case Studies in Construction Materials**, v. 8, n. October 2017, p. 1–7, 2018.

BENEZET, J. C.; BENHASSAINE, A. Contribution of different granulometric populations to powder reactivity. **Particuology**, v. 7, n. 1, p. 39–44, 2009.

BENEZET, J. C.; BENHASSAINE, A. Grinding and pozzolanic reactivity of quartz powders. **Powder Technology**, v. 105, n. 1–3, p. 167–171, 1999.

BENTZ, D. P.; JONES, S. Z.; BENTZ, I. R.; PELTZ, M. A. Towards the formulation of robust and sustainable cementitious binders for 3-D additive construction by extrusion. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 215–224, 2018.

BERODIER, E.; SCRIVENER, K. Understanding the filler effect on the nucleation and growth of C-S-H. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 97, n. 12, p. 3764–3773, 2014.

BEZERRA, A. C. DA S.; SARAIVA, S. L. C.; LARA, L. F. S.; CASTRO, L. W. A.; GOMES, R. C.; RODRIGUES, C. S.; FERREIRA, M. C. N. F.; AGUILAR, M. T. P.

Effect of partial replacement with thermally processed sugar cane bagasse on the properties of mortars. **Revista Materia**, v. 22, n. 1, 2017.

BURRIS, L. E.; JUENGER, M. C. G. Milling as a pretreatment method for increasing the reactivity of natural zeolites for use as supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 163–170, 2016.

CAI, L. MA, B.; LI, X.; LV, Y.; LIU, Z.; JIAN, S. Mechanical and hydration characteristics of autoclaved aerated concrete (AAC) containing iron-tailings: Effect of content and fineness. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 361–372, 2016.

CARRASCO, E. V. M., MAGALHÃES, M. D. C., SANTOS, W. J. D., ALVES, R. C., MANTILLA, J. N. Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 31–38, 2017.

CARVALHO, P. S. L. de; SILVA, M. M.; ROCIO, M. A. R.; MOSZKOWICZ, J., Insumos Básico – Minério de Ferro, **BNDES Setorial**, v. 39, p. 197-234, 2014. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4802>. Acesso em: 23/10/2019.

CHANDRA PAUL, S.; ŠAVIJA, B.; BABAFEMI, A. J. A comprehensive review on mechanical and durability properties of cement-based materials containing waste recycled glass. **Journal of Cleaner Production**, v. 198, p. 891–906, 2018.

CHAVES, A. P.; LEAL FILHO, L. S.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios**, 5ª ed., cap. 11. Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), Ministério da Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, 2010.

CORDEIRO, G. C.; KURTIS, K. E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement and Concrete Research**, v. 97, p. 41–49, 2017.

DAUCE, P.D.; CASTRO, G.B.; LIMA, M.M.F.; LIMA, R.M.F. Characterisation and magnetic concentration of an iron ore tailings. **Journal of Materials Research and Technology**, 2018.

DEFÁVERI, K. C. S.; SANTOS, L. F.; CARVALHO, J. M. F.; PEIXOTO, R. A. F.; SILVA, G. J. B. Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: A study of mechanical and microstructural properties. **Construction and Building Materials**, v. 220, p. 375–385, 2019.

DNPM. **Anuário Mineral Brasileiro - Principais substâncias Metálicas 2017**.

Disponível em:

<[http://www.anm.gov.br/dnpm/publicações/serie\\_estatisticas\\_e\\_economia\\_mineral/anuario\\_mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb-\\_metalicos2017](http://www.anm.gov.br/dnpm/publicações/serie_estatisticas_e_economia_mineral/anuario_mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb-_metalicos2017)> Acessado em: 27/10/2017.

DUAN, P.; YAN, C.; ZHOU, W.; REN, D. Fresh properties, compressive strength and microstructure of fly ash geopolymer paste blended with iron ore tailing under thermal cycle. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 76–88, 2016.

FEAM. **Inventário de barragem do Estado de Minas Gerais: ano 2017**, Fundação Estadual do Meio Ambiente, Belo Horizonte, 2018.

FLORES, Y. C. TOLEDO FILHO, R. D.; CORDEIRO, G. C.; TAVARES, L. M. **Investigação da moagem ultrafina de quartzo**. In: XXIV ENTIMME, 2011, Salvador/Bahia, p. 424–431.

FONTES, W. C., MENDES, J. C., SILVA, S. N., PEIXOTO, R. A. F. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 988–995, 2016.

GALVÃO, J. L. B.; ANDRADE, H. D.; BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, R. A. F.; MENDES, J. C., Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. **Journal of Cleaner Production**, v. 200, p. 412–422, 2018.

HAN, F.; LI, L.; SONG, S.; LIU, J., Early-age hydration characteristics of composite binder containing iron tailing powder, **Powder Technology**, v. 3015, p. 322-331, 2017.

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; QUARCIONI, V. A.; MEDEIROS, M. H. F. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento portland (Parte i): índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-x (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e chapelle modificado. **Revista Matéria**, v. 22, n. 3, 2017a.

HUANG, X.; RANADE, R.; LI, V. C. Feasibility Study of Developing Green ECC Using Iron Ore Tailings Powder as Cement Replacement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 7, p. 923–931, 2013.

IBRAM. **Relatório Anual de Atividades: janeiro a dezembro de 2019**.

Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/04/2018-2019.pdf>.

Acessado em 20/07/21.

ILIĆ, B.; RADONJANIN, V. MALEŠEV, M.; ZDUJIĆ, M.; MITROVIĆ, A. Effects of mechanical and thermal activation on pozzolanic activity of kaolin containing mica. **Applied Clay Science**, v. 123, p. 173–181, 2016.

JUNIA, N. L. D. C. D.; SILVA, R. C. F.; BRANDÃO, P. R. G. **Caracterização Tecnológica e Mineralógica dos Itabiritos Quartzo-Dolomítico e Dolomítico da Mina de Jangada, e Uso da Separação Magnética como Método de Concentração**, In: Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ. v. 41, n. 3, p. 195–206, 2018.

KADRI, E. H.; AGGOUN, S.; SCHUTTER, D.; EZZIANE, K. Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration. **Materials and Structures**, v. 43, n. 5, p. 665–673, 2010.

KADRI, E. H.; DUVAL, R. Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 2, p. 138-142, 2002.

KHAN, R. I.; ASHRAF, W. Effects of ground wollastonite on cement hydration kinetics and strength development. **Construction and Building Materials**, v. 218, p. 150–161, 2019.

KLEMCZAK, B.; BATOG, M. Heat of hydration of low-clinker cements: Part I. Semi-adiabatic and isothermal tests at different temperature. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 123, n. 2, p. 1351–1360, 2016.

KURANCHIE, F. A.; SHUKLA, S. K.; HABIBI, D. Utilization of iron ore mine tailings for the production of geopolymer bricks. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 30, n. 2, p. 92–114, 2016.

KURANCHIE, F. A.; SHUKLA, S. K.; HABIBI, D.; MOHYEDDIN, A. Utilization of iron ore tailings as aggregates in concrete. **Cogent Engineering**, v. 2, n. 1, 2015.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars Effect of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1939–1947, 2003.

LI, C.; SUN, H.; BAI, J.; LI, L. Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings Part 1: The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting, **Journal of Hazardous Materials**, v. 174, n. 1-3, p. 71–77, 2010a.

LI, C.; SUN, H.; YI, Z.; LI, L. Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings Part 2: The residues after iron recovery from iron ore tailings to prepare cementitious material, **Journal of Hazardous Materials**, v. 174, n. 1-3, p. 78–83, 2010b.

LI, R.; ZHOU, Y.; LI, C.; LI, S.; HUANG, Z. Recycling of industrial waste iron tailings in porous bricks with low thermal conductivity. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 43–50, 2019.

LI, Z.; LU, D.; GAO, X. Analysis of correlation between hydration heat release and compressive strength for blended cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 260, p. 120436, 2020.

LIMA, R. M. F.; LOPES, G. M.; GONTIJO, C. DE F. Aspectos Mineralógicos, Físicos E Químicos Na Flotação Catiônica Inversa De Minérios De Ferro De Baixos Teores, Do Quadrilátero Ferrífero-Mg. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 8, n. 2, p. 126–131, 2011.

LÖF, A.; ERICSSON, M.; LÖF O. Global Iron Ore Report: Iron Ore Prices Remain Relatively High. **Engineering and Mining Journal**, 2019.

LUO, L.; ZHANG, Y.; BAO, S.; CHEN, T. Utilization of Iron Ore Tailings as Raw Material for Portland Cement Clinker Production. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2016, 6 p., 2016.

LV, X.; SHEN, W.; WANG, L.; DONG, Y., ZHANG, J.; XIE, Z. A comparative study on the practical utilization of iron tailings as a complete replacement of normal aggregates in dam concrete with different gradation. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 704–715, 2019.

MA, B-G.; CAI, L-X.; JIAN, S-W. Utilization of iron tailings as substitute in autoclaved aerated concrete: physico-mechanical and microstructure of hydration products. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 162–171, 2016.

MAGALHÃES, L. F.; FRANÇA, S.; OLIVEIRA, M. S.; PEIXOTO, R. A. F.; BESSA, S. A. L.; BEZERRA, A. C. S. Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, 2020.

MAGALHÃES, L. F.; MORAIS, I. S.; LARA, L. F. S.; RESENDE, D. S.; MENEZES, R. M. R. O.; AGUILAR, M. T. P.; BEZERRA, A. C. S. Iron ore tailing as addition to partial replacement of Portland cement. **Materials Science Forum**, v. 930, p. 125–130, 2018.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G., Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement, **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 11-16, 2016.



MENDES, B. C.; PEDROTI, L. G.; FONTES, M. P. F.; RIBEIRO, J. C. L.; VIEIRA, C. M. F.; PACHECO, A. A.; AZEVEDO, A. R. G. Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks.

**Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116669, 2019.

MENEZES, R. M. R. O.; SILVA, R. M.; FIGUEIREDO, E. P.; BEZERRA, A. C. S.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. Hydraulic binder obtained from recycled cement and sand powder. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 6, p. 1178–1185, 2018.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedades, e Materiais**, 3a ed. São Paulo: Pini, 2008.

MITROVIĆ, A.; ZDUJIC, M. Preparation of pozzolanic addition by mechanical treatment of kaolin clay. **International Journal of Mineral Processing**, v. 132, p. 59–66, 2014.

MORAIS, C. F.; BELO, B. R.; BEZERRA, A. C. S.; LOURA, R. M.; PORTO, M. P.; BESSA, S. A.L. Thermal and mechanical analyses of colored mortars produced using Brazilian iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, v. 268, p. 121073, 2021.

MORAIS, I. S.; MAGALHÃES, L.; LARA, L. F. S.; CORRÊA, E. C. S.; MENEZES, R. M. R. O.; AGUILAR, M. T. P.; BEZERRA, A. C. S. Sericitic phyllite as addition in Portland cement. **Materials Science Forum**, v. 930, p. 131–136, 2018.

NOCHAIYA, T.; WONGKEO, W.; CHAIPANICH, A. Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement-fly ash-silica fume concrete. **Fuel**, v. 89, n. 3, p. 768–774, 2010.

O GLOBO. **Rompimento das barragens de Mariana e de Brumadinho colocam em xeque modelo de mineração no Brasil**. O GLOBO, v. 8, n. 5, p. 55, 2019. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/rompimentos-das-barragens-de-mariana-de-brumadinho-colocam-em-xeque-modelo-de-mineracao-no-brasil-23424169>. Acesso em 15/11/20.

OBENAU-EMLER, R.; FALAH, M.; ILLIKAINEN, M. Assessment of mine tailings as precursors for alkali-activated materials for on-site applications. **Construction and Building Materials**, v. 246, p. 118470, 2020.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 512–519, 2012.

PEIXOTO, R. A. F. OLIVEIRA, J. R. BARROS, J. B. **Processo de separação do minério de ferro contido em resíduos provenientes da extração e do beneficiamento de minério de ferro**. Requisição de patente. Instituto Nacional de Propriedade Industrial. 2013. p. 2013, 2013.

PEIXOTO, R. F.; MENDES, J. C.; FONTES, W. C.; BASTOS, L. A. C.; SANT'ANNA, J. N.; SANTOS, D. H., **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro na construção civil**. Relatório Técnico Reciclos, UFOP, p. 56, 2016.

POPPE, A. M.; DE SCHUTTER, G. Cement hydration in the presence of high filler contents. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 12, p. 2290–2299, 2005.

RAMEZANIANPOUR, A. A.; PILVAR, A.; MAHDIKHANI, M.; MOODI, F. Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 2472-2479, 2011.

RÊGO, J. H. S.; NEPOMUCENO, A. A.; FIGUEIREDO, E. P.; HASPARYK, N. P.; BORGUES, L. D. Effect of Particle Size of Residual Rice-Husk Ash in Consumption of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 6, p. 04014178, 2015.

RESENDE, D. S.; RADISPIEL FILHO, H.; KELES, J. G.; BEZERRA, A. C. S.; AGUILAR, M. T. P.; GOUVEIA, A. M. C. Eucalyptus chip ashes in cementitious composites. **Materials Science Forum**, v. 775–776, p. 205–209, 2014.

RIBEIRO, J. P.; RIBEIRO, C. H. T.; PINTO, P. F.; ROCHA, R. B. The challenge to scavenge IRON from tailings produced by FLOTATION a new approach: The super-WHIMS & the bigFLUX magnetic matrix. **Revista Escola de Minas**, v. 70, n. 3, p. 357–363, 2017.

RUPASINGHE, M.; NICOLAS, R. S.; MENDIS, P.; SOFI, M.; NGO, T. Investigation of strength and hydration characteristics in nano-silica incorporated cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, p. 17–30, 2017.

SAEDI, A.; JAMSHIDI-ZANJANI, A.; DARBAN, A. K. A review on different methods of activating tailings to improve their cementitious property as cemented paste and reusability. **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 110881, 2020.

SANT'ANA FILHO, J. N.; SILVA, S. N.; SILVA, G. C.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. Technical and Environmental Feasibility of Interlocking Concrete Pavers with Iron Ore Tailings from Tailings Dams. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 9, p. 04017104, 2017b.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, n. June, p. 2–26, 2018.

SHETTIMA, A. U.; HUSSIN, M. W.; AHMAD, Y.; MIRZA, J. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 72–79, 2016.

SILVA, J. P. P. **Mecanismo de ação do silicato de sódio como depressor em flotação**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

SOARES, M. M. N. S.; GARCIA, D. C. S.; FIGUEIREDO, R. B.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. Comparing the pozzolanic behavior of sugar cane bagasse ash to amorphous and crystalline SiO<sub>2</sub>. **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 20–25, 2016.

SONG, H.; JEONG, Y.; BAE, S.; JUN, Y.; YOON, S.; OH, J. E. A study of thermal decomposition of phases in cementitious systems using HT-XRD and TG.

**Construction and Building Materials**, v. 169, p. 648–661, 2018.

SOURI, A.; KAZEMI-KAMYAB, H.; SNELLINGS, R.; NAGHIZADEH, R.; GOLESTANI-FARD, F.; SCRIVENER, K. Pozzolanic activity of mechanochemically and thermally activated kaolins in cement. **Cement and Concrete Research**, v. 77, p. 47–59, 2015.

SUTHERS, S. P.; NUNNA, V.; TRIPATHI, A.; DOUGLAS, J.; HAPUGODA, S. Experimental study on the beneficiation of low-grade iron ore fines using hydrocyclone desliming, reduction roasting and magnetic separation, **Mineral Processing and Extractive Metallurgy**, Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section C, v. 123, n. 4, p. 212–227, 2014.

TAVARES JUNIOR, L. R. C.; COSTA, L. M.; CETLIN, P. R.; TAVARES, L. R. C.; BEZERRA, A. C. S.; AGUILAR, M. T. P. Influence of quartz powder and silica fume on the performance of Portland cement. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–15, 2020.

TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry**, 2 ed., T. Telford, Londres, 1997.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística**, 12 ed, Rio de Janeiro: LTC, 2017.

WADSÖ, L.; WINNEFELD, F.; RIDING, K.; SANDBERG, P. **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**, 1<sup>a</sup> ed, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.

WANG, C.; HARBOTTLE, D.; LIU, Q.; XU, Z. Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice. **Minerals Engineering**, v. 58, p. 113–131, 2014.

WU, C-R.; HONG, Z-Q.; YIN, Y-H.; KOU, S-C. Mechanical activated waste magnetite tailing as pozzolanic material substitute for cement in the preparation of cement products. **Construction and Building Materials**, v. 252, p. 119129, 2020.

XIONG, C.; LI, W.; JIANG, L.; WANG, W.; GUO, Q. Use of grounded iron ore tailings (GIOTs) and BaCO<sub>3</sub> to improve sulfate resistance of pastes.

**Construction and Building Materials**, v. 150, p. 66–76, 2017.

YAKUBAILIK, E. K.; BALAEV, A. D.; GANZHENKO, I. M. Evaluation of Additional Iron Recovery from Iron Ore Tailings. **Journal of Mining Science**, v. 53, n. 3, p. 559–564, 2017.

YANG, C.; CUI, C.; QIN, J.; CUI, X. Characteristics of the fired bricks with low-silicon iron tailings. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 36–42, 2014.

YANG, C.; LI, S.; ZHANG, C.; BAI, J.; GUI, Z. Application Of Superconducting High Gradient Magnetic Separation Technology On Silica Extraction From Iron Ore Beneficiation Tailings. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, An International Journal, v. 39, n. 1, p. 44–49, 2018.

YANG, M.; SUN, J.; DUN, C.; DUAN, Y.; MENG, Z. Cementitious activity optimization studies of iron tailings powder as a concrete admixture. **Construction and Building Materials**, v. 265, p. 120760, 2020.

YAO, G.; LIU, Q.; WANG, J.; WU, P.; LYU, X. Effect of mechanical grinding on pozzolanic activity and hydration properties of siliceous gold ore tailings. **Journal of Cleaner Production**, v. 217, p. 12–21, 2019.

YAO, G.; WANG, Q.; SU, Y.; WANG, J.; QIU, J.; LYU, X. Mechanical activation as an innovative approach for the preparation of pozzolan from iron ore tailings. **Minerals Engineering**, v. 145, n. October 2019, p. 106068, 2020a.

YAO, G.; WANG, Q.; WANG, Z.; WANG, J.; LYU, X. Activation of hydration properties of iron ore tailings and their application as supplementary cementitious materials in cement. **Powder Technology**, v. 360, p. 863–871, 2020b.

YI, Z.-I.; SUN, H.-H.; WEI, X.-Q. LI, C. Iron ore tailings used for the preparation of cementitious material by compound thermal activation. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v. 16, n. 3, p. 355–358, 2009.

YOUNG, G.; YANG, M. Preparation and characterization of Portland cement clinker from iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 152–156, 2019.

YUNHONG, C.; FEI, H.; WENCHUAN, L.; RUI, L.; GUANGLU, L.; JINGMING, W. Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 164–170, 2016.

ZHANG, N.; TANG, B.; LIU, X. Cementitious activity of iron ore tailing and its utilization in cementitious materials, bricks and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 288, p. 123022, 2021.

ZHANG, W.; GU, X.; QIU, J.; LIU, J.; ZHAO, Y.; LI, X. Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 260, p. 119917, 2020.

ZHAO, S.; FAN, J.; SUN, W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 540–548, 2014.

ZHAO, Y.; ZHANG, Y. CHEN, T.; CHEN, Y.; BAO, S. Preparation of high strength autoclaved bricks from hematite tailings. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 450–455, 2012.