

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

**“ESTUDO DE ARGAMASSA ESTRUTURAL COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DA  
MINERAÇÃO DE FERRO DEPOSITADO EM BARRAGEM DE LAMA NO  
ESTADO DE MINAS GERAIS- BRASIL”**

Autor(a): Nara Linhares Borges de Castro  
Orientador(a): Prof. Dr. White José dos Santos  
Co- orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto de Souza Oliveira

Belo Horizonte  
Julho/2018

Nara Linhares Borges de Castro

**“ESTUDO DE ARGAMASSA ESTRUTURAL COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DA  
MINERAÇÃO DE FERRO DEPOSITADO EM BARRAGEM DE LAMA NO  
ESTADO DE MINAS GERAIS- BRASIL”**

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.

Orientador(a): Prof. Dr. White José dos Santos

Co- orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto de Souza Oliveira

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2018

Nara Linhares Borges de Castro

**“ESTUDO DE ARGAMASSA ESTRUTURAL COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DA  
MINERAÇÃO DE FERRO DEPOSITADO EM BARRAGEM DE LAMA NO  
ESTADO DE MINAS GERAIS- BRASIL”**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 06 de julho de 2018.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. White José dos Santos  
Orientador(a) - UFMG/DEMC

---

Prof. Dr. Carlos Augusto de Souza Oliveira  
Co-Orientador - UNIFEI

---

Prof.<sup>a</sup>. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilár  
UFMG/DEMC

---

Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto  
UFOP/PROPEC



## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu esposo Alessandro Castro por toda cumplicidade e paciência nas horas difíceis, por me fazer acreditar que era possível realizar este sonho.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por nunca me desamparar e me prover forças nesta caminhada, sem a vossa presença em minha vida nada disto seria possível.

Ao meu esposo Alessandro por todo companheirismo e amor nesta jornada, por sonhar comigo este sonho e acreditar que era possível.

Aos meus pais, Bernadete e José Nelson, por terem possibilitado minha educação, a formação de princípios e por terem me ensinado o valor do trabalho.

Aos meus sogros Maria da Piedade e Daniel, por terem sido tão colaborativos em tantos momentos difíceis, me apoiando e me incentivando com amor, vocês são minha segunda família.

A querida professora Dra. Maria Teresa Paulino Aguiar, por ter me ensinado o valor do pensamento científico, contribuindo para o aprimoramento dos meus conceitos originais e do meu senso crítico, de forma tão carinhosa.

Ao meu orientador professor Dr White José dos Santos, por todo conhecimento compartilhado, dedicação e empenho em sempre apoiar os alunos, por toda amizade e incentivo. Obrigada por compartilhar o saber conosco!

Ao meu co- orientador professor Dr Carlos Augusto, por também compartilhar seu conhecimento e me apoiar na construção desta pesquisa.

A todos os professores do programa de Pós graduação em Construção Civil da UFMG, por colaborarem com a minha formação de forma tão positiva.

A toda equipe de técnicos de laboratórios da UNIFEI e UFMG, por serem tão colaborativos e essenciais no trabalho experimental. Agradecimento especial ao sr Antônio, pela boa vontade de sempre.

A FAPEMIG por fomentar a pesquisa no nosso país.

Com vocês, queridos, divido a alegria desta experiência.

*“O que vale na vida não é o ponto de partida e sim a caminhada. Caminhando e semeando, no fim terás o que colher.” (Cora Coralina).*



## RESUMO

Existem algumas iniciativas de estudos, na tentativa de aplicação do resíduo de minério de ferro em materiais da construção civil, como, confecção de concretos, confecção de blocos estruturais, pavimentação e argamassas. Entretanto, em boa parte dos casos é necessário aprofundar não só os estudos técnicos, mas também as dosagens e aplicabilidade. As próprias mineradoras já manifestam interesses nesses estudos, uma vez que, a destinação correta do resíduo de mineiro de ferro (RMF) e a grande fiscalização ambiental corroboram para ações bem onerosas. Este trabalho tem por objetivo discutir e analisar uma alternativa de reaproveitamento de resíduo obtido através do beneficiamento de minério de ferro e depositado em barragem de lama, na confecção de argamassas estruturais, em forma de adição. Avaliando-se as características químicas do resíduo percebeu-se presença predominante de Quartzo -  $\text{SiO}_2$ , Hematita -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Goethita -  $\text{FeO}(\text{OH})$  e Gibbsita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , não sendo encontrados componentes químicos ou mineralógicos que pudessem comprometer a qualidade dos compósitos cimentícios com possíveis reações deletérias, possuindo massa específica de  $4,04 \text{ g/cm}^3$ . Avaliando as propriedades de desempenho das argamassas estruturais tanto no estado fresco como endurecido, observou-se que o produto final não demandou mais água de amassamento devido ao reduzido teor de poros, levantando indícios de ser um material com grande potencialidade de atuar como filer. No estudo da dosagem experimental e identificação o teor ótimo de utilização do RMF, foram caracterizados pela moldagem de argamassas estruturais com proporções de 10%, 20%, 30% e 40% de adição do RMF e posteriormente, submetidos a ensaios. Argamassas com adição de RMF mostraram conservação de propriedades no que tange à densidade do material, redução nos índices de vazios, diminuição da absorção de água em estado endurecido e propriedades mecânicas quando comparadas ao traço de referência. Os resultados indicam que as adições até mesmo dos teores mais altos mantem as propriedades mecânicas e melhoram o fechamento de poros causado pelo efeito filer do produto, proporcionando indícios de boa durabilidade do material, percebendo-se indícios da a viabilidade técnica do material em estudo.

Palavras-chave: **Reaproveitamento de Resíduo; Minério de ferro; Argamassa estrutural.**

## ABSTRACT

There are many studies initiatives in the attempt to apply iron ore tailing to civil construction materials, such as concrete making, building blocks, paving and mortar. However, in most cases, it is necessary to deepen not only the technical studies, but also the dosages and applicability. The mining companies themselves have shown interest in these studies, since the correct allocation of the tailing of iron ore (IOT) and great environmental inspection corroborate for very onerous actions. The objective of this work is to discuss and to analyze an alternative of reutilization of tailing obtained by the processing of iron ore and deposited in mud dam, in the construction of structural mortars, in the form of addition. It was verified the chemical presence of Quartz-SiO<sub>2</sub>, Hematite-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Goethite-FeO (OH) and Gibbsite-Al (OH)<sub>3</sub>. No chemical or mineralogical components were found that could compromise the quality of the composites cations with possible deleterious reactions, having a specific mass of 4,04 g / cm<sup>3</sup>. By evaluating the performance properties of the structural mortar both in the fresh and hardened state, it was observed that the final product did not require more kneading water due to the reduced pore content, proving to be a material with great potential to act as a filler. In the study of the experimental dosage and the identification of the optimum utilization level of the IOT, they were characterized by the molding of structural mortar with proportions of 10%, 20%, 30% and 40% of the addition of the IOT and later submitted to tests. Mortars with addition of RMF showed small increase in material density, reduction in void indices, decrease in water absorption in hardened state and better mechanical properties when compared with reference traces. The results indicate that additions of even higher contents maintain the mechanical properties and improve the pore closure caused by the filler effect of the product, providing indications of good durability of the material, evidencing evidence of the technical feasibility of the material being studied.

**Keywords: Iron ore tailings; Iron ore; Structural mortar.**



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Investimento do setor de mineração.....	6
Figura 2 - Área de mineração de ferro em Minas Gerais. ....	7
Figura 3 - Esquema típico de processamento do minério de ferro.....	8
Figura 4- Programa experimental da pesquisa .....	17
Figura 5- Localização geográfica da barragem de lamas B04 Itaminas, Sarzedo-MG.....	19
Figura 6- Espectrômetro do RMF .....	36
Figura 7 - Ajuste de granulometria do Resíduo de minério de ferro.....	38
Figura 8 - Comportamento dos poros do Resíduo de minério de ferro. ....	40
Figura 9 - Análise microestrutural das pastas por Microscopia de varredura eletrônica: (a, c, e, g) Referência e (b, d, f, h) RMF. ....	41
Figura 10 - Microestrutura das pastas próximo as partículas de Resíduo de minério de ferro. ....	43
Figura 11 - EDS do Resíduo de minério de ferro – Área demarcada na figura 11. ....	44
Figura 12 - Microestrutura da pasta com Resíduo de minério de ferro. ....	45
Figura 13 - EDS do Resíduo de minério de ferro – Área demarcada na figura 13. ....	45
Figura 14- Determinação do índice de consistência. ....	46
Figura 15 - Absorção e retenção de água. ....	48
Figura 16 – Resistência à tração na flexão ( $f_t$ ) para as idades de 7 e 28 dias (MPa). ....	49
Figura 17 - Resistência à compressão ( $f_c$ ) para as idades de 7 e 28 dias (MPa). ....	50
Figura 18- Densidade da argamassa estrutural.....	52
Figura 19- Absorção de água das argamassas estruturais.....	52
Figura 20- Determinação do índice de vazios das argamassas estruturais. ....	53
Figura 21- Microscopia digital dos corpos de prova confeccionados. ....	54
Figura 22-Microscopia digital, após ensaio de choque térmico.....	55
Figura 23 - Resistência a compressão ( $f_c$ ) pós ensaio de choque térmico. ....	56



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação e Classificação de Resíduos.....	10
Tabela 2- especificação de propriedades físicas CPV- ARI.....	20
Tabela 3 - Fragmento da norma ABNT NBR 7214: 2015 sobre frações de areia .....	21
Tabela 4- Ficha técnica da barragem B4- Itaminas Comércio de Minérios S/A .....	22
Tabela 5 - Ensaio Executados no Resíduo de Minério de ferro .....	25
Tabela 6- Ensaio Executados- Argamassas estruturais.....	33
Tabela 7 - Percentuais de composição mineralógica correlacionado a outros estudos. ..	34
Tabela 8 - Resultado Fluorescência de Raios- X.....	34
Tabela 9 – Resultado semi-quantitativo da composição química do Resíduo de minério de ferro. ....	35
Tabela 10 - Resultado semi-quantitativo da composição mineralógica do.....	35
Tabela 11 - Granulometria do resíduo moído na condição final.....	39
Tabela 12 - Percentuais de absorção e retenção de água nas argamassas.....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de normas técnicas.

APP- Área de preservação permanente.

ARGEST – Argamassa estrutural confeccionada com adição de resíduo de minério de ferro.

CERN- Consultoria Empreendimento e Recursos Naturais.

CPV- ARI- Cimento Portland de alta resistência inicial.

CREA- Conselho Regional de Engenharia e Agronomia.

DNPM- Departamento Nacional de Produção Mineral.

FEAM- Fundação Estadual do meio Ambiente.

IBRAM- Instituto Brasileiro de Mineração.

ICTR- Instituto de Ciência e tecnologia em resíduos e desenvolvimento sustentável.

IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas

NBR – Norma Brasileira.

PMB- produção Mineral Brasileira.

RMF – Resíduo de minério de ferro.

SUPRAM- Superintendência Regional de Regularização Ambiental.

UNIFEI- Universidade federal de Itajubá

UFMG- Universidade Federal de Minas Gerais.

**LISTA DE SÍMBOLOS**

$\text{Al}(\text{OH})_3$ - Gibbsita

$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  - Caulinita

$\text{C}_3\text{A}$  - aluminato tricálcico

$\text{Fe}_2\text{O}_3$ - Hematita

$\text{FeO}(\text{OH})$ - Goethita

$\text{Fe}_3\text{O}_4$ - Magnetita

$\mu$  - micro

$\text{SiO}_2$ - Quartzo

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Considerações iniciais e justificativa.....	1
1.2	Estrutura do trabalho .....	4
1.3	Objetivos .....	4
	CAPÍTULO II .....	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1	Histórico da mineração de ferro no Brasil .....	5
2.2	Os processos do beneficiamento do minério de ferro.....	7
2.3	Utilização dos resíduos de minério de ferro na construção civil .....	11
2.4	Argamassas estruturais.....	14
2.5.1	A importância da durabilidade de micro concretos.....	15
	CAPÍTULO III .....	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	17
3.1	Materiais.....	18
3.1.1	Resíduo.....	18
3.1.2	Cimento.....	19
3.1.3	Areia .....	20
3.1.4	Água .....	21
3.2	Programa experimental.....	21
3.2.1	Coleta e preparação de amostras .....	21
3.2.2	Cominuição do RMF.....	23
3.2.3	Caracterização física e química .....	24
3.2.4	Estudo das pastas com adição de RMF.....	26
3.2.5	Estudo das argamassas estruturais com adição de RMF .....	27
3.2.6	Estudo das argamassas no estado fresco .....	28
3.2.7	Estudo das argamassas no estado endurecido.....	29
3.2.7.1	Determinação da densidade, absorção de água e índice de vazios .....	29
3.2.7.2	Determinação das propriedades mecânicas.....	31
3.2.7.3	Estudo da durabilidade através de choque térmico .....	31
3.2.7.4	Resumo dos ensaios executados executadas nas argamassas .....	32

CAPÍTULO IV .....	33
4 RESULTADOS .....	34
4.1 Análise química e mineralógica do resíduo de mineração e do cimento .....	34
4.2 Caracterização física e ajustes do resíduo as condições de utilização.....	37
4.3 Análise da densidade, superfície específica e porosidade.....	39
4.3 Propriedades das pastas confeccionadas com RMF .....	40
4.4 Propriedades das argamassas no estado fresco .....	46
4.4.1 Consistência – <i>flow table</i> .....	46
4.4.2 Absorção e retenção de água das argamassas .....	47
4.5 Propriedades das argamassas no estado endurecido .....	48
4.5.1 Resistência à tração na flexão e compressão .....	49
4.5.2 Densidade aparente .....	51
4.5.3 Absorção de água, índice de vazios. ....	52
4.5.4 Choque térmico.....	54
CAPÍTULO V .....	57
5 CONCLUSÕES.....	57
<a href="#">5.1</a> Sugestões para trabalhos futuros .....	59
CAPÍTULO VI	
6.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 60	
ANEXO I.....	72

## CAPÍTULO I

### 1 INTRODUÇÃO

#### 1.1 Considerações iniciais e justificativa

Segundo o IBRAM (2017), a produção mineral brasileira chegou a 24 bilhões de dólares (DB) anuais no ano de 2016, sendo este número 7,6% menor do que o apurado em 2015. Porém observou-se que os volumes de produção das empresas de mineração no Brasil mantiveram-se estáveis em sua grande maioria. No entanto, a variação do preço internacional das principais *commodities* ao longo de 2016 sinalizou queda no valor anual. Para o relatório de 2018, o IBRAM acredita em uma ligeira recuperação deste número, estimado em US\$ 25 bilhões. O Brasil manteve sua produção mineral, a queda da PMB (Produção Mineral Brasileira) em termos financeiros, foi fortemente afetada pela queda dos preços das *Commodities* minerais e em especial pelo preço do minério de ferro no último ano. Este produto responde por cerca de 75% da PMB. A indústria mineral empregou em 2016 cerca de 185 mil trabalhadores diretamente, segundo dados do Ministério do Trabalho (2017) e no que tange aos valores de produção apurados, 16 bilhões (66%) estariam sendo produzidos no estado de Minas Gerais.

O valor médio do minério de ferro em 2017, ficou em torno de US\$ 70/tonelada, o que veio se confirmando pelo comportamento de mercado que era esperado nos relatórios apresentados em 2016. Segundo Metal Bulletin/média de janeiro/18 a tonelada do produto foi comercializada a US\$ 72,97/tonelada. De acordo com a Secretária do Comércio Exterior - SECEX, do Ministério do Desenvolvimento, da Indústria e do Comércio Exterior, desde 2014, mantendo-se até 2017, o minério de ferro permanece liderando a pauta de exportações na conta de Produtos Básicos. O Minério de Ferro representa 11,47% dos produtos básicos, seguido da soja com 10,34%. E mesmo com uma variação de preço, o minério de ferro permaneceu liderando este segmento. Ainda segundo o IBRAM (2017), existe uma prospecção de

investimentos para este setor, que mesmo com sua queda financeira tem uma parcela muito importante e fundamental na economia brasileira, o órgão acredita que o fortalecimento da indústria da mineração está diretamente relacionado à retomada do desenvolvimento econômico e social, com geração de emprego e renda.

A produção brasileira em toneladas de produção mineral, chegou a 350.000 toneladas no ano de 2016 (DNPM (2017)). Cada reserva e mineradora possui seus índices de relação de produção de resíduo por tonelada. Segundo VALE (2017), identifica-se um índice médio de 2.597,3 m<sup>3</sup>/h de resíduo produzido em seu sistema de beneficiamento. Este resíduo consiste em uma lama, que em estudos preliminares se apresenta com altos teores de sílica e proporções de ferro, sendo que cerca de metade de seu volume em peso é de materiais sólidos, não sendo considerado tóxico pela ABNT NBR 10004:2004. Este resíduo é destinado a áreas específicas como lagoas ou barragens, que ao longo do tempo passam por processo de assoreamento sendo necessários investimentos em sistema de dragagem eficiente e muitas vezes projetos de alteamento das mesmas, estes são empreendimentos de alto custo de implantação. Destacando-se ainda risco de rompimento e danos ambientais expressivos, caso a manutenção e controle dos locais não seja executada de maneira adequada. No seu estado seco, este resíduo se apresenta como um pó extremamente fino (VALE, 2017).

O reaproveitamento dos resíduos da mineração é um fator importante, tanto no âmbito ambiental, quanto social e no que se diz respeito ao emprego de materiais sustentáveis na construção civil. As empresas buscam alternativas que gerem oportunidades de valor agregado, considerando o ponto de vista ambiental, econômico e social (LANGSTON, 2008). Outro fator de interesse na realização do uso sustentável dos resíduos são as vantagens de imagem alcançadas, fazendo uso adequado do marketing de sustentabilidade, além do que, o uso de recursos reaproveitados pode contribuir diretamente na redução de custos dos empreendimentos e valorização do capital das empresas.

Segundo Zhao, *et al* (2014) resíduos de minério de ferro são um tipo comum de resíduos sólidos e tem causado sérios problemas ambientais nos países produtores, como o Brasil. Destacam ainda o alto custo de produção de argamassas e concretos convencionais e o uso deste resíduo fornece a motivação para procurar matérias-

primas a baixo preço e com características semelhantes a nível mecânico e de durabilidade.

O estado da arte já aponta diversos estudos envolvendo o aproveitamento de resíduos de mineração como constituintes de materiais empregados na construção, como por exemplo:

- Peixoto, Andrade e Marques (2016) que avaliaram a potencialidade de aplicação do resíduo de minério de ferro quando aplicado na construção civil, possuindo o mesmo características químicas e granulométricas encontradas que sugerem a possibilidade de usos tais como incorporação ao cimento Portland, produção de argamassas, concreto e materiais cerâmicos e utilização em obras de infraestrutura de pavimentos para rodovias.
- Shrivastava, Joshi e Nagayach (2016) que utilizaram este resíduo na forma de lama e agregado fino e verificaram a manutenção da resistência do concreto auto adensável em torno de 40 MPa;
- Abdulrahman (2015) estudou que resíduos para substituir areia natural (10%, 20%, 30% e 40%) na confecção de blocos de concreto e observaram-se os aumentos de resistência à compressão;
- Ugama e Ejeh (2014) que estudaram a substituição (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) dos agregados naturais pelo resíduo na confecção de argamassas estrutural ( $\approx 40$ MPa) e constataram a manutenção e melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas;
- Ullas, Reddy e Rao (2010) pesquisaram na forma de substituição (0%, 32,5%, 50% e 100%) de agregado natural pelo resíduo na produção de blocos ( $\approx 7,0$  MPa) de alvenaria e constataram a viabilidade técnica.

Este trabalho se justifica pelo elevado volume de resíduos de minério de ferro, que são gerados anualmente no Brasil, pelas características deste material e de sua potencialidade de reaproveitamento anteriormente demonstrada. Acredita-se que ao se encontrar forma de utilização adequada, promoverá a redução dos danos de um passivo ambiental (grandes áreas de deposição, destinação mais adequada, riscos de acidentes) e o reaproveitamento de resíduos desenvolvendo um novo produto para construção civil com propriedades semelhantes ou melhores do que os produtos disponíveis no mercado.

## 1.2 Estrutura do trabalho

Esta dissertação será estruturada em 6 Capítulos conforme descrito a seguir:

- 1º Capítulo – Introdução: contextualização e justificativa do tema, na sequência os objetivos gerais e específicos e, por último a estrutura deste trabalho;
- 2º Capítulo – Revisão da bibliografia: explanação do estado da arte referente ao tema estudado neste trabalho ;
- 3º Capítulo - Materiais e programa experimental: apresenta-se de forma detalhada a caracterização dos materiais, seguido pela descrição do programa experimental que atendam aos objetivos do trabalho (traços, moldagens, ensaios);
- 4º Capítulo - Resultados e análises: apresenta-se os resultados, assim como todas as análises e tratamentos de dados estatísticos pertinentes ao estudo;
- 5º Capítulo – Conclusões: apresenta-se as conclusões a partir dos objetivos e resultados alcançados, sendo indicado sugestões para pesquisas futuras;
- 6º Capítulo – Referências bibliográficas: apresenta o referencial teórico utilizado e citado no corpo do texto.

## 1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste na realização de estudo de argamassas estruturais com adição de resíduo de minério de ferro, originado no processamento final de beneficiamento, em forma de lama, proveniente do estado de Minas Gerais, Brasil. Para alcançar o objetivo geral, propõem-se os objetos específicos:

- Avaliar as características químicas e físicas do resíduo de minério de ferro coletado em Sarzedo, no estado de Minas Gerais, Brasil;
- Avaliar o desempenho das argamassas estruturais com adição de resíduo de minério de ferro tanto no estado fresco como endurecido;
- Estudo da dosagem experimental e identificar o teor ótimo de adição do resíduo de minério de ferro na produção de argamassas estruturais;

Espera-se conduzir um estudo com finalidades de desenvolvimento de um produto novo, sustentável, bem como propor a redução dos passivos ambientais deste resíduo através desta utilização em argamassas estruturais.

## CAPÍTULO II

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Histórico da mineração de ferro no Brasil

No Brasil, após a segunda guerra mundial, inicia-se a segunda fase de exploração mineral, realizando-se algumas descobertas como: possíveis extrações de manganês da Serra do Navio nos anos 40; nos anos 50, o petróleo, jazidas ferríferas do vale do Paraopeba, as minas do Quadrilátero Ferrífero -MG; o carvão no Rio Grande do Sul e no Paraná; nos anos 60 as minas de cobre do Rio Grande do Sul Pará e Goiás e posteriormente as minas de chumbo na Bahia e em Minas Gerais e; mais recentemente o nióbio em Araxá -MG. Diante disto, percebe-se ainda o setor mineral brasileiro construído em uma perspectiva de estratégia de desenvolvimento nacional, ainda com deficiência nas preocupações ambientais para este setor (BARRETO,2001).

Segundo Germany (2002), os primeiros processos de extração mineral no Brasil eram muito rudimentares, como exemplo, a partir de meados da década de 40, foi iniciada, a lavra de hematitas roladas nas encostas do Cauê, da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), em Itabira-mg, assistidas por técnicos americanos impostos pelo Banco Mundial, desde a constituição da empresa. A partir da década de 60 as lavras de extração mineral ganham processos mais elaborados e com isso cresce a importância da extração mineral na economia brasileira (BARRETO,2001).

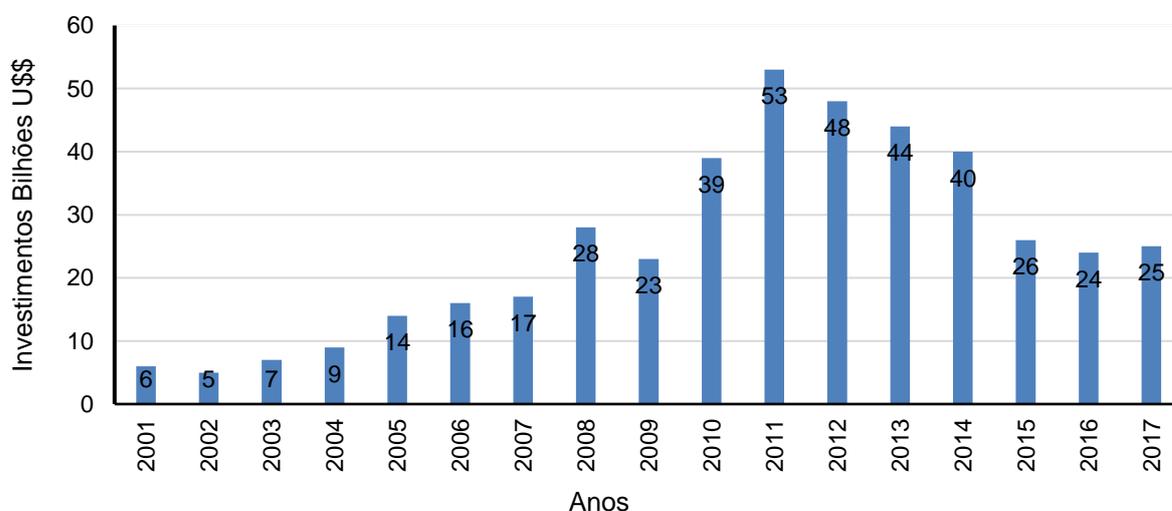
Segundo Heider (2016), em 1940 foram feitos os primeiros embarques de minério de ferro brasileiro para o exterior, sendo o material proveniente de Itabira-MG e embarcado no porto de Vitória (ES). Um marco importante para a exportação deste produto foi a inauguração do Porto de Tubarão (ES), em 1966.

A mineração é um dos setores da economia brasileira que mais influência na melhoria da qualidade de vida da população em termos econômicos, sendo de suma importância para o desenvolvimento da sociedade, desde que seja conduzida

baseada em pilares de conscientização social e desenvolvimento sustentável (FARIAS, 2002). O setor mineral, em 2017, representou 4,0% do PIB brasileiro, ou seja US\$ 85,0 bilhões de dólares, gerou 400.000 empregos . Estima-se um crescimento de 1% como projeção do próximo balanço anual (BRASIL,2018)

A Figura 01 apresenta o investimento, no Brasil. Percebe-se que a importância do setor da mineração, fazendo com que este setor participe de forma ativa na economia brasileira já a muitas décadas. Porém, apesar de todos os investimentos e importância da mineração de ferro na economia brasileira, milhares de toneladas de resíduo são geradas anualmente, provenientes do processo de beneficiamento, seja ele o processo úmido ou seco (DNPN, 2011).

Figura 1 - Investimento do setor de mineração



Fonte: Adaptado IBRAM,2017.

Os resíduos são depositados em grandes pilhas ou barragens de lama, sem um aproveitamento comercial adequado, pois a tecnologia para se transformar esse resíduo em ferro metálico é mais onerosa em relação aos demais produtos. Contrário ao estipulado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS,2010) que diz que os resíduos devem ser dispostos em meio ambiente somente em último caso. Além disto, ambos os processos causam consequências ambientais preocupantes e necessitam de manutenção permanente afim de se assegurar a segurança neste armazenamento.

Atualmente são cerca de 737 barragens de rejeito somente no estado de Minas gerais (FEAM,2017) e o surgimento de problemas ambientais graves, como o acidente

na barragem de Fundão em 2016, leva o homem à procura do melhor entendimento dos fenômenos naturais e a integração dos processos a um sistema natural conjunto (MOTA,2006). A Figura 2 ilustra uma área de mineração de ferro disposta em Minas Gerais.

Figura 2 - Área de mineração de ferro em Minas Gerais.



Fonte: (CREA, 2013)

## 2.2 Os processos do beneficiamento do minério de ferro

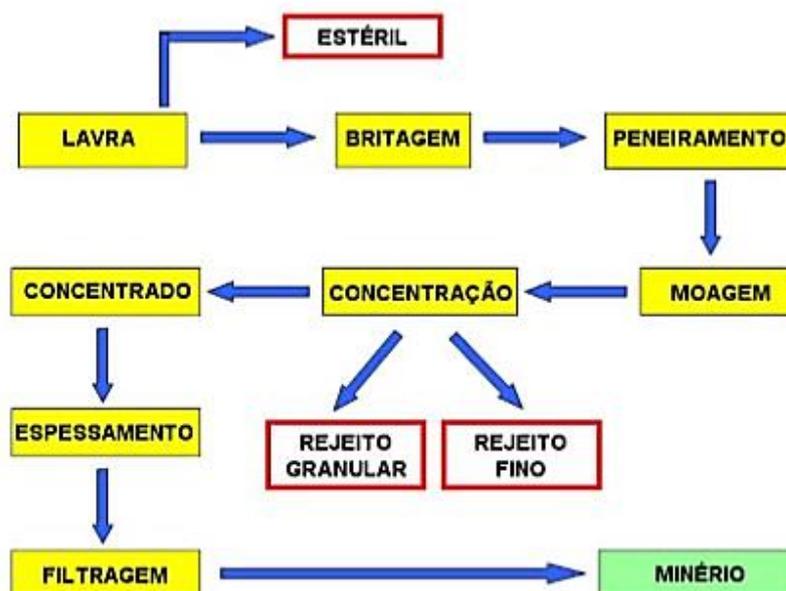
O processo de mineração é definido como o conjunto de atividades que, através do beneficiamento ou tratamento dos minérios objetiva modificar e melhorar as propriedades físicas dos minerais, preservando suas características químicas (SILVA, 2010). Segundo IBRAM (2017) os minérios de ferro, explorados no Brasil em maiores teores, são a hematita ( $Fe_2O_3$ ) e o itabirito, definido por formações ferríferas compostas de hematita e quartzo (sílica). A hematita é extraída principalmente no estado do Pará, e apresenta teor médio de ferro em torno de 60%. Já o itabirito é predominante na região do Quadrilátero Ferrífero -MG, com teor de ferro em torno de 50%, geralmente apresentando teores menores quando comparado a exploração no norte do país. Na atualidade, graças a evolução dos processos de beneficiamento mineral, já se é possível realizar a extração e beneficiamento dos chamados “*itabiritos pobres*”, que apresenta teores de ferro em torno de 25% (VALE,2017).

O processo de beneficiamento objetiva de tratar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios por métodos físicos ou químicos sem que sejam alteradas as constituintes químicas dos minerais. Otimizando os processos para se obter o máximo aproveitamento do produto, de forma mais econômica possível atendendo as necessidades de mercado, observando e preservando aspectos referentes a segurança, saúde ocupacional e proteção ao meio ambiente (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA BRASILEIRO, 2018).

As tratativas de granulometria provêm da cominuição do mineral em estado brutos por equipamentos adequados para este fim, como por exemplo britadores e moinhos. As operações de concentração visam a separação seletiva de minerais baseando-se nas diferenças de propriedades entre o mineral-minério (o mineral de interesse) e os minerais adjacentes. Podendo haver a necessidade da separação seletiva entre dois ou mais minerais de interesse, sendo na maioria das vezes realizadas a úmido (LUZ; LINS, 2010).

A Figura 03 trata de forma esquemática a sequência simplificada do fluxograma de processamento mineral, aplicada ao minério de ferro. Segundo Souza *et al*, (2008) é de suma importância o conhecimento do processo de beneficiamento ao qual o mineral foi submetido para entendimento das propriedades do resíduo remanescente deste processo.

Figura 3 - Esquema típico de processamento do minério de ferro



Fonte: (Albuquerque Filho,2008)

O beneficiamento de minério de ferro, principalmente nas áreas do Brasil e Austrália, onde há prática de grandes depósitos e altos teores predominantemente, permite que uma grande parcela de produtos seja gerada apenas pelos processos de britagem e classificação, sem que ocorra os processos de concentração (GOMES, 2009). Os minerais de ferro, quando processados, no objetivo de aumento o teor de ferro contido no produto, geram resíduos que contêm diferentes minerais em sua composição (WOLFF, 2009). Estes resíduos sólidos gerados na mineração, também chamados rejeitos, por todo seu processo produtivo, desde a extração, separação do estéril, coleta, transporte e disposição final, tanto em pilhas quanto em barragens de terra, além de haver necessidade de sistema de tratamento das águas residuais e controle de emissões atmosféricas (OLIVEIRA, 2008).

Segundo D'agostino (2008), os rejeitos de minério de ferro são de grande heterogeneidade quanto a suas características, essa variabilidade se dá pelo processo de beneficiamento aplicado, pelo tipo de mineral que compõem a lavra e também por sua posição de disposição na barragem de rejeito. Observa-se em trabalhos anteriores, como no de Portes (2013), que o local de depósito do resíduo de minério de ferro pode afetar a variabilidade das características granulométricas, mineralógicas e estruturais do resíduo, em função das variáveis que controlam os processos de descarga da lama.

Os resíduos provenientes do processo de beneficiamento mineral do ferro, normalmente são submetidos a análises ambientais para verificação de seu potencial contaminante de acordo com as normas ABNT NBR 10.004: 2004, ABNT NBR10.005: 2004 e ABNT NBR 10.006: 2004; classificação, lixiviação e solubilização, respectivamente, envolvendo a identificação do processo ou atividade de origem, seus constituintes e características, e a comparação dos mesmos com referências de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A segregação dos resíduos na fonte geradora e a identificação da sua origem, fazem parte da classificação onde é feita descrição de matérias-primas, de insumos e do processo no qual o resíduo foi gerado. Após resultados destes ensaios, as amostras de RMF são então classificadas.

A caracterização dos resíduos vem ganhando mais espaço à medida que surgem novos processos de beneficiamento de minérios, pois até então estes vinham sendo descartados sem maiores conhecimentos de suas características físicas, químicas e

mineralógicas e de sua resposta a processo de refino. Esta mudança percebida relaciona-se com questões ambientais, como também, em alguns casos, devido à escassez do minério e de novas reservas, com a conseqüente diminuição dos teores de produto das minas (BORGES, 2008). A Tabela 1 abaixo, apresenta as classificações do RMF quanto a toxicidade.

Tabela 1 - Identificação e Classificação de Resíduos

Classificação	Categorias		
Nível de toxicidade	Classe I - Perigos		Não inertes, inertes, radioativos, perigosos
	Classe II - Não Perigosos	II A – Não Inertes	
		II B - Inertes	

Fonte: ABNT NBR 10.004 : 2004

Segundo ICTR (2007), os resíduos provenientes da mineração de ferro, classificam-se em sua grande maioria como “ não perigosos“, , classe II A - não perigoso e não inerte. Ou seja, existem grandes indicativos que material não possui características perigosas como corrosividade, flamabilidade, toxicidade reatividade ou patogenicidade (ABNT NBR 10004: 2004). Ainda segundo Vale (2016), o material presente em suas barragens, localizadas também no quadrilátero ferrífero, é inerte, ou seja, não contém componentes tóxicos reagentes em sua composição, não apresentando nenhum elemento químico danoso à saúde. Sant’Ana Filho (2013) enfatiza nos estudos de fabricação de pavimento intertravado, que a classificação de seu RMF seria Classe II B (não perigoso e inerte), resultado também condizente com Zuccheratte *et al.* (2017), que realizou estudos empregando cascalho sintético para concreto obtido a partir de rejeito de minério de ferro arenoso e polietilenoftalato reciclado.

O que tem-se observado atualmente, é que os rejeitos descartados e armazenados em barragens podem apresentar concentração de ferro superior a alguns minérios de baixo teor, lavrados por empresas minerárias no Brasil. Trabalhos como o de Wolff (2009), quando realizados estudos visando a determinação do teor total de ferro de resíduos de barragens de minas da mineradora VALE, por meio Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), observou-se concentrações que variam de 44,3 a 64,0%, nos resíduos provenientes do processo de beneficiamento mineral de nove minas diferentes.

Em Pires *et al.* (2003), observa-se que o resíduo de minério de ferro utilizado é de classe III, inerte, sendo a classificação do resíduo de minério de ferro tendo sido feita de acordo com as ABNT NBR 10004: 1987, ABNT NBR 10005: 1987 e ABNT NBR 10006:1987, neste resíduo observa-se teores de ferro estão em torno de 57,2% e SiO<sub>2</sub> em 14%, os percentuais de água de constituição em torno de 8% e os de Al de 1,3%. Diferentemente dos estudos de Fontes *et al.* (2016) onde o resíduo de minério de ferro possuía Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 45,92% e SiO<sub>2</sub> de 24%, classificado ambientalmente como Classe II-A - não perigoso e não inerte, e, portanto, sem características perigosas, como corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade ou inflamabilidade. Tais estudos confirmam a hipótese da grande variabilidade nas características químicas e físicas dos resíduos, atribuída a diferenças nos processos de beneficiamento de minério, o tipo de minério bruto, a variabilidade frentes de mineração, e até mesmo quanto a posição de lançamento na barragem de disposição, necessitando estudos de caracterização, para definição de melhor utilização no reaproveitamento e aplicação.

Duarte (2008) e Silva (2017) definem as barragens de rejeitos como locais que apresentam significativo potencial de impactos ambientais associados, como desmatamento na fase de implementação, possibilidade de poluição e contaminação da água superficial e subterrânea durante a operação, impacto visual em todas as fases da vida útil da barragem de lamas e geração de poeira dispersa no ar aumentando sensivelmente a poluição do mesmo, todos estes aspectos corroborando com os estudos de Castro *et al.* (2011).

### **2.3 Utilização dos resíduos de minério de ferro na construção civil**

Segundo Zhao *et al.*, (2014) os resíduos de minério de ferro são um tipo comum de resíduos sólidos e tem causado sérios problemas ambientais nos países produtores. Wolff (2014) aponta que existem, entre autores e técnicos, diferentes formas de classificação dos rejeitos, mas que na indústria da mineração é comum se adotar a seguinte forma: quanto à dimensão das partículas: rejeitos grossos ou granulares (> 0,05 mm); rejeitos finos (< 0,05 mm) e lamas ou rejeitos ultrafinos (<

0,01 mm).A densidade das partículas encontradas no resíduo de minério de ferro tende a ser elevada, devido à presença de ferros residuais neste material. Geralmente, apesar de possíveis variações de características, estes resíduos são constituídos por materiais granulares, estando entre a faixa granulométrica de areias finas até a de frações de argilas (COELHO, 2008). O uso de rejeitos de minério de ferro provenientes de barragens ajudará a reduzir o exploração de recursos naturais convencionais amplamente utilizados na construção civil, assim como contribuirá para a mitigação dos impactos ambientais da eliminação de resíduos,colaborando com a sustentabilidade da cadeia da construção (ARUNA, 2010).

Apesar do grande impacto ambiental causado pelas barragens de disposição de rejeitos, segundo Van Geen *et al.* (1994), o RMF possui grande capacidade de adsorção de metais pesados o que indica que as barragens de disposição de funcionam na retenção de metais pesados, como por exemplo cromo e diminui a dispersão de poluentes no meio ambiente.

Muitos esforços têm sido feitos para contenção, segregação e monitoramento destes resíduos provenientes da mineração, visando prevenir acidentes ecológicos e prejuízos ao meio-ambiente (SANT'ANA FILHO, 2013). Ainda não há, entretanto, uma ação conjunta dos órgãos públicos e/ou privados, com o objetivo de transformar estes resíduos de grandes volumes de geração, inúteis até agora, em produtos de valor agregado. Existem diversas iniciativas de estudos aplicando o RMF em alguns materiais da construção civil, como na confecção de concretos, fabricação de blocos estruturais, pavimentação e em argamassas. Entretanto, em boa parte dos casos é necessário aprofundar os estudos técnicos, as dosagens e a aplicabilidade. Pode-se destacar alguns trabalhos que estudaram a reutilização de resíduos de minério de ferro na construção civil:

- Abdulrahman (2015) estudou que resíduos de minério de ferro podem substituir areia natural parcialmente (10%, 20%, 30% e 40%) na confecção de blocos de concreto e observaram-se que o resíduo pode ser utilizado em substituição a areia natural, na produção de blocos de concreto, propiciando propriedades físicas de melhor performance, já que a medida que a quantidade de resíduo aumenta a resistência a compressão aos 28 dias de idade também aumenta.
- Ugama e Ejeh (2014) estudaram a substituição (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) dos agregados naturais por resíduo de minério de ferro na confecção de

argamassas estrutural ( $\approx 40\text{MPa}$ ) e perceberam que numa substituição total houve uma perda de somente 30% das propriedades mecânicas, chegando a condições de aumentar a tração na substituição de 20% do agregado.

- Fontes *et al.* (2016) estudaram a análise de valor e potencialidade, baseada na emoção do usuário do produto final, na utilização de ladrilhos hidráulicos confeccionados com resíduo de minério de ferro como agregado reciclado, percebendo que trata de um produto inovador com potencial de consumo pelos usuários finais.>>>>>
- Zhao *et al.*, (2014) estudaram a possibilidade de utilização de resíduo de minério de ferro na produção de concreto de alto desempenho, como substituição do agregado convencional, verificando que as substituições de 100% dos agregados convencionais pelos resíduos de minério de ferro, diminuía a resistência a compressão do material produzido, porém em substituições até 40% os resultados se equiparavam aos traços de referência.
- Ullas, Reddy e Venkatarama (2010) pesquisaram a substituição (0%, 32,5%, 50% e 100%) de agregado natural pelo Resíduo de minério de ferro na produção de blocos ( $\approx 7,0\text{ MPa}$ ) de alvenaria e constataram pouca variabilidade com a substituição nas propriedades: absorção de água, expansão linear, coeficiente de capilaridade e compressão.
- Barros (2002) afirmou que os resultados da caracterização física, química e ambiental dos resíduos como material de substituição do agregado natural, indicam que possuem propriedades de interesse para produção de elementos de concreto para pavimentação de superfícies de rolamento e preparo de pavimentos. Assim, pode-se concluir que resíduos de barragem de mineração, segundo seus óxidos constituintes, apresentam-se como material de qualidade para produção de blocos intertravados para pavimentos.
- Das e Kumar (2000) estudaram o uso do resíduo de minério de ferro no desenvolvimento de telhas cerâmicas, verificando que teores de presença do resíduo em no máximo 40% foram superiores em dureza e resistência aos riscos, quando em comparação com telhas convencionais no padrão europeu.

O uso de resíduos de minério de ferro na produção de materiais voltados para construção civil, proporciona uma indústria de mineração mais sustentável e produtos

para construção civil mais eco eficientes, reduzindo a demanda por matérias-primas não-sustentáveis (SANTOS, *et al.*, 2017).

## 2.4 Argamassas estruturais

As argamassas são compósitos cimentícios, que podem se apresentar em diferentes empregos com funcionalidades distintas, como argamassas armadas (SANTOS, 2008, SANTOS, 2011 e BARBOSA e SANTOS, 2013), em peças pré-fabricadas (TRIGO, 2012), revestimento assentamento de alvenaria estrutural (PASQUALI, 2007 e MOHAMAD, 2007), reforço em estruturas de concreto armado (REIS, 1998 e MOTA e OLIVEIRA, 2013) e confecção de bloco estruturais (ABDULRAHMAN, 2015). Podem ser denominadas como micro concreto (FAZZAN, 2017 e POGGIALI, 2010), micro concreto de alto desempenho (BACARJI *et al.*, 2011) Nesse tipo de argamassa são empregados além dos materiais convencionais, produtos que a proporciona características especiais. Dentre eles, destacam-se as adições minerais. Segundo Mehta e Monteiro (2008), as adições minerais são materiais finamente divididos, que podem manifestar propriedades pozolânicas, cimentícias ou de preenchimento de poros (filer), normalmente adicionados ao concreto em quantidades relativamente grandes, que variam de 20 a 70% em relação a massa de cimento total.

O uso das adições minerais na formulação desse tipo de argamassa objetiva diminuir o consumo de cimento e melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade (KADRI e DUVAL, 2002; LANGAN, WENG e WARD, 2002; HWANG e SOO KO, 2008; e MEGN *et al.*, 2012). O bom desempenho dos materiais cimentícios depende, principalmente, da melhor distribuição dos grãos (PENG; HU; DING, 2009; CARDOSO, 2014), da forma dos agregados (MENG *et al.*, 2012) e do método de processamento do empacotamento (CARDOSO, 2014) e permite minimizar a porosidade da mistura, além de garantir o consumo mínimo possível de pasta de aglomerante para uma maior compacidade. As adições minerais são mais comumente estudadas em concretos. Segundo Poggiali (2010), os principais objetivos da utilização de adições e aditivos em concretos estão a melhora de propriedades como

trabalhabilidade, plasticidade, consumo de água, tempo de pega, a redução da exsudação e segregação, o aumento de resistência final, fechamento de poros, dentre outras finalidades, logo no aumento da durabilidade do material (NEVILE, 2015).

Pesquisas como: Drysdale e Hamid (1979), McNary (1984), Cheema e Klingner (1986), Khalaf *et al.* (1994) e Vermeltfoort (2004) apontam que na alvenaria estrutural deve haver uma compatibilidade de características mecânicas entre o tipo de bloco e a capacidade resistente de argamassa de assentamento (70% resistência do bloco) o que aumenta a exigências das argamassas de assentamento para edificações mais altas. O que fundamenta o uso de argamassas estruturais com uso de aditivos químicos associados às adições minerais.

Resultados dos trabalhos de (PENG; HU; DING, 2009) indicam que a incorporação de resíduos minerais pode efetivamente tornar os materiais cimentícios mais densos, e a definição de uma quantidade ótima de mistura mineral confere à pasta confeccionada, além do aumento da densidade a pasta, menor relação água/aglutinante, com empacotamento de partículas mais eficiente, o que evidentemente aumenta a resistência à compressão no caso de argamassas endurecidas, corroborando com (ANKUSK; RAJEEV; KOSHITA,2014) que ao realizarem estudos também com argamassas concluíram que a resistência à compressão nas argamassas, é diretamente influenciada pela composição de partículas finas, em forma de pó, que o resíduo adicionado possui, do qualquer processo de cura testado, pois ocorre fechamento de poros da microestrutura, tornando o material mais denso e resistente.

### **2.5.1 A importância da durabilidade das argamassas estruturais**

Segundo o comitê do ACI (American Concrete Institute) (2005) a durabilidade das estruturas que utilizam concreto de cimento Portland é definida como a sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, ou seja, o concreto durável conservará a sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto a determinado meio ambiente. Nas últimas duas décadas, aspectos de projeto visando a durabilidade e o aumento da vida útil de estruturas de concreto vêm se tornando foco na indústria da

construção civil principalmente em função dos crescentes problemas de degradação precoce observados nas estruturas (MEDEIROS et al., 2011).

As construções duráveis e a vida útil dos materiais possuem relação direta com a sustentabilidade. Materiais que possuam vida útil prolongada e ao mesmo tempo garantam conforto aos usuários não necessitando de manutenções excessivas ao longo dos anos, contribuem para a redução de resíduos e de energia embutida em demolições e reformas ( FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2016). Trabalhos como os de Ueda e Takewaka (2007) ressaltam a importância econômica da consideração da durabilidade a partir de pesquisas que evidenciam os significativos gastos com manutenção e reparo de estruturas em países de primeiro mundo, como por exemplo o Japão.

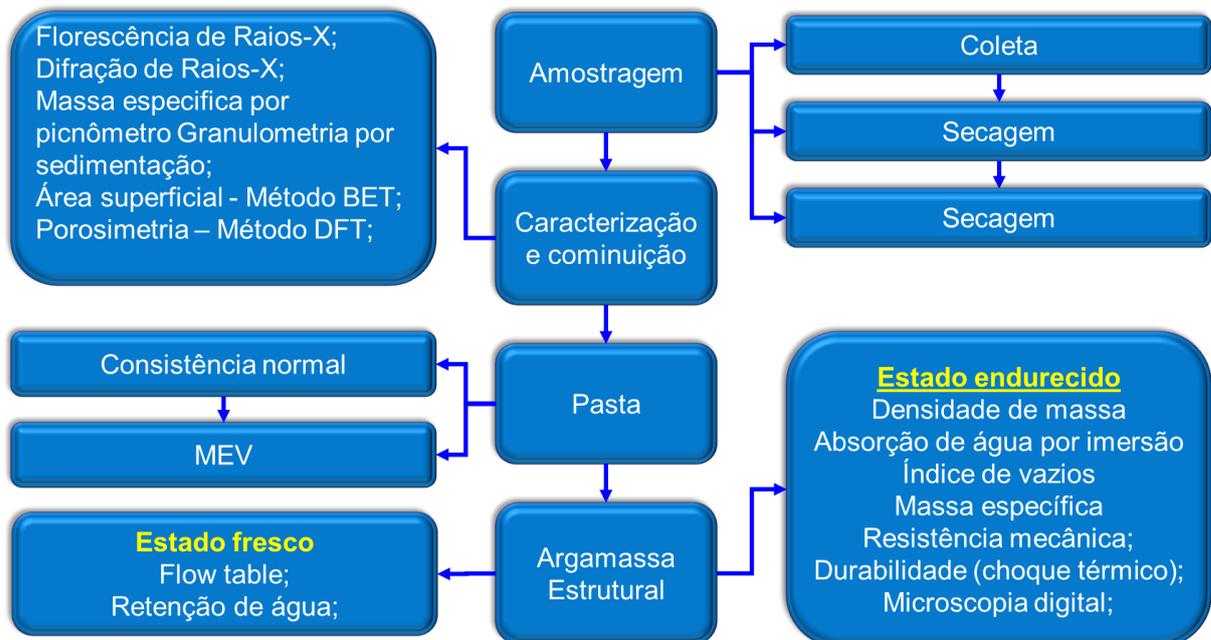
De acordo com Helene e Pacheco (2013), a segurança e estabilidade de uma estrutura de concreto armado está diretamente ligada à sua resistência à compressão. Porém aliado a este fator existem outras propriedades fundamentais para avaliar o desempenho pleno da vida útil e a durabilidade das estruturas, como por exemplo propriedades elásticas, permeabilidade, resistência à condução de íons e fluidos em seu interior, porosidade, dentre outros. Fatores como cobrimento, tipo de cimento e adições, fissuras, relação água/cimento, porosidade e permeabilidade influenciam na vida útil de uma estrutura, pois, podem acelerar o processo de corrosão no concreto (Greca, 2011).

## CAPÍTULO III

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Objetivando avaliar o desempenho de argamassas confeccionadas utilizando-se a adição de resíduos provenientes da mineração de ferro, elaborou-se um programa experimental (Figura 4) contemplando o estudo de caracterização física dos materiais empregados, assim como de algumas propriedades do produto, a argamassa estrutural, em seu estado fresco e endurecido. Fez-se também um estudo do comportamento da pasta composta de cimento e resíduo afim de se estudar seu comportamento quanto a microestrutura do material.

Figura 4- Programa experimental da pesquisa



Pode-se destacar as seguintes etapas deste estudo:

- Levantamento das características físicas, químicas e mineralógicas, juntamente com a classificação ambiental do resíduo de minério de ferro estudado neste

trabalho, com vista na viabilidade da sua utilização como adição na confecção de argamassas estruturais.

- Confecção de pastas com cimento e resíduo de mineração de ferro para estudo de microestrutura de compósitos cimentícios.
- Avaliação do comportamento destes resíduos quando adicionados a argamassas estruturais quanto a propriedades em estado fresco.
- Produção de corpos de prova prismáticos de diferentes traços com objetivo de estudo de propriedades mecânicas no estado endurecido de modo a definir o teor ótimo de adição mineral.
- Estudo preliminar quanto a durabilidade da argamassa estrutural confeccionada com adição de RMF, realizando ensaio de simulação de variação de temperatura, adaptado da norma de desempenho (ABNT NBR 15.575:2013).

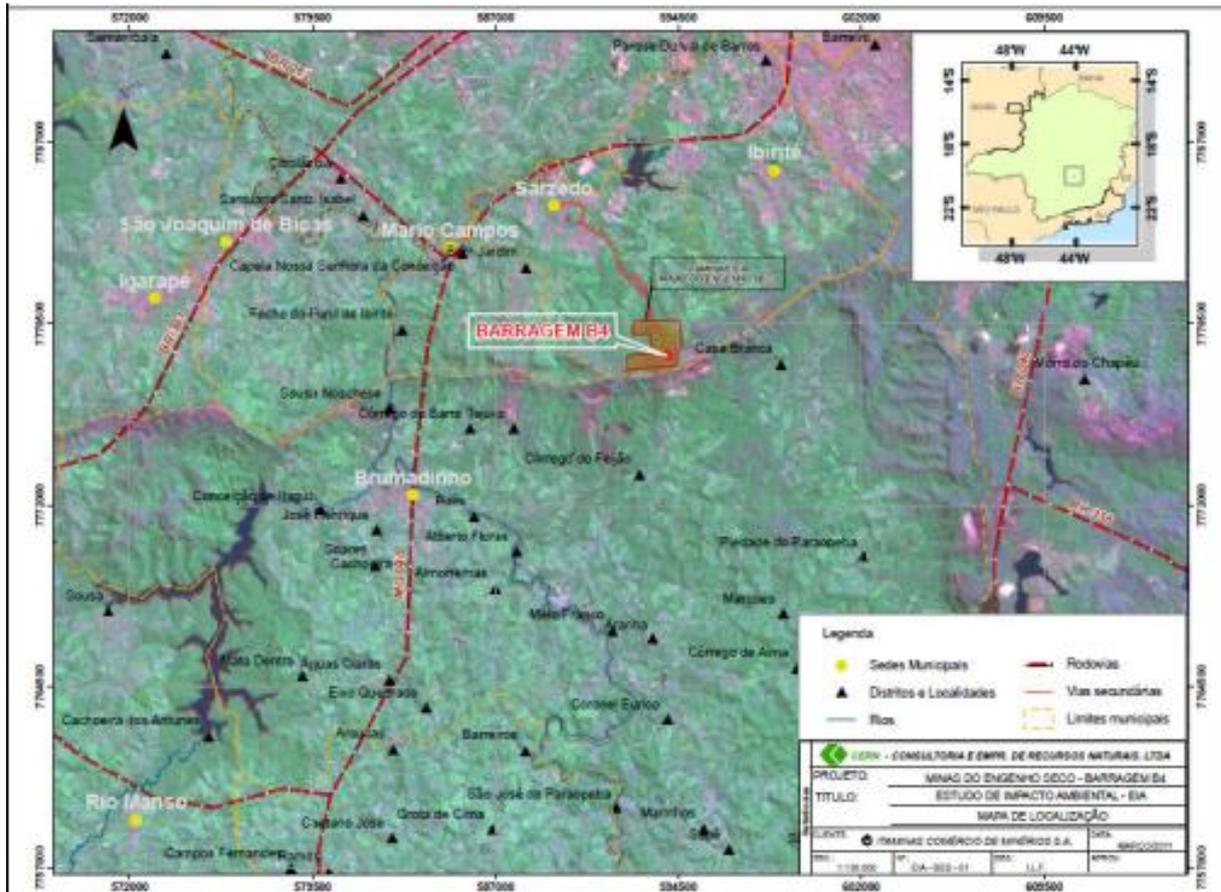
### **3.1 Materiais**

Nesta seção serão apresentados todos os materiais que foram utilizados nesta pesquisa com as principais características que podem influenciar os compósitos cimentícios.

#### **3.1.1 Resíduo**

O resíduo utilizado foi proveniente da Mina do Engenho Seco, localizada no município de Sarzedo- MG, atualmente explorada pela mineradora Itaminas Comércio de Minérios S/A, que gentilmente nos disponibilizou-o para estudo científico de seu emprego na fabricação de argamassas estruturais. A área de localização compreende ao prolongamento da Serra do Curral, local denominado Serra da Jangada, no município de Sarzedo/MG, região metropolitana de Belo Horizonte. A Figura 05 indica a localização da barragem de lamas, onde o RMF é depositado.

Figura 5- Localização geográfica da barragem de lamas B04 Itaminas, Sarzedo-MG.



Fonte: CERN,2011.

O processo de beneficiamento do minério de ferro da Itaminas Comércio S/A consiste em britagem, lavagem e peneiramento. O minério de ferro é britado por britador cônico e peneirado em peneiras vibratórias, em processo seco, sendo gerados os produtos: ferro granulado ( $6,35\text{mm} \leq \varnothing \leq 38,10\text{mm}$ ), hematitinha ( $6,35\text{mm} \leq \varnothing \leq 9,52\text{mm}$ ), sinter-feed ( $\varnothing \leq 6,35\text{mm}$ ). Os resíduos são dispostos diretamente em barragens de lama.

### 3.1.2 Cimento

Utilizou-se o cimento Portland CPV- ARI, fabricante InterCement Brasil, marca Cauê. O aglomerante utilizado possui especificação de propriedades físicas de acordo com a Tabela 2, obtidas pela ficha de informações de segurança do fornecedor.

Tabela 2- especificação de propriedades físicas CPV- ARI.

<b>Propriedades físicas</b>	<b>CPV- ARI</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,16
Área superficial – B.E.T. (m <sup>2</sup> /g)	1,7
Início de pega (min)(1)	143
Fim de pega (min)(1)	338
Teor de água de consistência normal (a/c)	0,3
Resistencia à compressão (MPa)	
1 dia	25,2
3 dias	36,2
7 dias	39,8
28 dias	47,4

Fonte: InterCement Brasil,2018.

A adoção do CP-V ARI deu-se por se tratar de aglomerante hidráulico mais puro e em sua composição conter conforme ABNT NBR 5733 :1991 com mínimo de 95% em massa de clínquer com sulfato de cálcio e máximo de 5% de material carbonático. Com isto, a utilização deste cimento apresentará baixo potencial de reatividade do mesmo com o resíduo utilizado, uma vez que o CPV- ARI, apresenta maior superfície específica e maior teor de C<sub>3</sub>S (silicato tricálcio) e conforme ABNT NBR 5733:1991 menor teor de adições minerais em sua composição. Apresentando uma maior resistência à compressão em baixas idades, quando comparado a outros cimentos disponíveis no mercado.

### 3.1.3 Areia

Utilizou-se como agregado miúdo, areia normal brasileira (IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas ), que segue granulometria conforme estabelecido nas normas da ABNT NBR 7214: 2015, afim de se obter um melhor empacotamento na mistura final. A Tabela 3 apresenta as frações sugeridas pela norma e que foram utilizadas neste trabalho. O uso desta areia se justifica por ser padronizada, isenta de resíduos e inerte aos demais componentes da composição final do produto a ser confeccionado.

Tabela 3 - Fragmento da norma ABNT NBR 7214: 2015 sobre frações de areia

<b>Denominação da Fração</b>	<b>Material retido entre as peneiras de abertura nominal</b>
16	2,4 mm e 1,2 mm
30	1,2 mm e 0,6 mm
50	0,6 mm e 0,3 mm
100	0,3mm e 0,15 mm

Fonte: ABNT NBR 7214:2015.

### **3.1.4 Água**

A água utilizada na confecção das argamassas estruturais foi proveniente da cidade de Itabira- MG, oriunda da distribuição da concessionária de abastecimento SAAE-Itabira (Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Itabira).A mesma água foi utilizada na confecção das pastas deste estudo.

## **3.2 Programa experimental**

Nesta seção será apresentado a metodologia proposta e aplicada para execução desta pesquisa.

### **3.2.1 Coleta e preparação de amostras**

O resíduo foi disponibilizado e coletado pela mineradora Itaminas Comércio de Minérios S/A, na data de 15/07/2017, exclusivamente pela própria empresa, devido a procedimentos de restrição de acesso na área operacional. Segundo a Itaminas, o resíduo foi coletado de acordo com a ABNT NBR 10007:2004, segundo os itens prescritos desta norma, sendo coletado diretamente da barragem de rejeitos, identificada e licenciada como B4, onde depositam-se os resíduos, provenientes do beneficiamento da Mineração de ferro desta empresa.

A barragem de rejeitos B4 ocupa uma área de 9,8 hectares, sendo uma barragem de linha de centro, já tendo sido alteada, possuindo um sistema de drenagem interna constituído por um septo drenante vertical sob a crista e um tapete drenante sob o flanco de jusante. O sistema extravasor, também utilizado para drenagem pluvial é constituído por 1 canal de concreto armado posicionados no contato entre o maciço e a ombreira direita com tomada 2,0 m abaixo da crista (SUPRAM, 2011). A barragem possui licença de operação vigente e possui as seguintes características conforme a Tabela 4 abaixo.

Tabela 4- Ficha técnica da barragem B4- Itaminas Comércio de Minérios S/A

Maciço	Finos de minério
Alteamento	Linha de centro
Altura	50 metros
Talude geral	01:02,7
Fator de segurança	1,8
Comprimento da crista	310 metros
Área de ocupação	9,8 hectares
Drenagem interna	Septo drenante vertical sob a crista e tapete drenante sob o flanco de jusante, com entroncamento de “pé”.
Drenagem superficial	Canaletas e descidas d’água com caixas de dissipação
Instrumentação	Piezômetros e marcos topográficos
Volume Maciço	625.000 m <sup>3</sup>
Volume da bacia	1.505.000 m <sup>3</sup>
Volume total	2.130.000 m <sup>3</sup>
Vida útil	2,5 anos
Uso do solo	Área minerada
Existência de vegetação	Não haverá supressão vegetal
Existência de nascentes	Não ocorrem nascentes na área da barragem B4
Intervenção em APP	Não haverá intervenção em APP

Fonte: Itaminas Comércio de Minérios S/A ,2018.

Foi coletada e disponibilizada uma amostra de 150 kg do material úmido, em forma de lama. O material foi deslocado diretamente para o Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Itajubá, campus avançado de Itabira (UNIFEI - Itabira), na mesma data, onde foi seco ao ar livre, homogeneizado sobre

lona com o auxílio de pás e outras ferramentas, todas cuidadosamente limpas, afim de se evitar contaminação. Observa-se no RMF trabalhado tonalidade mais escura e grande semelhança a areias quanto a granulometria.

Após secagem ao ar, o material homogeneizado foi quarteado e armazenado em um recipiente plástico, fechado por tampa, protegido de agentes externos, aguardando o início dos trabalhos. Na sequência foi retirada uma pequena amostra para ensaio de granulometria completa segunda a ABNT NBR 7181: 2016, pelos processos de peneiramento e sedimentação, onde identificou-se que o material em condição natural apresentava-se em condição desfavorável para utilização como adição na confecção das argamassas estruturais, conforme proposta deste trabalho. Portanto decidiu-se cominuir o material e refazer a granulometria visando aumentar o percentual de finos da amostra fornecida.

### **3.2.2 Cominuição do RMF**

O material recebido para o presente trabalho possuía características semelhantes aos das areias, percebendo-se grãos visivelmente maiores, predominantes em toda a amostra. Destaca-se que é necessário atender a granulometria adequada para a realização de determinados ensaios, como o de fluorescência de raio-X (BRISOLA, 2012). A partir daí decidiu-se iniciar o estudo de processos de cominuição, afim de propiciar aumento da quantidade de material fino, assim como aumento da área superficial.

Primeiramente utilizou-se uma adaptação com a máquina de abrasão *Los Angeles*, modelo A075N, marca VAS, com contador digital automático que pode ser predefinido para o número de rotações necessário do tambor. Moendo o material em 6 mil voltas do aparelho. Este tipo de moagem foi adaptado pois nesta ocasião não havia outra possibilidade de cominuição. Ao final da moagem foi repetido o ensaio de granulometria afim de se apurar a mudança de granulometria do material.

Na sequência foi aplicado ao material outro processo de moagem utilizando o Moinho de Bolas modelo I-4205 do tipo SONNEX, marca PAVITEST, fabricante Contenco. Equipamento com sistema de funcionamento com bolas para moagem até

325 Mesh. Sendo a obtenção da finura, função do produto e do tempo da moagem, com programador digital para controlar o número de giros e tempo de moagem, com desligamento automático. Com Tambor em chapa dupla de aço 1045, isolada por lençol de borracha a fim de diminuir o barulho quando em operação. Capacidade de moagem de 14 Kg por batelada. Foram testadas moagens com 8000, 10.000, 12.000, 14.000, 16.000 e 18000 rotações, sendo o moinho padronizado com a mesma carga de bolas de aço. O moinho de bolas tem como dimensões 380 mm x 420 mm, volume de 47 litros, carregado com 67 esferas metálicas de 30,53 mm de diâmetros em média. A cada procedimento foi colocado no equipamento uma quantidade de 4,5kg de RMF. O aparelho possui programação digital, sendo submetido a sequência de rotações.

Percebeu-se, por meio de teste de granulometria por peneiramento que a partir de 14.000 voltas não reconhecia-se moagem adicional significativa, portanto, foi adotado como condição de moagem, 14 mil voltas no moinho de bolas. Este processo foi adotado por se tratar do mesmo, em escala reduzida, aplicado no beneficiamento do produto que gera o resíduo deste trabalho. Para o processo de moagem no moinho de bolas foram utilizados cerca de 2,7kg do resíduo a cada ciclo de moagem, com 88 esferas de diâmetro médio de 30,5mm, padronizado. O aproveitamento do material retirado do moinho consolidou-se em média em 97% de aproveitamento do material, tornando o moinho de bolas eficiente neste processo de cominuição.

### **3.2.3 Caracterização física e química**

Os resíduos foram caracterizados quanto a granulometria segundo ABNT NBR 7217: 1987 e de densidade real (DNER-ME 093/94) na sua condição natural e após processos de cominuição. No resíduo a ser utilizado como adição (cominuído) nas argamassas estruturais, avaliou-se a composição química por fluorescência de Raios-X (FRX) e mineralógica por difração de raios-X (DRX). A fluorescência de raios-X foi feita pela empresa SGS Geosol, localizada na cidade de Vespasiano-MG, com limite de detecção de 0,01%. O método utilizado para referência analítica foi o CLA70C para determinação de óxido de ferro (II) – FeO (silicato) volumétrico; o PHY01E: LOI (*Loss on ignition*) – perda ao fogo por calcinação da amostra a 405°C e/ou 1000°; e

XRF79C: fusão com tetraborato de lítio e quantificação por FRX, existente na empresa SGS Geosol Laboratórios Ltda com certificado de análise GQ1703333.

Para a difração de raios-X o equipamento utilizado foi o Difratômetro de raio-x (DRX) para amostra em pó, PHILIPS (PANALYTICAL), sistema X'Pert-APD, controlador PW 3710/31, gerador PW 1830/40, goniômetro PW 3020/00, existente no Laboratório de Raios-X do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.

Ambos os métodos correspondem como principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos, estando presentes em diversos campos de aplicações, principalmente na engenharia e ciências de materiais, engenharias metalúrgica, química e de minas, dentre outros. Pela difração obtem-se o espectro com informações da caracterização da amostra. A identificação das fases é feita por comparação dos espaçamentos dos picos das amostras com banco de dados conhecido para materiais cristalinos (BLEICHER; SASAKI, 2000) . Esta caracterização torna-se importante para verificar a presença dos elementos/minerais, podendo prever possíveis contaminações ou reações indesejáveis com aglomerantes hidráulicos cimentícios.

Aplicou-se o método Brunauer, Emmett e Teller (BET) para realização de análises de área de superfície por isoterma, B.E.T, de volume de poros pelo método DFT (Teoria de Densidade Funcional) e distribuição de meso e microporos, este ensaio foi realizado nas dependências do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais CEFET-MG. O aparelho utilizado foi o modelo Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction, marca Nova instruments. O material utilizado nesta etapa de análise foi o passante na peneira de número 100 (abertura 0,15 mm). A Tabela 5 resume os ensaios que foram executados, para caracterização do RMF.

Tabela 5 - Ensaios Executados no Resíduo de Minério de ferro

<b>Listas de ensaios efetuados</b>	
Resíduo	Florescência de Raios-X
	Difração de Raios-X
	Massa específica pelo picnômetro - DNER-ME 094/93
	Granulometria por peneiramento e sedimentação - ABNT NBR 7181: 2016
	Avaliação de Área superficial – Método BET
	Porosimetria – Método DFT

### 3.2.4 Estudo das pastas com adição de RMF

Foram confeccionadas pastas compostas de cimento Portland, água e substituições aos compósitos cimentícios por RMF, afim de se estudar os comportamentos de hidratação do cimento, fissuras e possíveis formação de poros. Os corpos de prova foram moldados com dimensões 25 mm x 50 mm em atendimento a ABNT NBR 5738: 2016. Realizou-se a moldagem em duas camadas. O adensamento foi realizado com 5 golpes distribuídos por camada e posterior vibração externa, através de base vibratória durante 15 segundos.

A desmoldagem dos corpos de prova foi realizada após 48 horas, em seguida foram curados em tanque de cura estanque, submersos em água potável não corrente, protegidos de contaminação e raios solares dentro da câmara úmida do Laboratório de Concreto do Departamento de Engenharia de Materiais de Construção Civil (DEMC) da UFMG, por 21 dias. Foram moldadas amostras de referência que não continham o RMF (apenas cimento Portland e água) e outras nas quais 50% cimento CPV-ARI foi substituído por 50% de RMF e encontrou-se a de consistência normal para ambas.

A utilização do CPV- ARI, foi mantida por característica de baixo teor de adições minerais, que permite avaliar, de forma isolada, a influência do RMF na reologia das pastas e nas microestruturas geradas. O cimento Portland empregado na produção das pastas foi do mesmo fornecedor, marca e lote do adotado na confecção das argamassas estruturais.

Especificamente para o estudo das pastas utilizou-se o RMF, cominuído, em granulometria mais fina, semelhante à do cimento, passante na peneira #200 (abertura de 0,074mm segundo a norma ABNT NBR 11.579: 2012), pois assim, a reação de hidratação não sofre grandes interferências, reduz-se a exsudação e mantem-se a trabalhabilidade da pasta de cimento. O moinho utilizado para este procedimento foi o do Laboratório de Engenharia de Minas da UFMG, marca PAVITEST – Contenco Indústria e Comércio Ltda, uma vez que o moinho de bolas utilizado nesta pesquisa não apresentava redução de diâmetro de partículas após 14.000 voltas. Utilizou-se para esta moagem 42 barras em aço por período de 15 minutos.

Para determinação do percentual de água, afim de obter a consistência normal da pasta de cimento, utilizou-se o aparelho de Vicat, com amostra preparada segundo o procedimento da ABNT NBR NM 43: 2002. Na primeira determinação de consistência da pasta de referência (sem RMF) foram misturados apenas de água e cimento Portland CP-V em proporção que conduz a uma consistência denominada normal de referência, segundo a ABNT NBR NM 43: 2002 encontrando um fator água/finos de 31% para amostra de referência e mantendo-a na pasta com RMF.

O teste de Vicat com a sonda de Tetmajer, apresentou consistência baixa, pois a pasta com RMF que ficou muito fluida e o embolo de Tetmajer atingiu o fundo em um segundo. Assim reduziu-se a quantidade de água e um novo fator de água x finos ( $a/f$ ) de 22,8% para a consistência normal das pastas com RMF. Para que as comparações fossem equivalentes foram moldados corpos de prova sem o RMF neste mesmo teor de 22,8%. Após confecção das pastas e alcançado o estado endurecido das mesmas, avaliou-se a microestrutura através do Microscópio Eletrônico de Varredura Bruker Xflash Detector 410 – M, pertencente a pertencente ao Laboratório de Termoanálise e Propriedades dos Materiais (LABTERMO) da UNIFEI – Campus de Itabira, por dois métodos, elétrons secundários (SE), que fornecerá detalhes da superfície ionizada dos materiais e elétrons retroespalhados (BSE) que apresenta diferenças composicionais na região ionizada dos minerais. Os aumentos propostos para este aparelho foram de 500, 1.000, 2.000, 4.000 e 10.000 vezes, tanto no SE e BSE. Essas ampliações permitiram a observação de poros, fissuras, e compostos hidratados. A avaliação foi feita para pastas com 28 dias de idade. A metalização das amostras foi com cobrimento em ouro.

### **3.2.5 Estudo das argamassas estruturais com adição de RMF**

Para avaliação das propriedades das argamassas estruturais, tanto em estado fresco quanto endurecido, realizou-se a adição de RMF na confecção dos traços. Os teores de adição estudados foram de 10%, 20%, 30% e 40%, sendo que para efeitos comparativos nas análises foram confeccionados corpos de prova denominados referência por não possuírem nenhum teor de adição de RMF. Em relação à

quantidade de cimento Portland, em massa. O traço adotado foi de 1:3 (cimento: agregado miúdo), pois pretende-se futuramente estender estes estudos ao concreto. O fator água/cimento foi fixado em 0,50, afim de manter-se constantes o maior número de variáveis possíveis e identificar quais os efeitos da adição do RMF à formulação das argamassas estruturais.

Para análise em estado fresco foram utilizadas as argamassas com adição de RMF logo após sua preparação, segundo ABNT NBR 13279: 2005.

Para as análises em estado endurecido foram executadas moldagem dos corpos de prova também segundo a ABNT NBR 13279: 2005. Sendo confeccionados corpos de prova prismáticos 4cm x 4cm x 16 cm. Estes corpos de prova foram empregados nos ensaios de estudo de propriedades mecânicas, tanto na análise de resistência à compressão quanto a à tração na flexão. Adicionalmente confeccionaram-se 10 corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura para os ensaios de determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica, em estado endurecido, segundo ABNT NBR 9778: 2009 .

Ao todo foram confeccionados 45 corpos de prova prismáticos e 10 corpos de prova cilíndricos, utilizando-se as mesmas proporções e materiais descritos neste trabalho, divididos em 3 moldagens, afim de se confirmar uma tendência nos resultados. O estudo das propriedades das argamassas estruturais foi dividido em estado fresco e estado endurecido afim de avaliar-se tanto as características da mistura como também do produto endurecido.

### **3.2.6 Estudo das argamassas no estado fresco**

Antes de iniciar-se a moldagem de todos os corpos de prova foram determinados para cada traço proposto a consistência , pelo método *flow table* e a retenção de água segundo a norma ABNT NBR 13276: 2016. No ensaio para determinação do índice de consistência foram realizadas todas as etapas logo após a preparação da argamassa. Tomando os cuidados de manter todo o ambiente limpo e seco, a princípio foi preenchido o molde cônico em três camadas sucessivas, aplicando 15, 10 e 5 golpes respectivamente. Na mesa realizou-se o movimento de subir e cair de uma altura padronizada de 1cm, 30 vezes durante 30 s, após o processo foi medido o espalhamento da argamassa em três pontos e retirado a média dos valores.

A determinação da retenção de água em estado fresco foi obtida segundo o procedimento prescrito na norma europeia PR EN 1015-8: 1998. A escolha deste método baseou-se em trabalhos anteriores, como o de Farinha (2015), que lançou mão deste processo para a obtenção da retenção de água em argamassas de revestimento. No caso deste trabalho utilizou-se estas informações para concluir-se acerca da absorção dos RMF e do comportamento deste quanto a possível exsudação avaliada em conjunto com o espalhamento. Um possível uso deste material como adição em concretos alto adensável demanda um material que ajude com a coesão e reduza a exsudação, logo se identificou a importância destes parâmetros.

### **3.2.7 Estudo das argamassas no estado endurecido**

As propriedades mecânicas foram determinadas sempre no estado endurecido, pelos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão (ABNT NBR 13279: 2005), onde foram analisados e comparados os resultados com as exigências normativas para microconcretos. A resistência à compressão simples foi determinada individualmente para cada corpo de prova e expressa pela média de suas repetições. Utilizou-se prensa automatizada da marca EMIC - Modelo: DL2000, projetada para suportar ensaios até 2.000kN (200 toneladas), sendo que nenhum ajustamento foi feito nos controles da máquina de ensaio quando a peça aproximou-se da ruptura e o carregamento prosseguiu até a ruptura completa da peça. A resistência à compressão (em MPa) da peça foi obtida dividindo-se a carga de ruptura (em N) pela área de carregamento (em mm<sup>2</sup>).

Ressalta-se que na execução desse teste foram utilizadas as metades de cada corpo de prova ensaiado no ensaio de resistência à tração na flexão. As análises foram realizadas nas idades de 7 e 28 dias. Para cada traço adotou-se 6 exemplares, ou seja, 6 metades de corpos de prova prismáticos 4 cm x 4 cm x 16 cm, por idade de cura.

#### **3.2.7.1 Determinação da densidade, absorção de água e índice de vazios**

A determinação da densidade em estado endurecido foi obtida pelo processo de obtenção da massa e o volume dos corpos de prova confeccionados. Foram utilizados um paquímetro para auxílio na tomada de dimensões. Para cada corpo de prova (CP) foram tomados três valores referentes a cada dimensão (altura x largura x comprimento). Para cada traço proposto de argamassa, adotaram-se três corpos de prova. Calculou-se a média dos valores encontrados, obtendo-se o volume aparente de cada CP. Em seguida, foram efetuadas as pesagens e a densidade aparente foi obtida da relação entre a massa do CP e o volume aparente do mesmo. Os valores encontrados foram expressos em  $\text{g/cm}^3$ .

Para os ensaios de determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica, em estado endurecido, foram obedecidos os procedimentos prescritos na da ABNT NBR 9778: 2009. Utilizou-se um total de 12 corpos de prova cilíndricos de 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro com volume de  $157,08 \text{ cm}^3$ . O índice de vazios foi determinado pela relação entre os volumes de poros totais e o volume dos corpos de prova. Respeitando as exigências normativas, foram avaliadas o traço referência ( sem RMF) e os demais com adições de RMF em 10%, 20%, 30% e 40%. Todas as amostras se apresentavam integras, e sem materiais indesejáveis .

Para realização da secagem das amostras e determinação de suas massas na condição seca, as mesmas foram secas em estufa e mantidas a temperatura de  $105^\circ\text{C}$ , por aproximadamente 72h, posteriormente foram registradas as massas das amostras. Para saturação e determinação de suas massas na condição saturada e imersa em água a temperatura ambiente durante 72hrs, sendo que não houve diferença em mais 0,5% da menor massa, assim como é determinado em norma. Completo o processo de saturação, foram colocadas as amostras em um recipiente cheio de água que foi progressivamente levado a ebulição, a mesma foi mantida durante um tempo de 5h, completando-se com água à medida que ocorria o processo de evaporação, mantendo-se assim o volume constante de água. A seguir as amostras foram submetidas a resfriamento natural, registrando-se as respectivas massas utilizando-se da balança hidrostática. As mesmas foram retiradas da água e com um auxílio de um pano foram secas e pesadas, para determinação da massa saturada superfície seca.

### **3.2.7.2 Determinação das propriedades mecânicas**

As propriedades mecânicas foram determinadas sempre no estado endurecido, pelos ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão (ABNT NBR 13279: 2005), onde foram analisados e comparados os resultados com as exigências normativas para microconcretos. A resistência à compressão simples foi determinada individualmente para cada corpo de prova e expressa pela média de suas repetições. Utilizou-se prensa automatizada da marca EMIC - Modelo: DL2000, projetada para suportar ensaios até 2.000kN (200 toneladas), sendo que nenhum ajustamento foi feito nos controles da máquina de ensaio quando a peça aproximou-se da ruptura e o carregamento prosseguiu até a ruptura completa da peça. A resistência à compressão (em MPa) da peça foi obtida dividindo-se a carga de ruptura (em N) pela área de carregamento (em mm<sup>2</sup>).

Ressalta-se que na execução desse teste foram utilizadas as metades de cada corpo de prova ensaiado no ensaio de resistência à tração na flexão. As análises foram realizadas nas idades de 7 e 28 dias. Para cada traço adotou-se 6 exemplares, ou seja, 6 metades de corpos de prova prismáticos 4 cm x 4 cm x 16 cm, por idade de cura.

### **3.2.7.3 Estudo da durabilidade através de choque térmico**

No Brasil, a resistência à ação de calor e choque térmico de fachadas é tratada na norma de desempenho (ABNT NBR 15575: 2013). Entretanto, o método de ensaio proposto por esta norma difere dos métodos de ensaios de normas estrangeiras, em alguns aspectos, tentando avaliar a durabilidade, mesmo que de forma qualitativa nas argamassas estruturais confeccionadas propõe-se um ensaio baseado em choques térmicos, por não possuir norma específica destinada a este produto, o mesmo foi adaptado utilizando-se estufa e banhos em baixas temperaturas, simulando a ação da

chuva no material endurecido. Esta adaptação seguiu como referência a ABNT NBR 15.575-4: 2013 da seguinte forma:

- Os corpos de prova confeccionados com teores de adição de RMF de 10%, 20%, 30%, além do referência (0% de adição de RMF) com idades superiores a 90 dias foram submetidos a ciclos de variações térmicas, sendo 1 hora em estufa a  $80\pm 2^{\circ}\text{C}$  e logo após resfriamento com água a  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ , aplicada sobre o corpo de prova ainda em estado quente, com um regador simulando a atuação de chuva.
- Para cada teor de adição foram submetidos ao teste 3 corpos de prova. Os corpos de prova referentes ao fator de 40 % de adição do RMF não foram utilizados neste ensaio pois sofreram avarias antes do mesmo se iniciar.
- Foram tomadas as medidas das dimensões dos CP'S logo após os mesmos terem sido retirados da estufa e logo após o banho frio, afim de verificar-se variação de comprimento na peça após cada ciclo;
- Foram repetidos 10 ciclos deste procedimento;
- Após os 10 ciclos os corpos de prova foram submetidos a ensaios de resistência mecânica avaliando-se resistências de tração na flexão e compressão;
- Os resultados são comparados com as propriedades mecânicas do material antes do choque térmico;

Para estudo da quantidade e tamanho dos poros e possíveis fissuras foi utilizado um microscópio digital com ampliação de 1000x com auxílio do software ImageJ para tratamento das imagens.

#### **3.2.7.4 Resumo dos ensaios executados nas argamassas**

A Tabela 06 apresenta um resumo da relação de ensaios executados nas argamassas estruturais de referência, sem adição de RMF e nos demais traços com adição. Os ensaios foram realizados nos laboratórios da UNIFEI-Itabira e UFMG.

Tabela 6- Ensaios Executados- Argamassas estruturais

<b>Listas de ensaios propostos</b>	<b>Fonte</b>	<b>Idade (dias)</b>
Consistência pelo espalhamento	ABNT NBR 5823:2010	0
Densidade de massa no estado fresco	ABNT NBR 3278:2005	0
Retenção de água no estado fresco	Pr- EN 1015-8	0
Massa específica no estado endurecido	ABNT NBR 9778:2009	28
Índice de absorção de água no estado endurecido	ABNT NBR 9778:2009	28
índice de vazios no estado endurecido	ABNT NBR 9778:2009	
Resistência mecânica à tração na flexão	ABNT NBR 3279:2005	28
Resistência mecânica à compressão axial	ABNT NBR 3279:2005	28
Choque térmico- Proposição de ensaio	ABNT NBR 5575:2013	28
Microscopia Digital	-	28

## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresentará os resultados deste trabalho, estabelecendo um comparativo com os resultados de outras pesquisas e avaliando o reaproveitamento de resíduos de mineração de ferro na confecção de compósitos cimentícios atuando como adição mineral.

### 4.1 Análise química e mineralógica do resíduo de mineração e do cimento

A análise química das amostras RMF obteve-se os resultados demonstrados na Tabela 8, quanto a fluorescência de raios-X. Comparando os resultados deste trabalho aos estudos de Souza *et al.* (2008), Amoury-Neto *et al.* (2014), Andrade (2014) percebe-se a grande variabilidade dos resíduos de minério de ferro quanto a composição (Tabela 7), o que pode-se ser explicado pela localização da jazida, no quadrilátero ferrífero e também pelo processo de beneficiamento. Para o resíduo utilizado neste trabalho, percebe-se ainda alto teor de ferro, o que justifica-se devido ao processo simplificado de beneficiamento pelo qual o minério extraído da lavra foi submetido.

Tabela 7 - Percentuais de composição mineralógica correlacionado a outros estudos.

	<b>Souza <i>et al.</i> (2008)</b>	<b>Amoury-Neto <i>et al.</i> (2014)</b>	<b>Andrade (2014)</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	83,55	64	16,79
<b>SiO<sub>2</sub></b>	4,78	-	79,21
<b>CaO</b>	0,2	-	-
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3,81	0,8	3,13
<b>Outros</b>	7,66	35,2	0,87

Fonte: adaptado de Souza *et al.* (2008); Amoury-Neto *et al.* (2014); Andrade (2014)

Tabela 8 - Resultado Fluorescência de Raios- X.

Análise	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	LOI
RMF	0,49	25,60	3,13	59,10	3,85	0,23	0,14	0,16	<0,1	0,38	0,23	6,12
Cimento	0,16	20,00	4,62	2,76	60,10	1,69	0,23	0,23	0,22	0,95	0,16	5,24

O ensaio realizado no Laboratório de Raios-X do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG obteve os principais padrões das fases minerais do RMF, conforme mostrado nas Tabelas 9 e 10 e Figura 6. Observa-se que uma maior quantidade de Ferro (Fe) e Sílica (Si), baixa quantidade de Alumínio (Al) e Fósforo (P) e traços da presença de Manganês (Mn), Tálcio (Ti), Cloro (Cl), Enxofre (S), Magnésio (Mg) e Sódio (Na) na amostra de RMF analisada, semelhante ao resultado de Fluorescência de Raios-X. Também percebe-se a presença predominante de Quartzo - SiO<sub>2</sub>, Hematita - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Goethita - FeO(OH) e Gibbsita - Al(OH)<sub>3</sub>. Logo não se identifica quaisquer minerais que poderiam propiciar algum tipo de reação álcali-sílica (FLORINDO, 2009).

Tabela 9 – Composição química semi-quantitativa do Resíduo de minério de ferro.

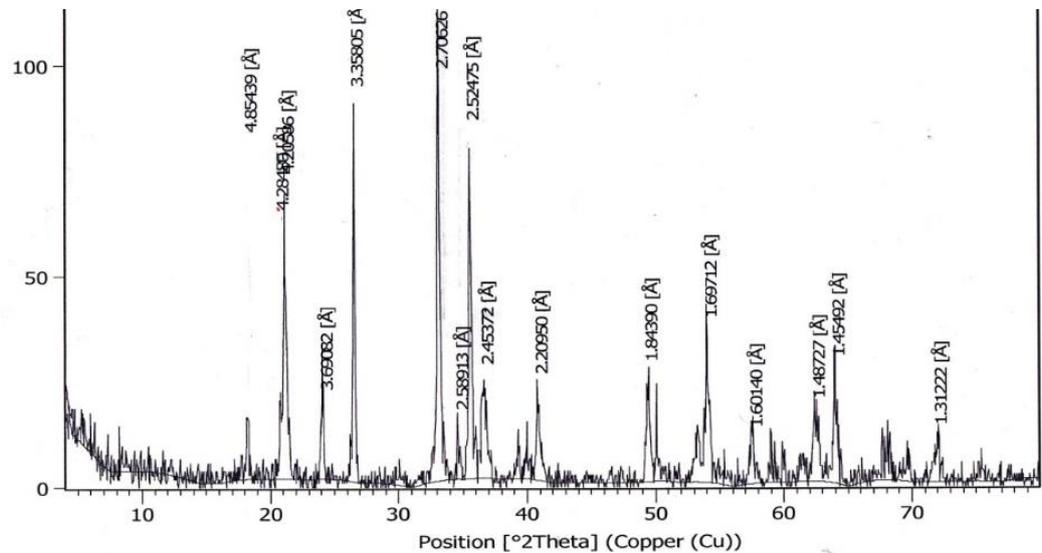
Quantidade	Componentes
Alto	Fe, O
Médio	Si
Baixo	Al, P
Traço	Mn, Ti, Cl, S, Mg, Na

Tabela 10 - Resultado semi-quantitativo da composição mineralógica do Resíduo de minério de ferro.

Mineral	Dureza	Presença
Hematita - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,5 - 6	X
Quartzo - SiO <sub>2</sub>	7	X
Gibbsita - Al(OH) <sub>3</sub>	2,5 - 3	X
Goethita - FeO(OH)	5 - 5,5	X
Magnetita - Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5,5 - 6	X
Caulinita - Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub>	2 - 2,5	-

As informações quanto a dureza dos minerais foram obtidas conforme Neves (2008).

Figura 6- Espectrômetro do RMF



Percebe-se pelos resultados obtidos tanto pelo método de FRX quanto DRX que o resíduo pode ser constituído basicamente pelos elementos Fe (Ferro) e Si (Silício), com pequenas parcelas de outros minerais, porém ressalta-se que na atualidade existe a possibilidade de que o ferro possa ser recuperado em novos processos industriais de beneficiamento na mineração como por exemplo o retorno da polpa para o início do processo de beneficiamento (INPI, 2012).

Estes resultados corroboram com D'agostino (2008) que diz que os rejeitos de minério de ferro são de grande heterogeneidade quanto a suas características. Esta variabilidade se dá pelo processo de beneficiamento aplicado, pelo tipo de mineral que compõem a lavra e também por sua posição de disposição na barragem de rejeito. Observa-se em trabalhos anteriores utilizando-se resíduo de minério de ferro, como o de Fontes (2013), que o local de depósito pode afetar na variabilidade das características granulométricas, mineralógicas e estruturais do resíduo, em função das variáveis que controlam os processos de descarga da lama, corroborando com os trabalhos de Santana Filho (2013) e Andrade (2014). Ainda segundo Presotti (2002) *apud* Fontes (2013) o rejeito pode vir a apresentar características diferentes em função do local onde em que foram depositados. Diferentes regiões e tipos do reservatório podem afetar as características granulométricas, mineralógicas e estruturais em

função das variáveis que controlam os processos de descarga na barragem de lama onde são depositados os resíduos. Portanto, torna-se importante levantar as características desta barragem, assim como o processo de beneficiamento do RMF, pois processos de descarga diferentes, com características diferentes, podem apresentar resultados muito diferentes para o mesmo produto confeccionado.

Constata-se pela Figura 6 vários picos demonstrando a elevada cristalinidade do resíduo de mineração e possivelmente, pouca probabilidade de uma eventual reação deste material com os materiais presentes nos compósitos cimentícios.

Quanto a composição química do cimento CPV-ARI utilizado o ensaio de Florescência de Raios-X demonstra que o material utilizado se encontra dentro da norma referência ABNT NBR 5733:1991, apresentando mais de 85% de clínquer e sulfatos de cálcio com óxido de magnésio inferior a 2% em massa.

A perda ao fogo dos dois materiais possuem valores próximos, logo a presença do RMF tende a não gerar grandes comprometimentos ao comportamento do microconcreto em situações de incêndio.

#### **4.2 Caracterização física e ajustes do resíduo as condições de utilização**

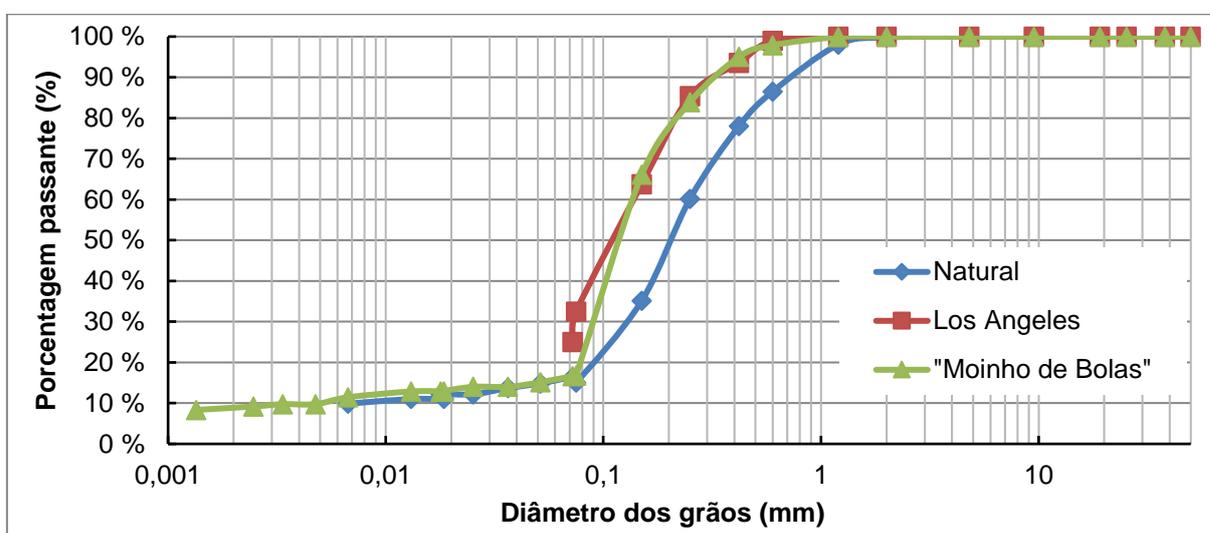
Foi estudada a composição granulométrica do material, pelo ensaio de granulometria completa segundo a ABNT NBR 7181:2016 pelos processos de peneiramento e sedimentação, onde identificou-se que o material em condição natural se apresentava em condição desfavorável à utilização como adição ao cimento (areia fina), conforme proposta deste trabalho, ou seja, apresentava-se mais grosso (Figura 7).

Trabalhos anteriores como Zhao *et al.* (2014), Ramos (2017), Lage (2017) e Campanha (2011) apresentam que a utilização de resíduos com granulometria mais fina, com passante (maior que 50%) na peneira de malha 0,15 mm, apresentam maior potencial de aproveitamento para adições ou substituições em massa, na produção de concretos, argamassas e pastas com adição de RMF. O material deste trabalho apresentava-se em diâmetros característicos de areia fina, portanto decidiu-se

cominuir o material e refazer a granulometria visando aumentar o percentual de finos da amostra fornecida, aumentando sua superfície específica.

O primeiro processo de moagem empregado (Figura 7) foi o moinho de abrasão *Los Angeles* que não atingiu a granulometria desejada e apesar de gerar a cominuição do material, apresentava elevada presença de grãos maiores com características de areia. No segundo processo de moagem efetuado, utilizando-se o moinho de bolas e percebeu-se ser mais adequado, possibilitando um maior aproveitamento do material para a confecção das argamassas estruturais. Estudos apontam que para uma mesma relação água/aglomerante determinada, a redução do tamanho médio das partículas geralmente resulta em uma maior taxa de hidratação e, assim, em melhores propriedades e maiores resistências nas primeiras idades, logo atendendo aos objetivos deste trabalho (CASTRO *et al.*, 2009).

Figura 7 - Ajuste de granulometria do Resíduo de minério de ferro.



A dificuldade de moagem deste material pode estar associada a composição mineralógica do RMF, que é composto por minerais de elevada dureza, como a hematita, o quartzo, goethita e magnetita. Aristimunho e Bertocini (2012) utilizaram RMF proveniente de barragens de lama e percebem que após o processo de cominuição em moinho de bolas a curva granulométrica do resíduo apresentou-se bem graduada e característica de um silte argiloso. Diferente do resíduo deste trabalho que apresentou características granulométricas de areia fina. Porém constata-se a tendência nas pesquisas (ZHAO *et al.*, 2014; RAMOS, 2017; LAGE, 2017 e

CAMPANHA, 2011) de utilização de material com maior presença de finos. Também observa-se que apesar de ser tratar do mesmo tipo de resíduo, existe grande variabilidade do RMF, sendo alterado pela origem do material, processo de beneficiamento e também forma de disposição no meio ambiente.

A distribuição granulométrica do material moído na condição descrita, é explicitada na Tabela 11 e Figura 7. Percebe-se um aumento no percentual de finura do material obtido. Observa-se que a porcentagem de finos com aumento relativo a condição natural, proporcionando 68,4% de aproveitamento do material denominado “fino” (<0,15 mm). Este material passante será aplicado na confecção das argamassas estruturais e pastas.

Tabela 11 - Granulometria do resíduo moído na condição final.

$\Phi$ Peneira (mm)	% Retido acumulado	% Passante
4,8	0	100
2	0	100
1,2	0	99,9
0,6	2,1	97,9
0,42	6,7	93,3
0,3	12,5	87,5
0,15	31,6	68,4
0,075	58,8	41,2
Fundo	100	0

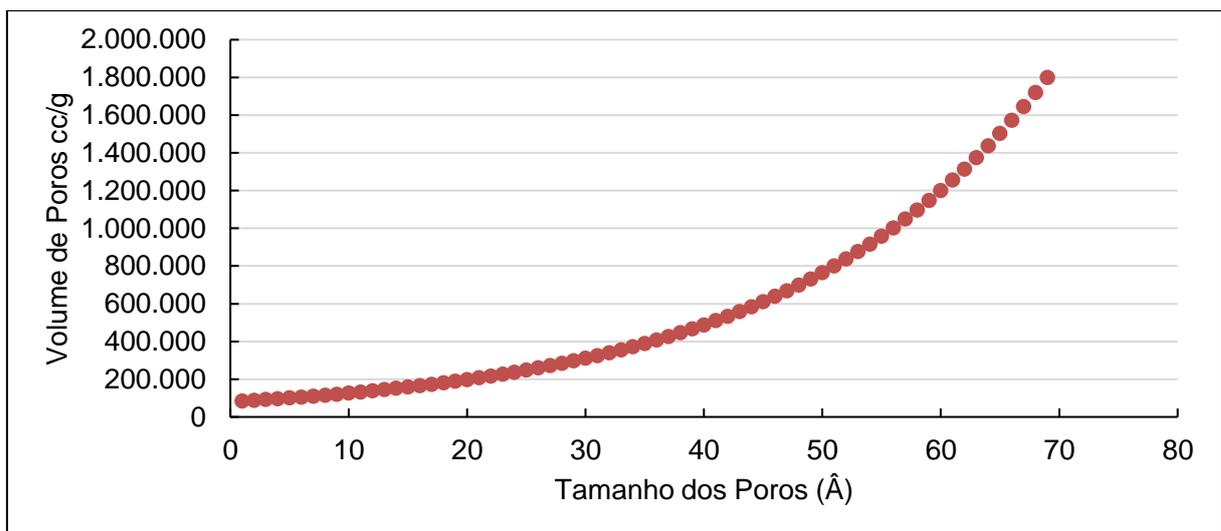
### 4.3 Análise da densidade, superfície específica e porosidade

A densidade obtida do material cominuído foi de 4,04 g/cm<sup>3</sup>, pelo processo de picnometria em água DNER-ME 093: 1994. Este valor é superior ao de cimentos convencionais ( $\approx$  3,10g/cm<sup>3</sup> segundo InterCement Brasil, 2018), contudo se apresenta próximo aos RMF estudados (ZHAO *et al.*, 2014; RAMOS, 2017; LAGE, 2017 e CAMPANHA, 2011). Acredita-se que o uso deste material como adição mineral não afetará muito a densidade final dos compósitos cimentícios, o que aumentaria a sobrecarga nos elementos estruturais e fundações.

Os valores de superfície específica e porosidade foram avaliados pela técnica de B.E.T, que considera a área dos poros e microporos abertos das partículas dos resíduos de minérios, além das áreas das suas superfícies externas. Pelo processo de análise observou-se que a área superficial do resíduo em estado natural é de  $4,800\text{m}^2/\text{g}$  enquanto que no RMF cominuído, utilizado nesta pesquisa, encontrou-se área superficial de  $6,019\text{m}^2/\text{g}$ , logo o processo de cominuição aumentou a área superficial em 25,40%. A área superficial do resíduo cominuído é 354,05% maior que a do cimento CP V - ARI, da ordem de  $1,70\text{m}^2/\text{g}$  (CASTRO, LIBORIO, PANDOLFELLI, 2011), denotando ser um material com maior figura, logo com tendência a demandar mais água de amassamento.

Os valores encontrados para o volume médio dos poros foram de  $0.036\text{cc/g}$  (Figura 8) sob o limite de detecção máximo deste ensaio de 1.993 %. O maior volume de poros se encontra na dimensão  $26,87\text{Å}$ , exibindo que é um material com características maiores de mesoporos do que macroporos (classificação IUPAC). Percebe-se o mesmo quanto ao tamanho de poros no trabalho de Costa (2016), que estudou concretos com aplicação de rejeitos de sinter feed.

Figura 8 - Comportamento dos poros do Resíduo de minério de ferro.



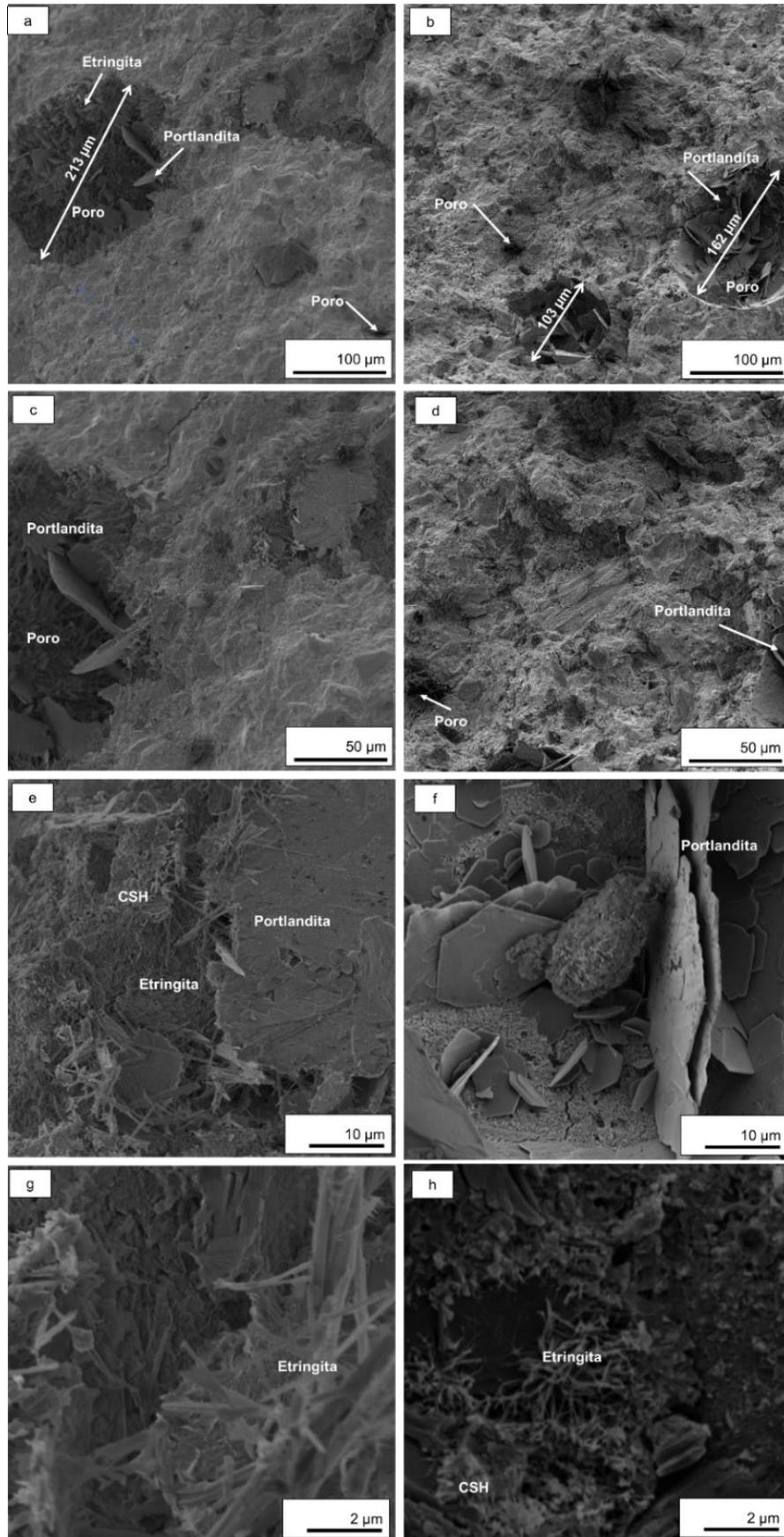
### 4.3 Propriedades das pastas confeccionadas com RMF

Na avaliação do efeito do resíduo nas pastas de cimentos, constatou-se que as pastas com substituição do aglomerante por RMF ficaram mais fluidas quando comparadas as pastas de referência (consistência normal de 31,00 %), chegando a um percentual quase 40% superior. Utilizando-se então a definição da consistência normal para os resíduos, chegou-se a um valor de água/finos de 22,08%, gerando uma redução de 31,41% da consistência do cimento. Percebe-se que apesar da finura do material, este se apresenta pouco poroso e demanda pouca água, o que pode contribuir para um material de maior durabilidade. Divergindo dos resultados encontrados em Fontes (2013), no qual a adesão de grãos planos e com menor tamanho, como os grãos de quartzo ou hematita, poderiam provocar um aumento de vazios no material, o que requereria maiores quantidades de água para obtenção de plasticidade ou trabalhabilidade necessárias, retratado por uma maior higroscopicidade do material.

No estudo das pastas confeccionadas com o cimento CPV-ARI e o RMF aplicou-se análise morfológica das pastas com do resíduo, por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Sequência ao processo de obtenção de imagens, através do dispositivo de microanálise de espectrometria por dispersão de energia (EDS) acoplado ao MEV, foram obtidas informações químicas da amostra em estudo. Nas Figuras 9 e 10 são apresentados os resultados obtidos pelo processo.

Percebe-se uma morfologia nas pastas semelhante, sendo verificado poros na faixa de 103 a 203  $\mu\text{m}$  em ambos (Figura 9 - a, b, c, d), e vários poros na faixa de 0,5 $\mu\text{m}$ . No interior dos poros maiores pode-se identificar a formação da portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) em ambos (Figura 9 - a, b, c, d), contudo constatou-se a presença de Etringita somente nas amostra sem resíduo (Figura 9 - a e c). Existem indícios que a presença de etringita tendem a reduzir a resistência mecânica (VIEIRA E MOLIN, 2011) e com a presença de resíduos de minérios constatou a redução deste na região dos poros o que pode indicar melhoria das propriedades mecânicas de compósitos cimentícios com a presença de RMF.

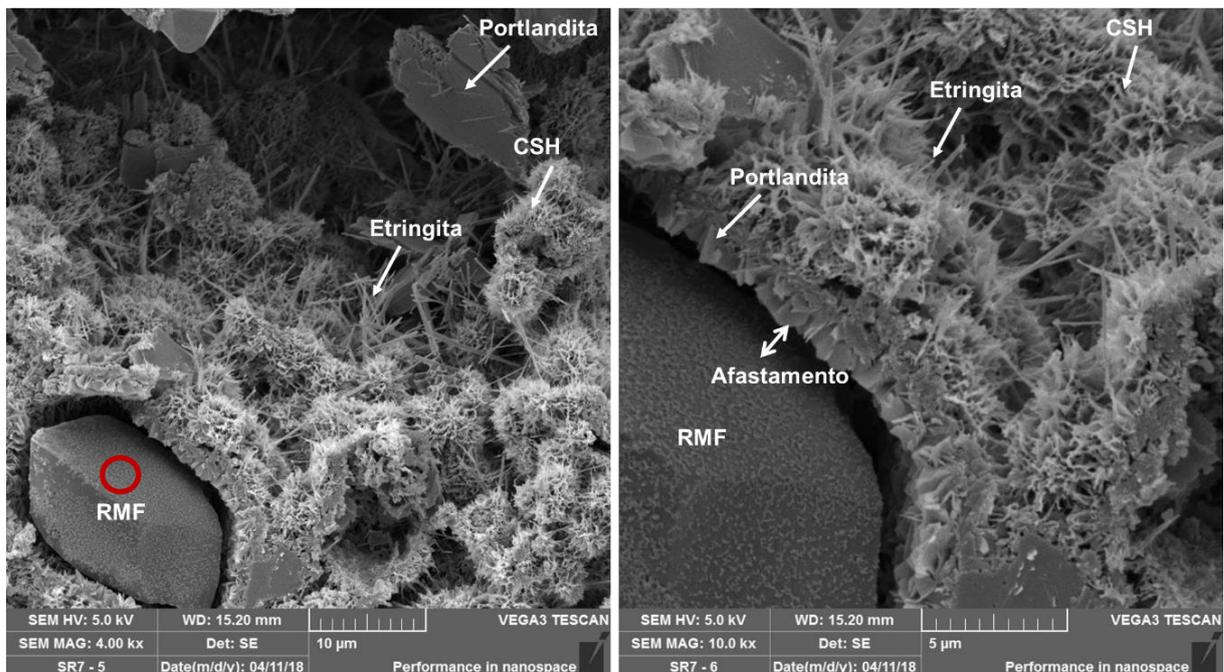
Figura 9 - Análise microestrutural das pastas por Microscopia de varredura eletrônica: (a, c, e, g) Referência e (b, d, f, h) RMF.



Observa-se a presença de etringita (Figura 9 g e h) nos materiais estudados, sendo que o tamanho médio dos cristais é cerca de 30  $\mu\text{m}$  para o referência e aproximadamente 8  $\mu\text{m}$  para as pastas com RMF, logo uma redução de aproximadamente 3 vezes no tamanho médio. Constatou-se a presença de CSH em ambas amostras, sendo visível somente em escalas maiores (2  $\mu\text{m}$ ).

O comportamento observado neste trabalho difere das observações, por exemplo, de Souza (2008), que realizou estudos com materiais cerâmicos com adição de resíduo de minério de ferro, onde pela análise de MEV, na região onde encontravam-se uma quantidade excessiva de resíduo de minério de ferro, percebia-se “defeitos” na estrutura que podem estar atribuídos à presença dos aglomerados de hematita, estes defeitos dificultariam a consolidação das partículas e como consequência, poderia ocorrer um decréscimo da resistência mecânica do material estudado. Porém importante ressaltar que o resíduo utilizado em Souza (2016) possui teores de concentração de ferro ainda maiores quando comparados ao presente trabalho e o material de aplicação do resíduo tem características diferentes, como por exemplo o processo de cozimento.

Figura 10 - Microestrutura das pastas próximo as partículas de Resíduo de minério de ferro.

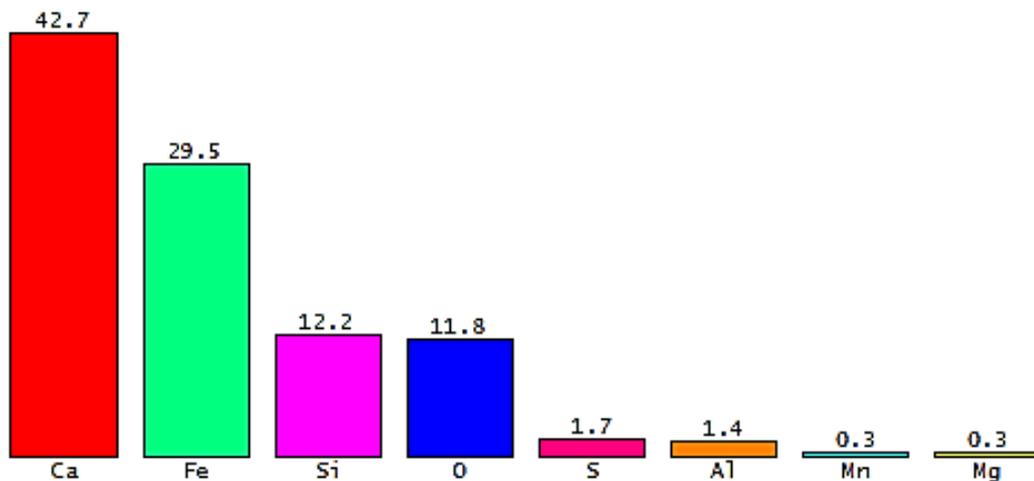


Na figura 10 observa-se uma região de “afastamento” de uma partícula da pasta que pode estar atribuída a absorção de água do RMF ocasionando um aumento no

volume da mesma e contribuindo com a formação da portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Uma outra hipótese levantada seria a da presença de algum componente no resíduo de minério de ferro que possa reagir de forma expansiva nas primeiras idades, afastando a matriz e gerando a formação da portlandita na zona de transição. Ambas as hipóteses necessitariam de estudos mais aprofundados para conclusões mais elucidativas.

A Figura 11 demonstra a composição química, referente a área demarcada em vermelho, através da análise do RMF pelo método de EDS, sendo composta principalmente por 42,7% de Ca (cálcio), 29,5% de Fe (ferro), 12,2% de Si (silício), dentre outros, e que difere do EDS realizado em outros pontos da pasta com adição de RMF, que não apresentou concentração elevada de Ferro, conforme será apresentado na Figura 13. Acredita-se que este seja uma partícula de resíduo recoberta pela pasta de cimento o que causaria o elevado valor de cálcio, contudo não se identifica qualquer estrutura que corrobora com o cimento recobrindo.

Figura 11 - EDS do Resíduo de minério de ferro – Área demarcada na figura 11.



A Figura 12 apresenta a análise microestrutural da pasta com de adição de RMF, com aumentos de 500 e 1000 x, no qual foram percebidos comportamentos diferentes das demais imagens. A Figura 13 trata-se do EDS realizado na área demarcada da Figura 12.

Figura 12 - Microestrutura da pasta com Resíduo de minério de ferro.

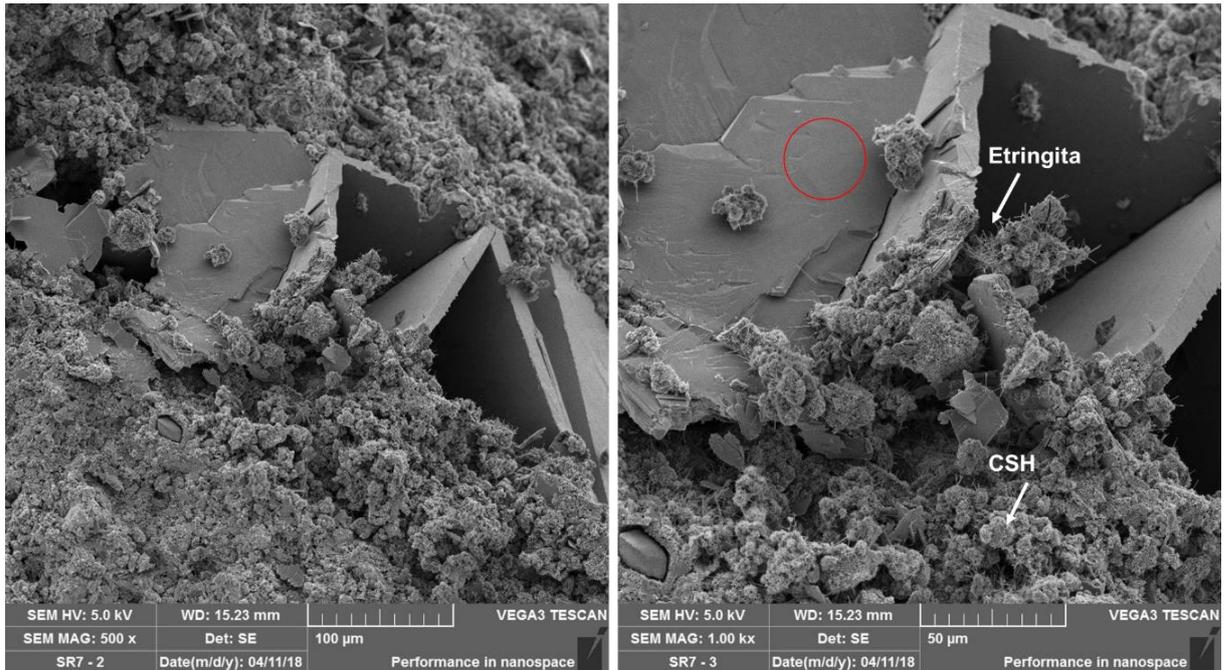
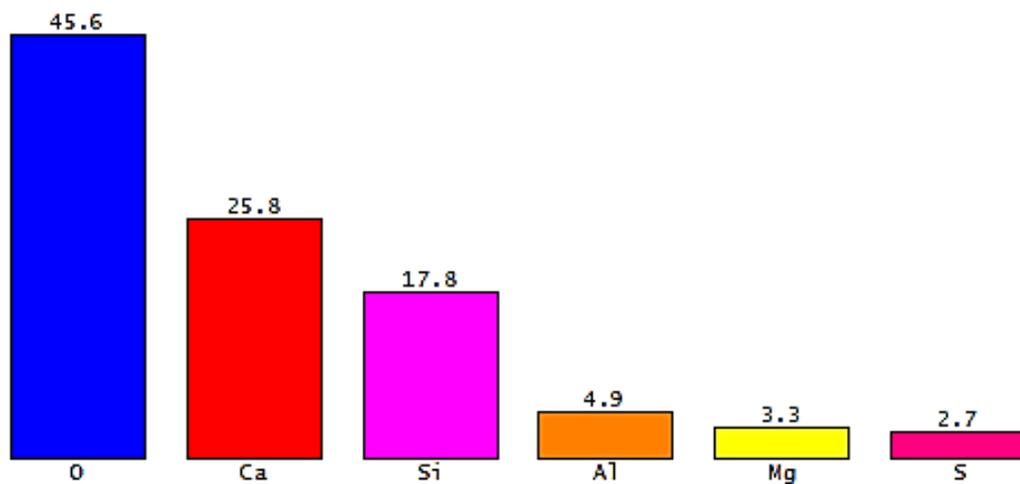


Figura 13 - EDS do Resíduo de minério de ferro – Área demarcada na figura 13.



Constatou-se na Figura 13 a formação de placas de grande dimensão sem presença de ferro e com os elementos O ( 45,6%), Ca (25,8%), Si (17,8%), dentre outros em menores percentuais. Não se reconheceu a morfologia deste composto sendo indicado estudos futuros para maior aprofundamento. Constatou-se a presença de Etringita e CSH nas proximidades desta placa (*Figura 12*).

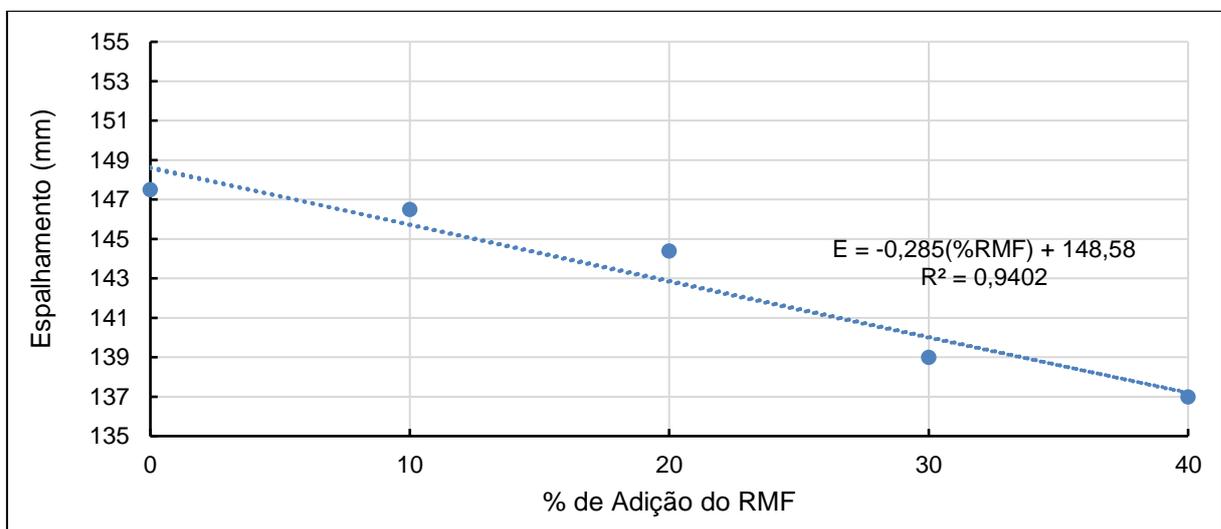
#### 4.4 Propriedades das argamassas no estado fresco

Para obtenção de maior clareza na apresentação e discussão dos resultados optou-se por separá-los em estado fresco e estado endurecido, nesta sessão serão apresentados os resultados referentes ao estado fresco.

##### 4.4.1 Consistência – *flow table*

Percebe-se (Figura 16) que o aumento do percentual de adição do RMF nas misturas, não provoca grandes modificações nesta propriedade. Para adições de até 10% de RMF a redução no espalhamento da argamassa não é tão expressiva para fins de trabalhabilidade, cerca de 1%. O efeito da incorporação do RMF nessa propriedade é mais evidente a partir de 20% de adição, sendo que para o teor de 40% de adição, nota-se uma redução de 7% na condição de espalhamento em relação ao traço de referência (sem adição do RMF). Tal observação pode estar atribuída ao aumento do percentual de finos presentes, tornando a argamassa ávida por água e reduzindo sua trabalhabilidade. Fontes (2016) observou um comportamento semelhante, atribuindo este comportamento à granulometria bastante fina do rejeito.

Figura 14- Determinação do índice de consistência.



O entendimento da necessidade de água para manter-se a trabalhabilidade faz-se importante, pois sabe-se que o excesso de água embora aumente a trabalhabilidade das argamassas de cimento Portland é prejudicial, enfraquecendo a resistência mecânica final do produto endurecido (RIBEIRO, 2009). Conforme o nível de utilização do RMF na produção de argamassas, os resultados do espalhamento sinalizam para o uso de aditivos químicos, os mesmos poderiam gerar a garantia de facilidade de aplicação, manuseio e bom acabamento dos compósitos cimentícios. Porém enfatiza-se que neste trabalho não foi empregado nenhum tipo de aditivo como por exemplo, plastificantes.

Estes resultados corroboram com os de pastas, no qual constatou-se que apesar da maior finura do resíduo, não houve maior demanda de água e sim o contrário, indicando a baixa porosidade do RMF e a potencialidade de seu uso melhorar as propriedades de durabilidade.

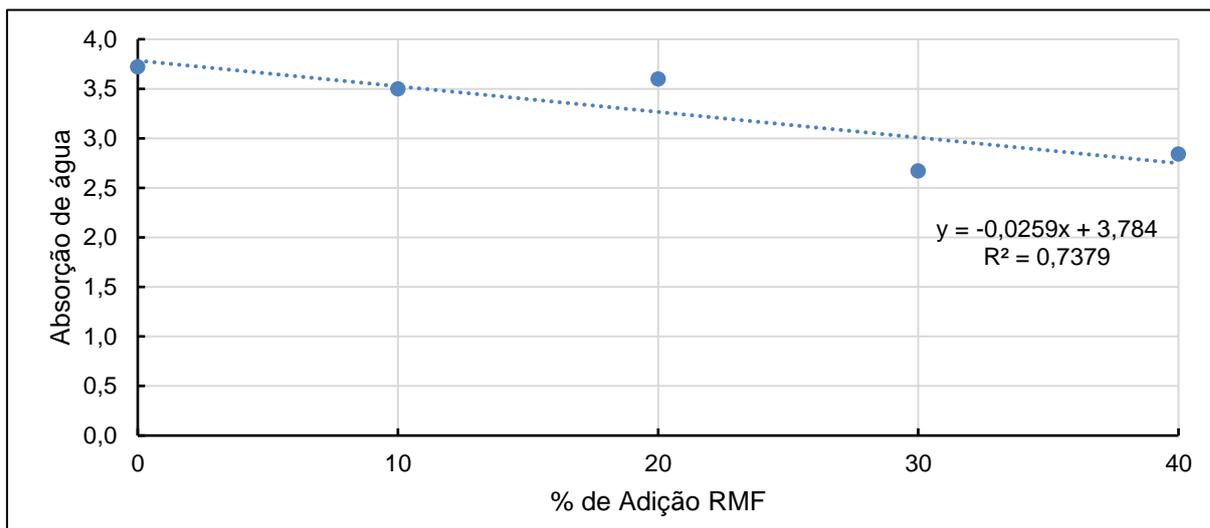
#### 4.4.2 Absorção e retenção de água das argamassas

Ao analisarmos a retenção e absorção de água no estado fresco, observa-se pequenas variações em relação ao aumento de adição do RMF nas argamassas estruturais (tabela 12 e Figura 15). Verifica-se que a propriedade praticamente se mantém até o teor de adição de 20%, e depois para teores superiores de adição ocorre uma queda na capacidade de absorção de água das argamassas estruturais, chegando a uma variação de cerca de 8%.

Tabela 12 - Percentuais de absorção e retenção de água nas argamassas.

<b>% RMF</b>	<b>% Absorção</b>	<b>% Retenção</b>
<b>0</b>	3,72	96,28
<b>10</b>	3,50	96,50
<b>20</b>	3,60	96,40
<b>30</b>	2,67	97,33
<b>40</b>	2,84	97,16

Figura 15 - Absorção e retenção de água nas argamassas estruturais.



A incorporação do RMF acarretou na redução da absorção de água das argamassas, o que também se observa nos estudos de Aguiar *et al.*(2016). Tais indicativos sugerem mais uma vez que o RMF participa na mistura com efeito filer, fechando poros das argamassas estruturais confeccionadas.

Para a propriedade de retenção de água, observa-se comportamento semelhante, até o teor de 20% de adição a variação da propriedade não é percebida variação (diferença inferior a 0,02%). Para teores de maior adição, observa-se um aumento da retenção de água nas argamassas estruturais, cerca de 6% de aumento. Este comportamento poderia estar associado ao comportamento apresentado na Figura 10, onde as partículas de RMF poderiam estar contribuindo para uma maior retenção de água. Porém difere do observado nos estudos de Fontes (2013), no qual a argamassa contendo agregado reciclado de RMF possuía capacidade inferior de retenção de água quando comparada ao traço de referência.

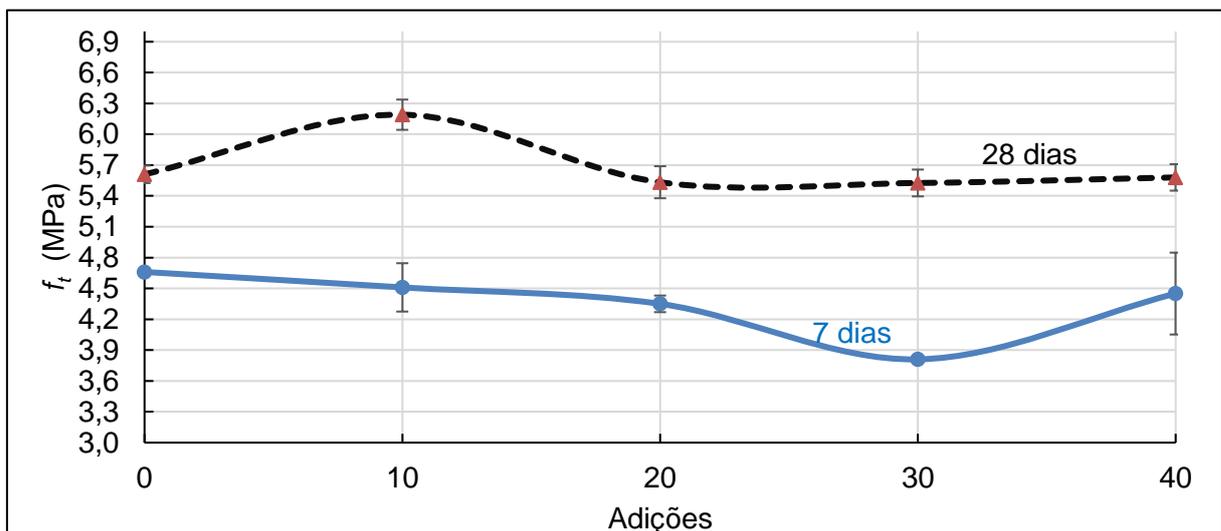
#### 4.5 Propriedades das argamassas no estado endurecido

Na busca de um teor considerado ótimo de utilização para o resíduo de minério estudado quando aplicado à formulação de argamassa estrutural, avaliou-se as propriedades mecânicas, bem como a absorção de água e índice de vazios.

#### 4.5.1 Resistência à tração na flexão e compressão

A Figura 16 apresenta os resultados dos testes de tração a flexão nas idades de 7 e 28 dias. Observa-se que a tensão de ruptura para a resistência à tração na flexão na idade de 7 dias em todos os traços com adição de RMF apresentam pequena perda de resistência em relação ao traço de referência. Esta perda pode estar associada a processos de moldagem dos corpos de prova, uma vez que não representam nem 1% de perda na propriedade. Já na idade de 28 dias, observa-se que este comportamento se mantém com pequenas variações e torna-se mais perceptível, devido à redução dos desvios. Observa-se que quando realizado o estudo de análise de microscopia da pasta, as mesmas que continham a presença do RMF percebiam-se presença de formações de etringita com indicativos de menores tamanhos, o que poderia estar associado a esta pequena reduzindo a resistência a tração.

Figura 16 – Resistência à tração na flexão ( $f_t$ ) para as idades de 7 e 28 dias (MPa).

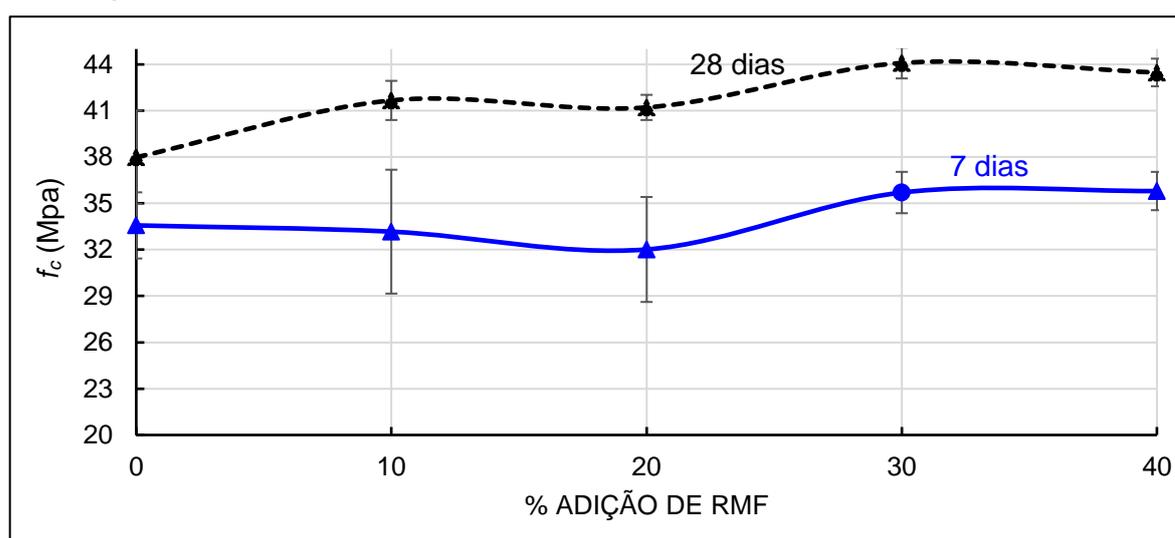


Nota-se que em linhas gerais que resultado obtidos convergem a alguns estudos anteriores para esta propriedade como nos trabalhos de Fontes (2013) e Aristimunho (2012), nos quais os traços compostos com RMF apresentaram um bom comportamento quanto à tração na flexão, devido ao envolvimento dos grãos de rejeito pelos produtos de hidratação do cimento. Os traços tiveram a resistência à tração na flexão um pouco menor do que os traços referência, nas idades iniciais, porém obtiveram um resultado superior aos 28 dias em todas as argamassas.

Salienta-se que esta análise comparativa pretende estabelecer linhas de comportamentos referente a presença e quantidade do RMF aplicados, uma vez que são estudos onde a forma de aplicação do RMF difere entre si. Observa-se que de forma geral o RMF não altera estas propriedades e podem ser admitidos até teores superiores ao avaliados nesta pesquisa.

A Figura 17 apresenta os resultados obtidos no ensaio de compressão axial a que foram submetidos os corpos de prova.

Figura 17 - Resistência à compressão ( $f_c$ ) para as idades de 7 e 28 dias (MPa).



Observa-se (Figura 17) que a tensão de ruptura de compressão, na idade de 7 dias, os traços com até 20% de adição de RMF, apresentam pequena perda de resistência em relação ao traço de referência, já nos traços de 30% e 40% de adição as argamassas estruturais percebe-se um pequeno ganho de resistência a compressão em relação ao traço de referência. Como trata-se de variações muito pequenas, as mesmas podem estar atribuídas a processo de execução do ensaio. Já na idade de 28 dias, nota-se que todos os traços com adição de RMF apresentam ganho de resistência à compressão, sendo que o traço de 40% apresenta 14% de ganho. Estes resultados corroboram com os de Fontes (2013) onde os traços estudados compostos com rejeito apresentaram um bom comportamento à compressão, sendo a resistência pouco menor quando comparada aos traços referência. Porém diferem de Aristimunho (2012) onde dentre os teores de adições estudados tem-se o de 20% de adição, que apresentaram resistências inferiores à

referência, enquanto que somente adições até 10% apresentam resistências superiores.

Assim como percebido nos testes referentes a propriedades em estado fresco, no estado endurecido os resultados obtidos corroboram com a ideia de possibilidade de fechamento de poros do produto, sendo o RMF responsável pelo efeito filer, propiciando ganho na compressão. É importante salientar que o microconcreto fabricado com todos os níveis de adição de RMF estudados, atende as condições mecânicas mínimas para utilização como concreto estrutural a partir de 20 MPa, segundo ABNT NBR 8953: 2015. Porém, aos sete dias de idade, somente a partir do traço contendo 30% de adição de RMF percebe-se a resistência mínima atingida atribuída ao CPV-ARI pela ABNT NBR 5733: 1991 que seria de 34 MPa.

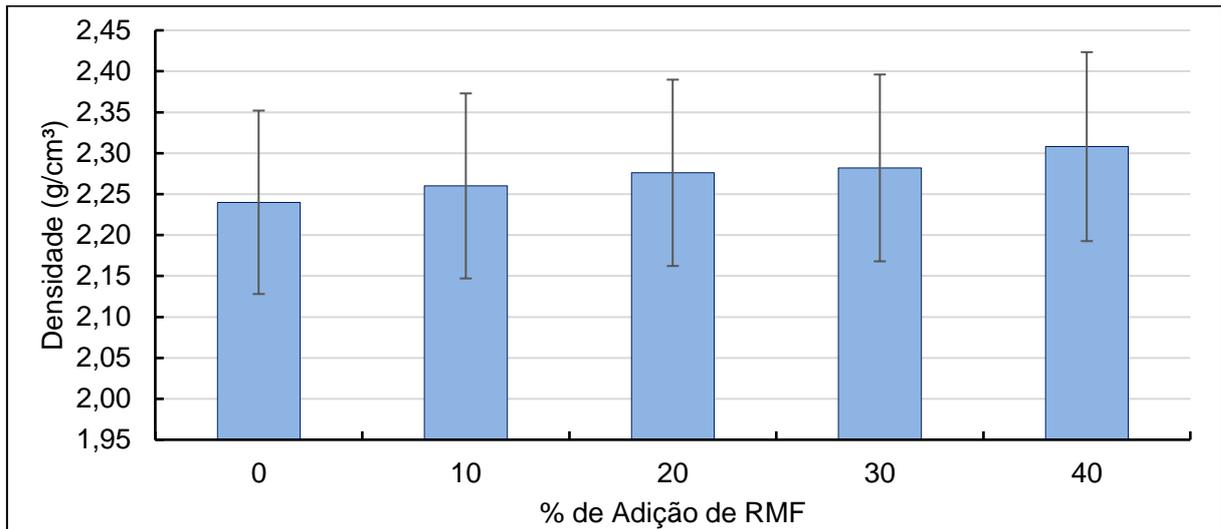
Ressalta-se que a utilização do RMF na composição das argamassas estruturais apresenta-se de forma benéfica não só na maioria das propriedades do estado fresco e endurecido, mas também no aumento de volume do produto podendo tornar o produto mais barato.

#### **4.5.2 Densidade aparente**

Os valores obtidos na avaliação da densidade aparentem das argamassas estão apresentados na Figura 18. Observa-se que o RMF propicia um pequeno aumento da densidade aparente das argamassas. O acréscimo de densidade apresenta-se de forma gradativa, onde o traço com 40% de adição de RMF possui densidade aparente apenas 3% maior do que o traço de referência.

Comparando o resultado obtido com a densidade aparente de concretos convencionais, que segundo Mehta e Monteiro (2008) permeiam entre 2,3 e 2,5 g/cm<sup>3</sup>, infere-se que o microconcreto produzido com adição de RMF poderia ser aplicado em funcionalidades estruturais e não somente em estruturas apoiadas ao solo, não ocasionando excesso significativo de sobrecarga nas estruturas, uma vez que o maior percentual de adição ocasionou aumento de apenas 3% na densidade aparente, em relação ao traço de referência.

Figura 18- Densidade da argamassa estrutural.



#### 4.5.3 Absorção de água, índice de vazios.

Os resultados obtidos nos testes para determinação de absorção de água e índice de vazios conforme ABNT NBR 9778: 2009 são explicitados nas Figuras 19 e 20.

Figura 19- Absorção de água das argamassas estruturais.

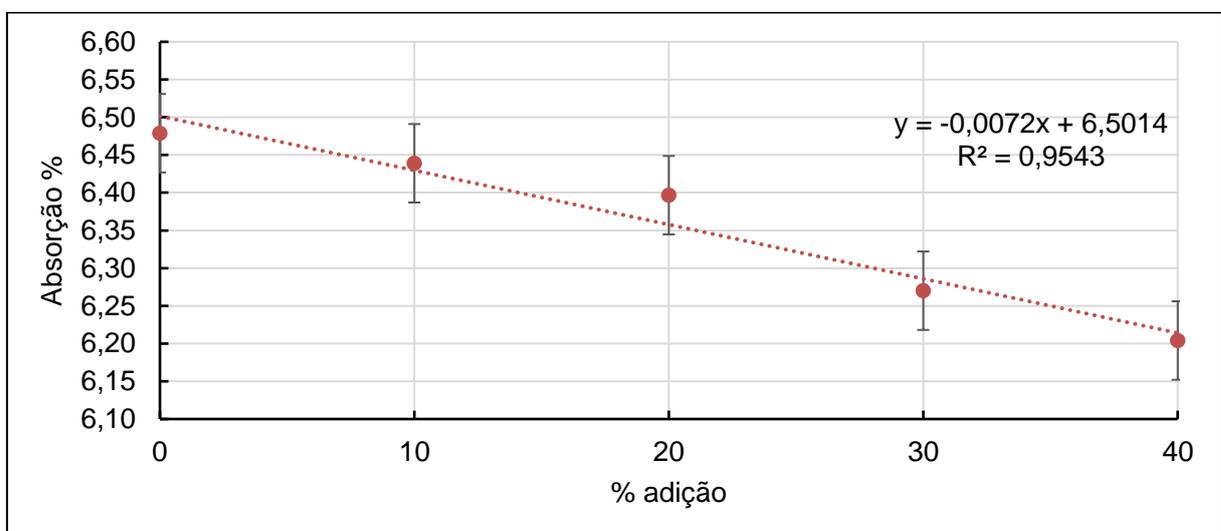
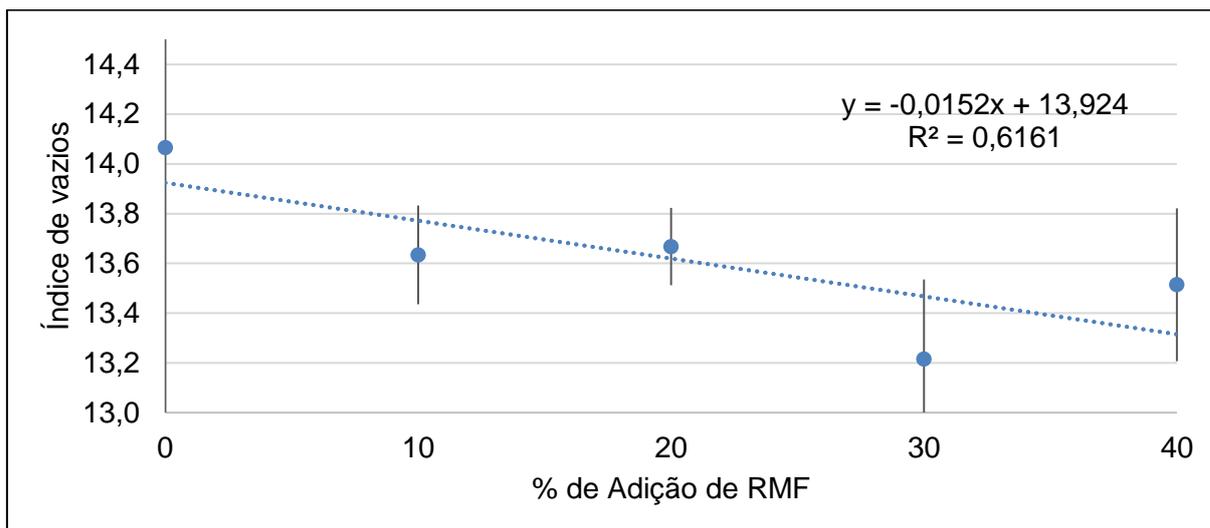


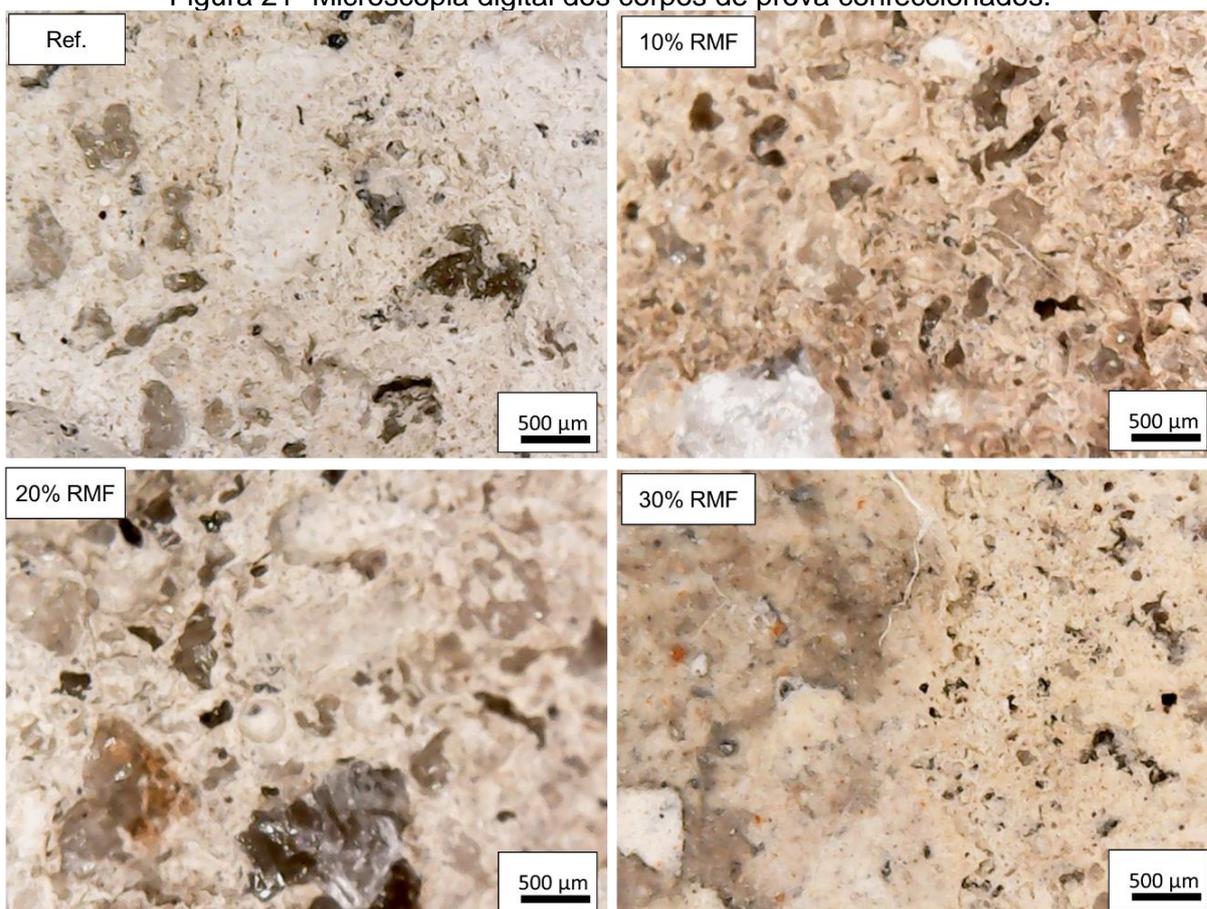
Figura 20- Determinação do índice de vazios das argamassas estruturais.



Observa-se pela Figura 20 que o índice de vazios nas argamassas estruturais, varia de acordo com o percentual de adição de RMF ao traço, sendo que o menor índice de vazios apresentou uma redução de 7% quando comparados os traços de referência e correspondeu ao maior percentual de adição de RMF. Tal ideia corrobora com os resultados obtidos na absorção de água, com redução de 5% da capacidade de absorção (figura 19) e nos ensaios de avaliação das propriedades mecânicas. Desta forma, um percentual mais baixo de absorção e índice de vazios pode apresentar maior indícios de durabilidade de peças de concreto.

A Figura 21, obtida por microscopia digital, trata de imagens dos corpos de prova referência e com RMF, conforme identificações. Observa-se por estas imagens que a medida que o teor de adição de RMF aumenta o tamanho dos poros diminui, sugerindo que houve uma diminuição do índice de vazios, o que corrobora com o resultado apresentado para esta propriedade. Sendo o índice de vazios diretamente proporcional à porosidade do material. Observa-se que o índice de vazios diminui quanto maior a porcentagem presente de RMF. Os resultados apontam que o material fino poderia atuar no fechamento dos poros, porém levanta o questionamento em prejudicar a trabalhabilidade da argamassa e o adensamento das camadas também poderia prejudicado. Em geral, quando se diminui o índice de vazios e, conseqüentemente, a porosidade, a resistência à compressão é aumentada conforme observado (NEVILLE, 1997).

Figura 21- Microscopia digital dos corpos de prova confeccionados.



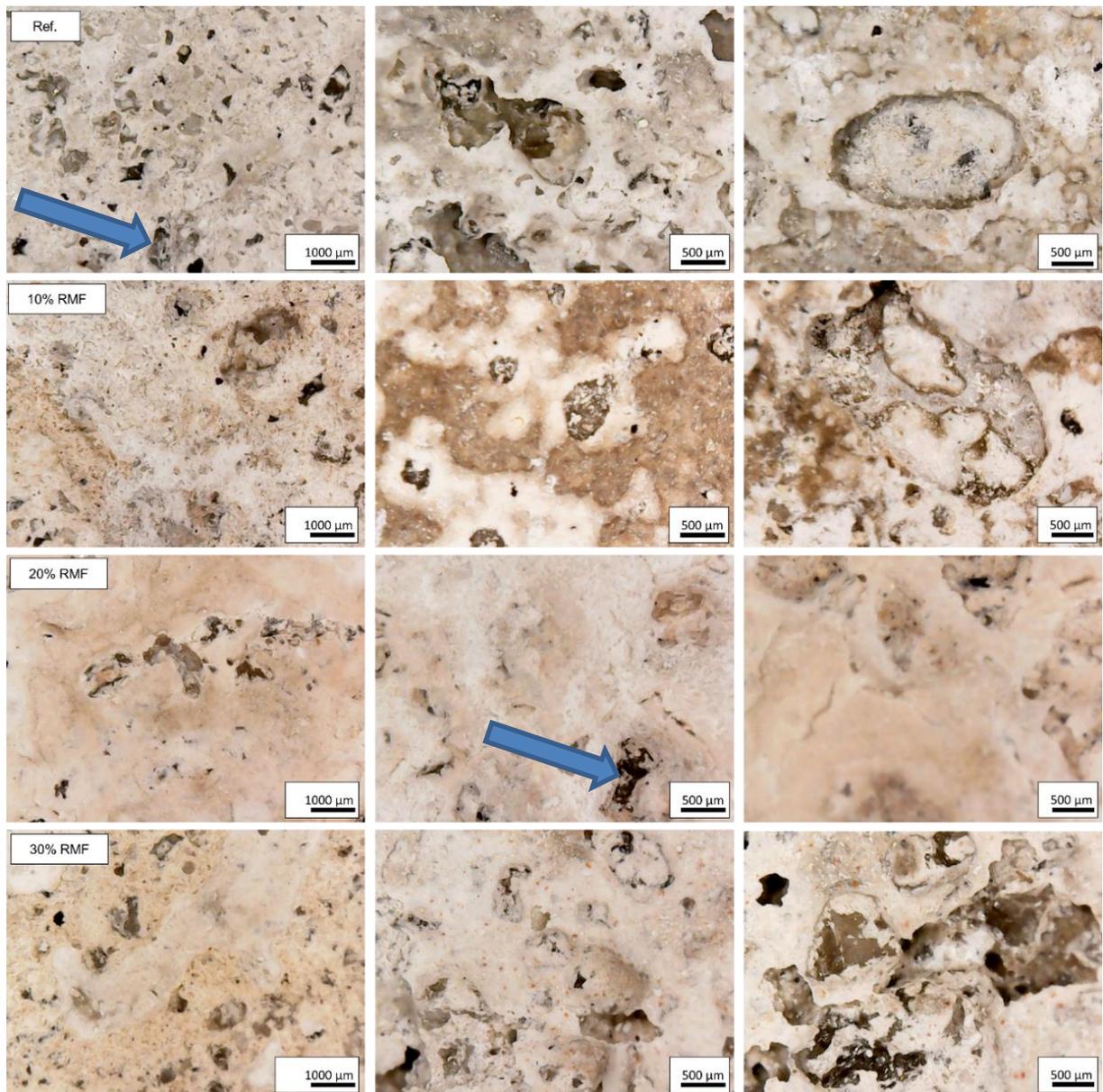
Percebe-se ainda pelos os resultados dos ensaios físicos, que quanto menor o índice de vazios existente na argamassa, menor foi à absorção de água por imersão. O concreto é um material que, devido sua constituição porosa, não é capaz de preencher por si só, a totalidade dos vazios do agregado da pasta de cimento. Com isso, a interconexão entre os vazios no concreto torna-o permeável à água (NEVILLE e BROOKS, 2013). Assim o benefício identificado neste composto com RMF foi a redução desta porosidade e assim da absorção de água e de possíveis agentes agressivos.

#### 4.5.4 Choque térmico.

Para a proposição de ensaio referente a apresentação de indícios de durabilidade do material, observou-se o comportamento dos corpos de prova quando submetidos a variações de temperatura para 10 ciclos de aquecimento e resfriamento.

Durante a operação do ensaio não observou-se presença de fissuras, trincas, visíveis a olho nu, ou quaisquer avarias no material. O mesmo permaneceu intacto até o fim do procedimento. Após a aplicação dos 10 ciclos os corpos de prova foram analisados por microscopia digital (Figura 22), afim de apropriar aumentos e localizar fissuras ou pequenos defeitos que possam ter sido causados pelas variações de temperatura.

Figura 22-Microscopia digital, após ensaio de choque térmico.

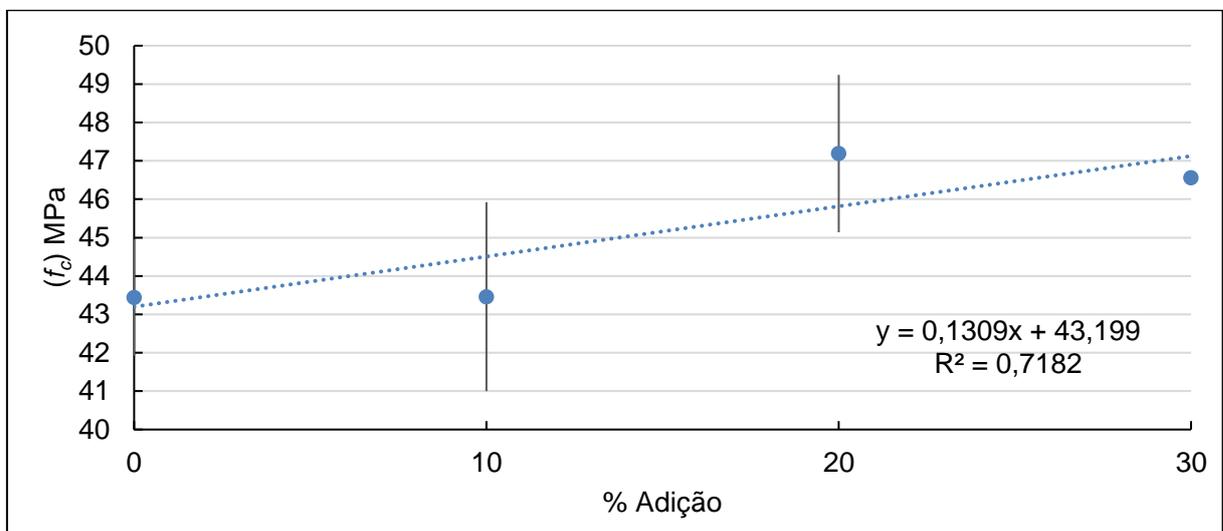


Percebe-se nos traços referência e 20 % de adição de RMF a presença de discretas micro fissuras após os ciclos de variação de temperatura. Neste caso não atribui-se a fissuração como proveniente da adição de RMF e sim a características da

própria argamassa estrutural. Salienta-se que os corpos de prova com 40% de adição não foram testados devido a problemas técnicos durante o ensaio.

Observa-se (Figura 23) que a propriedade de resistência a compressão no estado endurecido possivelmente não foi afetada, uma vez que apresenta o mesmo comportamento de ganho de resistência a medida com o aumento do percentual de RMF adicionado, antes e após o choque térmico. Conforme as análises anteriores observam-se boa dispersão do RMF na microestrutura do material, sendo um fator relevante para a durabilidade das argamassas estruturais confeccionadas com o RMF, aplicadas em estruturas de concreto armado. Com isto, evita-se a diferença de potencial químico (pontos com concentração distinta no RMF), que poderá ocasionar corrente, fenômeno potencializador da manifestação patológica de corrosão de armadura, sendo este um ponto a ser considerado em pesquisas futuras.

Figura 23 - Resistência a compressão ( $f_c$ ) pós ensaio de choque térmico.



Este comportamento se confirma as análises realizadas referente as propriedades das argamassas estruturais, nota-se que a medida que a adição de RMF aumenta, as propriedades mecânicas se mantem ou até mesmo melhoram, a absorção de água diminui assim como o índice de vazios, mais uma vez levando a indícios da ocorrência de efeito filer atribuído a presença do RMF.

## CAPÍTULO V

### 5 CONCLUSÕES

O resíduo de mineração de ferro pesquisado neste trabalho se apresentou na condição natural como areia fina sendo necessário a cominuição através de dois processos: abrasão *Los Angeles* e moinho de bolas, contando o segundo ser mais eficiente para obtenção dos finos necessários para atuar como adição mineral.

Quanto a composição química constatou-se a presença de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - 59,1%,  $\text{SiO}_2$ - 25,6%,  $\text{CaO}$  - 3,85%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 3,13%, baixa quantidade de Fósforo (P) e ainda traços da presença de Manganês (Mn), Tálcio (Ti), Cloro (Cl), Enxofre (S), Magnésio (Mg) e Sódio (Na) na amostra de RMF analisada, sendo convergentes os resultados tanto de fluorescência, quanto de difração de raios-X. Percebe-se a presença predominante de Quartzo -  $\text{SiO}_2$ , Hematita -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Goethita -  $\text{FeO}(\text{OH})$  e Gibbsita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$  não sendo encontrados componentes químicos ou mineralógicos que pudessem comprometer a qualidade dos compósitos cimentícios com possíveis reações deletérias.

Constatou-se que massa específica do RMF ( $4,04 \text{ g/cm}^3$ ) foi superior ( $\approx 30\%$ ) a do cimento ( $\approx 3,10 \text{ g/cm}^3$ ). Teve areia superficial 354% maior, contudo sem demandar mais água de amassamento devido a reduzido teor de poros ( $0,036 \text{ cc/g}$ ), designando ser um material com grande potencialidade de atuar como filler.

No estudo em pastas e argamassas comprovou-se a redução de demanda de água pelo RMF gerando tanto pastas como argamassas muito mais compactas e com menor quantidade de água para atingir a fluidez desejada.

Observa-se na microscopia eletrônica de varredura a presença de poros na faixa de 103 a 203  $\mu\text{m}$  e vários poros na faixa de 0,5 $\mu\text{m}$ . Identificou-se a formação da portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) no interior dos poros maiores nos traços de referência e com adição de RMF e a presença de etringita somente nas amostras sem resíduo, potencializado o aumento da resistência mecânica devido à presença de resíduos de minérios maximizando a nucleação dos poros.

Na adição do RMF as argamassas, percebeu-se no estado fresco, que o aumento do percentual de adição do RMF nas misturas, para adições de até 10% de RMF, a redução no espalhamento da argamassa não sofreu variação superior a 1%.

O efeito da incorporação do RMF só foi mais expressivo a partir de 20% de adição, sendo que tal observação pode estar atribuída ao percentual de finos presentes na argamassa (cimento+resíduo) tornando-a mais ávida por água e reduzindo sua trabalhabilidade. Porém constatou-se que apesar da maior finura do resíduo, não houve maior demanda de água e sim o contrário, exprimindo a baixa porosidade do RMF e a potencialidade de seu uso melhorar as propriedades de durabilidade.

Quanto ao estado endurecido, percebeu-se um bom comportamento mecânico na tração à flexão (manutenção dos valores) e um ótimo resultado na compressão (aumento de 14%). Conforme o nível de adição de RMF constatou-se a influência nas propriedades mecânicas com tendência de crescimento mesmo após os 40% de adição de RMF estudados neste trabalho. Para microconcretos quando utilizado o CPV-ARI, em todos os níveis de adição de RMF pesquisados, observou-se este comportamento, destacado que atenderam às condições mecânicas mínimas para um concreto estrutural e com potencialidade de avaliar teores superiores.

O RMF gerou um pequeno aumento da densidade aparente das argamassas em apenas 3% em relação ao traço de referência, contudo está dentro da faixa de densidade de concretos estruturais. Percebe-se que o microconcreto produzido com adição de RMF, poderia ser aplicado em funcionalidades estruturais e não somente em estruturas apoiadas ao solo, não ocasionando excesso significativo de sobrecarga nas estruturas, uma vez que o maior percentual de adição ocasionou aumento de apenas 3% na densidade aparente, em relação ao traço de referência.

O índice de vazios apresentou uma redução de 7% quando comparados os traços de referência e a absorção de água uma redução de 5% indicando melhores comportamentos quanto a durabilidade. O que foi corroborado pela avaliação de choque térmico no qual as argamassas com RMF se mantiveram íntegras e com manutenção na macroestrutura e das propriedades mecânicas.

Pelos resultados infere-se que percentuais de adição de 30 a 40% seriam mais interessantes quanto as propriedades analisadas, tanto em estado fresco, quanto endurecido e sua adição possibilitaria ganhos de volume na mistura, tornando o produto potencialmente mais econômico para usos na construção civil. Outros teores seriam possíveis mediante o uso de aditivos redutores de água, devido ao maior teor de finos dos compósitos.

Ressalta-se que as condições estudadas para este trabalho são pontuais e necessitam de estudos aprofundados para que sejam generalizadas para resíduos de minério de ferro de outras barragens de diferentes localidades.

### **Sugestões para trabalhos futuros**

Faz-se necessário estudos complementares mais aprofundados de modo a consolidá-lo como material alternativo na produção de argamassas estruturais, principalmente quanto a durabilidade do material. Para qualquer produto aplicado na construção civil, a durabilidade do material influencia decisivamente em sua escolha e seleção, levando-se em consideração o tempo de serviço deste produtos e a quantidade de recursos que serão gastos em manutenção, em consequência, define o seu impacto ambiental e econômico, principalmente no que tange a geração de resíduos sólidos. Sendo assim, sugere-se realizar estudos futuros voltados para estudo aprofundado na durabilidade das argamassas estruturais confeccionadas com RMF, como por exemplo, ensaios de envelhecimento natural e ensaios de envelhecimento acelerado por meio de ciclos de molhagem e secagem, visando simular condições de utilização e avaliar a degradação das argamassas experimentais. Tem-se ainda, que avaliar o comportamento destes compósitos a atmosferas de CO<sub>2</sub>, íons cloretos e sulfatos.

Estudos relacionados a viabilidade econômica deste produto seriam interessantes, principalmente relacionados ao deslocamento na obtenção do resíduo (RMF), características específicas locais, tanto de composição quanto da forma disposição nas barragens de lama, bem como o tempo e técnica de execução das argamassas estruturais pela mão de obra, assim como a viabilidade de uso de equipamentos mecânicos e o rendimento do produto final.

A aplicação da argamassa estrutural com finalidades de superestrutura pode ser avaliada uma vez que este trabalho manifestando que não existe excesso de ganho na densidade do produto final à medida que adiciona-se o RMF.

## CAPÍTULO VI

### 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, **Building Code Requirements for Structural Concrete**, ACI 318 M-05, Farmington Hills, 369p, 1995.

ANDRADE, L. C. R. .**Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. 2014. 112 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

ANKUSH, G., RAJEEV, C. & KOSHTA, M.K. *Influence of Fine Aggregate Particle Size and Fly-ash on the Compressive Strength of Mortar for SCC*. **International Journal of Scientific and Research Publications**, Vol. 4, Is. 1, Jan. 2014

ARISTIMUNHO, P. B.; BERTOCINI, S. R.. *Application of iron ore mud in powder form in portland cement presence*. **Ibracon Structures And Materials Journal**, São Paulo, v. 2, n. 2, p.153-165, 02 abr. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 7181**: Análise Granulométrica — Rio de janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização— Rio de janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação — Rio de janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: NORMAS MERCOSUL. Argamassa de alta resistência mecânica para pisos — Requisitos. ABNT **NBR 11801:2012**.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: NORMAS MERCOSUL, 2003, Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. **NBR NM 248**.

BACARJI, E. et al. *Análise do efeito de adição de diferentes teores de pó de granito nas propriedades mecânicas do microconcreto*. **Revista Eletrônica de Educação da Faculdade Araguaia**, Goiânia, v. 4, n. 11, p.1-14, 24 nov. 2011.

BARBOSA, M. T. G.; SANTOS, W. J.. *ARGAD: High Performance Mortar*. In: Portugal SB 13 - **Portugal Sustainable Building Contribution to Achieve the EU 20-20-20 Targets**, 2013, Guimaraes. Portugal. University of Minho, v. 1. p. 387. 2013.

BARROS, C.J. *Os resíduos sólidos urbanos na cidade de Maringá – Um modelo de gestão*. Departamento de Engenharia Química/UEM, Maringá, PR, Brasil, 2002.

BLEICHER, L.; SASAKI, J. M.. *Introdução à difração de raios-X em cristais*. UFC – Universidade Federal Ceará. Disponível em: <http://www.raiosx.ufc.br/site/wp-content/uploads/downloads/2013/01/apostila.pdf>. Acesso em: 31 maio. 2018

BRASIL. Governo do Brasil. Pnud Brasil. **Setor mineral representa 4% do PIB brasileiro -Governo do Brasil**. 2018. Disponível em: <[www.brasil.gov.br](http://www.brasil.gov.br)>. Acesso em: 16 maio 2018.

BRASIL. Governo do Brasil. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Licenciamento barragem B4**. 2018. Disponível em: <http://www.meioambiente.mg.gov.br>. Acesso em: 16 maio 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. . **Beneficiamento de Minérios**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 16 maio 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DO TRABALHO. Segurança e saúde ocupacional na mineração. Disponível em: < <http://trabalho.gov.br>>. Acesso em: 16 maio 2018.

BRASIL. Lei n. 12.305/10, de 02 de ago. de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, p. 1-8, ago. 2010. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

BRISOLA, D. F.. **Otimização no preparo de amostra para análise em espectrofotômetro de fluorescência de raio X**. Disponível em: <http://www.ufjf.br/baccan/files/2012/11/Quarteamento.pdf> Acesso em: 29 maio. 2018.

CAMPANHA, A. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação**. Dissertação de mestrado, UFV, Viçosa, MG, 86 p,2011.

CASTRO, A. L. de; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C.. *Desempenho de concretos avançados para a construção civil, formulados a partir do método de dosagem computacional*. **Cerâmica**, São Paulo , v. 55, n. 335, p. 233-251, Sept. 2009.

CASTRO P. T. A.; NALINI J. H. A.; LIMA H. M. 2011. Entendendo a Mineração no Quadrilátero Ferrífero. **Ecológico**, Belo Horizonte, 2011. 93p

CARDOSO, D. N. P. . **Influência do teor de cinza volante na reologia de argamassa de assentamento: fabricado com reciclagem de resíduos**. 2014. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2014. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

CARRASCO, E.V.M., MAGALHAES, M.D.C., SANTOS, W.J.D., ALVES, R.C. & MANTILLA, J.N.R. (2017). *Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests*. **Journal construction and building materials**, 131: 31–38.

CHEEMA, T.S., KLINGNER, R.E., “*Compressive strength of concrete masonry prism*”, **American Concrete Institute Journal**, v.83, n. 1, pp. 88-97, May 1986.

COSTA, A. V.. **Concreto com rejeito de sinter feed: Estudo comparativo de desempenho e caracterização microestrutural**. 280 f. Tese Doutorado - UFMG Escola de Engenharia de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

D'AGOSTINO, L. F. (2008). **Praias de Barragens de Rejeitos de Mineração: Características e Análise da Sedimentação**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, USP, São Paulo. 374p.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gérias em relação ao potencial de risco**. Dissertação de mestrado.UFMG: Belo Horizonte. 2008.

**DRYSDALE, R.G., HAMID A.A.**, “*Behavior of concrete block masonry under axial compression*”, **American Concrete Institute Journal**, v. 76, n. 6, pp. 707-721, February 1979.

FARIAS C. E. G - **Relatório Preparado para o CGEE PNUD** – Contrato 2002/001604, Ufop, 2002.

FAZZAN, J. V. **Avaliação da reatividade da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em concretos por meio do fator k de eficácia cimentante**. 2017. 113 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Ciência dos Materiais, Unesp, Ilha Solteira, 2017.

FLORINDO, Renata Nobrega. **Estudo da reação álcali-sílica em concretos através de ressonância magnética nuclear de alta resolução**. 2009. Dissertação (Mestrado em Física Básica) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

FONTES, W. C. *et al.* **Análise de valor de ladrilhos hidráulicos sustentáveis com enfoque na emoção**. Congresso Internacional VII Workshop, 2016, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Anhembi Morumbi, 2016. p. 1 - 14.

FONTES, W. C. *et al.* **Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams**. **Construction And Building Materials**, Elsevier, v. 112, p.988-995, 01 jun. 2016.

FONTES, W. C. **Utilização do rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

CARDOSO, B. H.; CANAZARO, C. C.; MANCIO, M. **Durabilidade e sustentabilidade das estruturas: desafios e oportunidades**. **Resíduos Sólidos e Mudanças Climáticas**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p.15-25, mar. 2016.

Das S.K.; Kumar, S. P. Ramachandrarao, *Exploitation of iron ore tailing for the development of ceramic tiles*, **Waste Manage.** 20 (2000) 725-729.

Governo do estado de Minas Gerais. Fundação estadual do Meio Ambiente. Inventário de barragem do Estado de Minas Gerais, 2017. ACESSADO EM 28/11/17 as 14:30 h.

GERMANY D. J. *A mineração no Brasil*. **Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Ciência, Tecnologia e Inovação**, Rio de Janeiro, maio, 2001.

GRECA, J. M.; et al.; **Inspeção, mapeamento e análise de manifestações patológicas em obras de arte especiais**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

GOMES, M. A. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

H. S. ABDULRAHMAN- *Potential use of iron ore tailings in sandcrete block making*, **Department of Civil Engineering, Federal University of Technology Minna** 2015;

HELENE, P.; PACHECO, J.; *Controle da Resistência do Concreto*. Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción – **ALCONPAT** Int., Mérida – México, 2013.

HWANG; HWAN E.; SOO K. Y.. *Comparison of mechanical and physical properties of SBR-polymer modified mortars using recycled waste materials*. **Journal of Industrial e Engenharia Química**. v. 14, pp. 644-650, Set. 2008.

INPI. Instituto Nacional da Propriedade Industrial. **Processo de separação do minério de ferro contido em resíduos provenientes da extração e beneficiamento do minério de ferro**. Pedido de patente BR 10 2012 008758 8, 2012.

**INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO- IBRAM** – Disponível em <http://ibram.org.br/sites/1300/1382/00005733.pdf>- acessado em 28/11/17 ,ACESSADO EM 28/11/17 as 14:30 h.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Informações e análises da economia mineral brasileira**. 7ª Edição. 2012.

INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 4ª conferência anual ICTR. São Paulo, SP. **Anais**, São Paulo, ICTR, 2007.

KHALAF, A., HENDRY, W., FAIRBAIN, D.R., “*Mechanical properties of material used in concrete blockwork construction*”, **Magazine of Concrete Research**, v. 44, March 1994.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F.. Tratamento de Minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: Cetem, 2010. 963 p

LANGAN, B.W.; WENG, K.; WARD, M.A. *Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland Cement*. **Cement and Concrete Research**, v. 32, 2002.

LANGSTON; CRAIG; WONG, FRANCIS K.W.; HUI, EDDIEI C.M. & SHEN, LI-YN. *Strategic assessment of building adaptive reuse opportunities in Hong Kong*. **Building and Environment**. V. 43, ed10, pp 1709-1718, Outubro -2008.

LEE, S. T.; MOON, H. Y.; SWAMY, R. N.; KIM, S. S. E KIM, J. P.. *Sulfate attack of Mortars Containing Recycled Fine aggregate*. **ACI Materials Journal**, pp. 242-230, Jun.-Ago 2005.

McNARY, S.W., **Basic properties of clay-unit masonry in compression**, M.Sc Thesis, University of Colorado, Boulder, CO, Estados Unidos, 1984.

MEDEIROS, A.H.F, ANDRADE, J.J.O. HELENE, P. *Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto*. In: Isaia, G.C.(Org.) 1. ed. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: **IBRACON**, 2011, v.1, p.887-902.

MENG L., LU P., LI S., ZHAO, J., LI, T. Shape and size effects on the packing density of binary spherocylinders. **Powder Technology**. v.228, p.284-294, 2012.

Metal Bulletin: [www.mbioi.com](http://www.mbioi.com)- acessado em 15/04/18.

BARRETO M. L. . *Mineração e desenvolvimento sustentável: Desafios para o Brasil*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 215p, 2001.

MOHAMAD, G. **Mecanismos de ruptura da alvenaria de blocos à compressão**. 2007. 290 f. Tese (Doutorado), Universidade do Minho, Portugal, 2007.

MOTA, S. *Introdução à Engenharia Ambiental*. 4a ed, Rio de Janeiro: ABES, 2006.

MOTA, J. M. F.; OLIVEIRA, R. A.. *Modelo de reforço com argamassa armada com adição de pozolana para alvenaria resistente*. **Anais** do 5º Congresso Brasileiro do Concreto, pg. 1-10. 29/10 a 01/11 de 2013.

NAHUM, K. A. R. ; OLIVEIRA, D. R. C.. *Monitoramento de pilares em edifícios altos de concreto armado*. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.*[online]. 2010, vol.3, n.2, pp.179-194. ISSN 1983-4195.

NEVES, Paulo César Pereira das; SCHENATO, Flávia; BACHI, Flávio Antônio.. **Introdução à mineralogia prática**. . ULBRA. 2008

NEVILLE, A. M., Tradução GIAMMUSSO S. E. *Propriedades do Concreto*. São Paulo: PINI, 1997.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do concreto*. Tradução Ruy Alberto Cremonini. 2ª Ed. Porto Alegre, Bookman. 2013.

PIRES, J.M.M. et al. *Potencial poluidor de resíduo sólido da Samarco Mineração: estudo de caso da barragem de Germano*. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 393-397, 2003.

RAMOS, R. C.. **Avaliação de propriedades mecânicas das argamassas confeccionadas com resíduo proveniente do beneficiamento do minério de ferro**. 2017. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia da Mobilidade, Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira, Itabira, 2017.

REIS, A. P. A. . **Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho**. 1998. 239 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998

RIBEIRO, N. P. **Alvenarias e argamassas: restauração e conservação**. Rio de Janeiro: In-Fólio, 2009.

SANT'ANA FILHO., J. N... **Estudos de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para uso na pavimentação de rodovias e fabricação de blocos intertravados**. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais Cefet-mg, Cefet-mg, Belo Horizonte, 2013.

SANTOS, M. L. L. O.. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil**. Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, 2008.

SHRIVASTAVA, A. ; JOSHI, Dr. Y.p.; NAGAYACH, Sachin. Concrete Using Red-Mud and Iron-Ore Slickens. **International Journal For Scientific Research And Development - Ijsrd Journal**, Gujarat, India, v. 3, n. 4, p.1856-1858, mar. 2016.

Sujing Zhao, Junjiang Fan and Wei Sun, “**Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high Performance concrete**”, *Construction and Building Materials*, pp. 540–548, 2010.

KADRI, E. H. ; DUVAL, R.. *Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars*. **ACI Materials Journal**, pp. 138-142, Mar.-Abr., 2002.

PASQUALI, I. **Influência do tipo de argamassamento na resistência à compressão de pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica**. 2007. 140 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil e Preservação Ambiental), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

PEIXOTO, R. A. F.; ANDRADE, L. C. R.; MARQUES, E. A. G.. Perspectivas para o reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro como materiais de construção. **Geografias**, Belo Horizonte, v. 12, n. 1, p.32-44, 30 jun. 2016.

PENG Y., HU S., DING Q. *Dense Packing Properties of Mineral Admixtures in Cementitious Material*. **Particuology Science and Technology of Particles**. n.7, p.399-402, 2009.

**POGGIALI, F. S. J. Desempenho de microconcretos fabricados com cimento Portland com adições de cinza de bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

SANT’ANA FILHO, J. *et al. Technical and Environmental Feasibility of Interlockin Concrete Pavers with Iron Ore Tailings from Tailings Dams*. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 1-7, jan. 2017.

SANTOS, W. J. **Argamassa de alto desempenho**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, MG, 2011.

SILVA, J. P. S. *Impactos ambientais causados por mineração*. **Caderno meio ambiente e sustentabilidade**. V.11 n.6. 2017.

SOUZA, C.C.; VIEIRA, C.M.F.; MONTEIRO, S.N.; *Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com rejeito de minério de ferro*. **Revista Matéria**, v. 13, n. 1, pp. 194 – 202, 2008.

T.I. Ugama, S.P. Ejeh, *Iron ore tailing as fine aggregate in mortar used for masonry*, . **International Journal of Advances in Engineering & Technology**, Sept., 2014 7 (4) (2014) 1170–1178.

TRIGO, A. P. M. **Estudo da dopagem de agregados para finalidade de uso em concretos estruturais**. Universidade de São Paulo (Tese de Doutorado), São Carlos, 2012.

UEDA, T.; TAKEWAKA, K. *Performance-based Standard Specifications for Maintenance and Repair of Concrete Structures in Japan*. **Structural Engineering International**, v. 4, p. 359-366, 2007.

ULLAS S.N.; VENKATARAMA, R.B.V. *Iron ore tailings as substitute for sand in masonry mortar*. **Proceedings of the International Seminar on Waste to Wealth**. pp151–155, 2010.

VALEINVESTIDORS [tp://www.vale.com/brasil/PT/investors/Paginas/default.aspx](http://www.vale.com/brasil/PT/investors/Paginas/default.aspx), acessado em 10/09/2016 as 14:30h de 10/04/2018.

VALE. Relatórios anuais 2017. Disponível em <http://www.vale.com/brasil/PT/investors/information-market/annual-reports>, acessado 14/04/18 as 14:00 h.

VAN GEEN, A.; ROBERTSON, A. P.; LECKIE, J. O. *Completion of carbonate species at the goethite surface: implications for adsorption of metal ions in natural waters*. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 58, n. 9, p. 2073- 2086, 1994.

VERMELTFOORT, A.T., **Brick-mortar interaction in masonry under pressure**, Ph.D. Thesis, Technical. University of Eindhoven, Eindhoven, NL-NB, Nederland, 2004.

VIEIRA, G. L.; MOLIN, D. C. D.. Avaliação da resistência à compressão, resistência à tração e formação de microfissuras em concretos produzidos com diferentes tipos de cimentos, quando aplicado um pré-carregamento de compressão. **Ambiente Construído.** , Porto Alegre , v. 11, n. 1, p. 25-40, Mar. 2011 .

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

ZUCCHERATTE, A. C. V. ; FREIRE, C. B.; LAMEIRAS, F. S. . *Synthetic gravel for concrete obtained from sandy iron ore tailing and recycled polyethyltherephtalate.* **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 151, p.859-865, out. 2017.

WAGNER, A. et. al. A eleição presidencial e a mineração. *Gazeta Mercantil* 20 de setembro de 2002. p.A3.

WOLFF, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da VALE.** Ouro Preto: Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. 107 p. 2009.

## ANEXO I

## Análise da área superficial do RMF

**Ficha técnica 01- Ensaio método B.E.T- análise de área superficial do RMF**

Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction

for NOVA instruments

©1994-2012, Quantachrome Instruments

version 11.02

Analysis

Report

Operator: CEFET Date:2018/01/31 Operator: CEFET Date:2018/02/01

Sample ID: Sarzedo-Nara Filename: sttn\_A\_20180131\_1.qps

Sample Desc: Sarzedo-Nara/passante #200Comment:

Sample weight: 0.252 g Sample Volume: 1 cc

Outgas Time: 24.0 hrs OutgasTemp: 120.0 C

Analysis gas: Nitrogen Bath Temp: 273.0 K

Press. Tolerance:0.100/0.100 (ads/des)Equil time: 60/60 sec (ads/des) Equil timeout: 240/240 sec (ads/des)

Analysis Time: 257.7 min End of run: 2018/01/31 18:01:32 Instrument: Nova Station A

Cell ID: 1

Data Reduction Parameters

DFT method Calc. Model: N2 at 77 K on carbon (slit pore, NLDFT equilibrium model)

Rel. press. range: 0.0000 - 1.0000

Moving pt. avg: off

Adsorbate Nitrogen Temperature 77.350K

Molec. Wt.: 28.013 Cross Section: 16.200 Å<sup>2</sup> Liquid Density: 0.808 g/cc

Half pore width Å	Cumulative Pore Volume cc/g	Cumulative Surface Area m <sup>2</sup> /g	dV(r) m <sup>2</sup> /Å/g	dS(r)
8.4397	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
8.8282	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
9.2345	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
9.6595	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
10.1041	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
10.5692	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
11.0557	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
11.5646	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
12.0969	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
12.6537	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
13.2361	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
13.8453	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
14.4826	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
15.1492	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
15.8465	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
16.5758	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
17.3388	5.2500e-06	3.0279e-03	6.8812e-06	3.9687e-03

18.1369	1.1186e-04	6.1808e-02	1.3358e-04	7.3653e-02
18.9717	2.0420e-04	1.1048e-01	1.1061e-04	5.8303e-02
19.8449	2.4452e-04	1.3080e-01	4.6177e-05	2.3269e-02
20.7583	3.1337e-04	1.6396e-01	7.5372e-05	3.6309e-02
21.7138	4.4147e-04	2.2296e-01	1.3408e-04	6.1748e-02
22.7132	6.3862e-04	3.0976e-01	1.9726e-04	8.6849e-02
23.7586	8.7135e-04	4.0772e-01	2.2262e-04	9.3699e-02
24.8522	1.1322e-03	5.1266e-01	2.3849e-04	9.5963e-02
25.9961	1.4161e-03	6.2187e-01	2.4819e-04	9.5472e-02
27.1926	1.7070e-03	7.2886e-01	2.4315e-04	8.9418e-02
28.4443	1.9933e-03	8.2952e-01	2.2874e-04	8.0419e-02
29.7535	2.2308e-03	9.0934e-01	1.8141e-04	6.0972e-02
31.1230	2.4659e-03	9.8487e-01	1.7164e-04	5.5150e-02
32.5555	2.5526e-03	1.0115e+00	6.0556e-05	1.8601e-02
34.0540	2.7249e-03	1.0621e+00	1.1497e-04	3.3762e-02
35.6214	3.0267e-03	1.1468e+00	1.9256e-04	5.4056e-02
37.2610	3.4572e-03	1.2624e+00	2.6253e-04	7.0457e-02
38.9760	3.9436e-03	1.3872e+00	2.8362e-04	7.2768e-02
40.7700	4.3902e-03	1.4967e+00	2.4894e-04	6.1059e-02
42.6465	4.8467e-03	1.6038e+00	2.4330e-04	5.7051e-02
44.6095	5.3065e-03	1.7068e+00	2.3422e-04	5.2506e-02
46.6628	5.7667e-03	1.8054e+00	2.2411e-04	4.8027e-02
48.8105	6.2495e-03	1.9043e+00	2.2479e-04	4.6055e-02
51.0572	6.8061e-03	2.0134e+00	2.4775e-04	4.8524e-02
53.4072	7.3724e-03	2.1194e+00	2.4097e-04	4.5119e-02
55.8655	7.8083e-03	2.1974e+00	1.7736e-04	3.1748e-02
58.4368	8.2646e-03	2.2755e+00	1.7743e-04	3.0363e-02
61.1265	8.8751e-03	2.3754e+00	2.2698e-04	3.7133e-02
63.9401	9.6781e-03	2.5010e+00	2.8540e-04	4.4635e-02
66.8831	1.0503e-02	2.6242e+00	2.8015e-04	4.1887e-02
69.9616	1.1306e-02	2.7390e+00	2.6088e-04	3.7289e-02
73.1818	1.1894e-02	2.8194e+00	1.8255e-04	2.4945e-02
76.5502	1.2411e-02	2.8870e+00	1.5368e-04	2.0076e-02
80.0736	1.3190e-02	2.9843e+00	2.2107e-04	2.7608e-02
83.7592	1.4243e-02	3.1100e+00	2.8571e-04	3.4111e-02
87.6145	1.5301e-02	3.2307e+00	2.7442e-04	3.1321e-02
91.6472	1.6329e-02	3.3429e+00	2.5482e-04	2.7804e-02
95.8655	1.7305e-02	3.4447e+00	2.3136e-04	2.4134e-02
100.2780	1.8221e-02	3.5360e+00	2.0762e-04	2.0704e-02
104.8936	1.9002e-02	3.6105e+00	1.6932e-04	1.6142e-02
109.7216	1.9774e-02	3.6809e+00	1.5986e-04	1.4569e-02
114.7718	2.0552e-02	3.7486e+00	1.5398e-04	1.3416e-02
120.0545	2.1387e-02	3.8182e+00	1.5810e-04	1.3169e-02
125.5804	2.2829e-02	3.9330e+00	2.6092e-04	2.0777e-02
131.3606	2.4098e-02	4.0296e+00	2.1956e-04	1.6714e-02
137.4068	2.5924e-02	4.1625e+00	3.0200e-04	2.1978e-02
143.7314	2.8329e-02	4.3299e+00	3.8035e-04	2.6462e-02
150.3470	3.0125e-02	4.4493e+00	2.7148e-04	1.8057e-02
157.2672	3.1350e-02	4.5272e+00	1.7692e-04	1.1250e-02
164.5059	3.2549e-02	4.6001e+00	1.6576e-04	1.0076e-02
172.0777	3.3767e-02	4.6709e+00	1.6080e-04	9.3448e-03
179.9981	3.6044e-02	4.7974e+00	2.8747e-04	1.5970e-02

## DFT method summary

Pore volume = 0.036 cc/g  
 Surface area = 4.797 m<sup>2</sup>/g  
 Lower confidence limit = 8.440 Å  
 Fitting error = 1.993 %  
 Half pore width (Mode) = 143.731 Å  
 Moving point average : off



for NOVA instruments  
 ©1994-2012, Quantachrome Instruments  
 version 11.02

Analysis Report  
 Operator: CEFET Date:2018/01/31 Operator: CEFET Date:2018/02/01  
 Sample ID: Sarzedo-Nara Filename: sttn\_A\_20180131\_1.qps  
 Sample Desc: Sarzedo-Nara/passante #200Comment:  
 Sample weight: 0.252 g Sample Volume: 1 cc  
 Outgas Time: 24.0 hrs OutgasTemp: 120.0 C  
 Analysis gas: Nitrogen Bath Temp: 273.0 K  
 Press. Tolerance:0.100/0.100 (ads/des)Equil time: 60/60 sec (ads/des) Equil timeout: 240/240 sec (ads/des)  
 Analysis Time: 257.7 min End of run: 2018/01/31 18:01:32 Instrument: Nova Station A  
 Cell ID: 1

#### Data Reduction Parameters

DFT method Calc. Model: N2 at 77 K on carbon (slit pore, NLDFT equilibrium model)

Rel. press. range: 0.0000 - 1.0000 Moving pt. avg: off  
 Adsorbate Nitrogen Temperature 77.350K  
 Molec. Wt.: 28.013 Cross Section: 16.200 Å<sup>2</sup> Liquid Density: 0.808 g/cc

Half pore width Å	Cumulative Pore Volume cc/g	Cumulative Surface Area m <sup>2</sup> /g	dV(r) m <sup>2</sup> /Å/g	dS(r)
8.4397	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
8.8282	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
9.2345	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
9.6595	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
10.1041	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
10.5692	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
11.0557	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
11.5646	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
12.0969	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
12.6537	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
13.2361	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
13.8453	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
14.4826	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
15.1492	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
15.8465	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
16.5758	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
17.3388	5.2500e-06	3.0279e-03	6.8812e-06	3.9687e-03
18.1369	1.1186e-04	6.1808e-02	1.3358e-04	7.3653e-02
18.9717	2.0420e-04	1.1048e-01	1.1061e-04	5.8303e-02
19.8449	2.4452e-04	1.3080e-01	4.6177e-05	2.3269e-02
20.7583	3.1337e-04	1.6396e-01	7.5372e-05	3.6309e-02
21.7138	4.4147e-04	2.2296e-01	1.3408e-04	6.1748e-02
22.7132	6.3862e-04	3.0976e-01	1.9726e-04	8.6849e-02
23.7586	8.7135e-04	4.0772e-01	2.2262e-04	9.3699e-02
24.8522	1.1322e-03	5.1266e-01	2.3849e-04	9.5963e-02
25.9961	1.4161e-03	6.2187e-01	2.4819e-04	9.5472e-02
27.1926	1.7070e-03	7.2886e-01	2.4315e-04	8.9418e-02
28.4443	1.9933e-03	8.2952e-01	2.2874e-04	8.0419e-02
29.7535	2.2308e-03	9.0934e-01	1.8141e-04	6.0972e-02
31.1230	2.4659e-03	9.8487e-01	1.7164e-04	5.5150e-02
32.5555	2.5526e-03	1.0115e+00	6.0556e-05	1.8601e-02
34.0540	2.7249e-03	1.0621e+00	1.1497e-04	3.3762e-02
35.6214	3.0267e-03	1.1468e+00	1.9256e-04	5.4056e-02
37.2610	3.4572e-03	1.2624e+00	2.6253e-04	7.0457e-02
38.9760	3.9436e-03	1.3872e+00	2.8362e-04	7.2768e-02

40.7700	4.3902e-03	1.4967e+00	2.4894e-04	6.1059e-02
42.6465	4.8467e-03	1.6038e+00	2.4330e-04	5.7051e-02
44.6095	5.3065e-03	1.7068e+00	2.3422e-04	5.2506e-02
46.6628	5.7667e-03	1.8054e+00	2.2411e-04	4.8027e-02
48.8105	6.2495e-03	1.9043e+00	2.2479e-04	4.6055e-02
51.0572	6.8061e-03	2.0134e+00	2.4775e-04	4.8524e-02
53.4072	7.3724e-03	2.1194e+00	2.4097e-04	4.5119e-02
55.8655	7.8083e-03	2.1974e+00	1.7736e-04	3.1748e-02
58.4368	8.2646e-03	2.2755e+00	1.7743e-04	3.0363e-02
61.1265	8.8751e-03	2.3754e+00	2.2698e-04	3.7133e-02
63.9401	9.6781e-03	2.5010e+00	2.8540e-04	4.4635e-02
66.8831	1.0503e-02	2.6242e+00	2.8015e-04	4.1887e-02
69.9616	1.1306e-02	2.7390e+00	2.6088e-04	3.7289e-02
73.1818	1.1894e-02	2.8194e+00	1.8255e-04	2.4945e-02
76.5502	1.2411e-02	2.8870e+00	1.5368e-04	2.0076e-02
80.0736	1.3190e-02	2.9843e+00	2.2107e-04	2.7608e-02
83.7592	1.4243e-02	3.1100e+00	2.8571e-04	3.4111e-02
87.6145	1.5301e-02	3.2307e+00	2.7442e-04	3.1321e-02
91.6472	1.6329e-02	3.3429e+00	2.5482e-04	2.7804e-02
95.8655	1.7305e-02	3.4447e+00	2.3136e-04	2.4134e-02
100.2780	1.8221e-02	3.5360e+00	2.0762e-04	2.0704e-02
104.8936	1.9002e-02	3.6105e+00	1.6932e-04	1.6142e-02
109.7216	1.9774e-02	3.6809e+00	1.5986e-04	1.4569e-02
114.7718	2.0552e-02	3.7486e+00	1.5398e-04	1.3416e-02
120.0545	2.1387e-02	3.8182e+00	1.5810e-04	1.3169e-02
125.5804	2.2829e-02	3.9330e+00	2.6092e-04	2.0777e-02
131.3606	2.4098e-02	4.0296e+00	2.1956e-04	1.6714e-02
137.4068	2.5924e-02	4.1625e+00	3.0200e-04	2.1978e-02
143.7314	2.8329e-02	4.3299e+00	3.8035e-04	2.6462e-02
150.3470	3.0125e-02	4.4493e+00	2.7148e-04	1.8057e-02
157.2672	3.1350e-02	4.5272e+00	1.7692e-04	1.1250e-02
164.5059	3.2549e-02	4.6001e+00	1.6576e-04	1.0076e-02
172.0777	3.3767e-02	4.6709e+00	1.6080e-04	9.3448e-03
179.9981	3.6044e-02	4.7974e+00	2.8747e-04	1.5970e-02

## DFT method summary

Pore volume = 0.036 cc/g  
 Surface area = 4.797 m<sup>2</sup>/g  
 Lower confidence limit = 8.440 Å  
 Fitting error = 1.993 %  
 Half pore width (Mode) = 143.731 Å  
 Moving point average : off



Resultado do ensaio de Análise Fluorescencia Raixo -X



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

CERTIFICADO DE ANÁLISES

GQ1703333

Análises Método Unidade Limite Detecção	FeO	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	TiO2	P2O5	Na2O
	CLA70C	XRF79C	XRF79C						
	% 0,14	% 0,10	% 0,10	% 0,01	% 0,01	% 0,10	% 0,01	% 0,010	% 0,10
Resíduo de marmoraria - 1S	2,79	53,4	11,9	4,28	10,0	3,58	0,83	0,372	2,35
Resíduo de marmoraria - 2S	1,67	42,8	8,07	2,63	19,0	3,89	0,69	0,326	1,85
Resíduo de marmoraria - 3S	2,11	42,9	9,71	3,80	16,1	5,44	0,88	0,454	2,00
Resíduo de marmoraria - 1C	2,43	46,0	10,7	3,95	15,2	4,44	0,75	0,351	2,04
Resíduo de marmoraria - 2C	1,63	48,3	9,45	2,73	15,7	3,44	0,53	0,249	1,96
Resíduo de marmoraria - 3C	2,63	58,0	12,9	4,03	7,73	2,64	0,78	0,343	2,68
Resíduo de ardósia VIN	4,83	63,0	15,6	6,81	1,63	3,00	0,78	0,168	1,95
Resíduo de ardósia FILIPE	<0,14	60,1	16,2	7,09	1,73	3,24	0,79	0,164	1,88
Resíduo de minério de ferro Nara	0,49	25,6	3,13	59,1	3,85	0,23	0,14	0,159	<0,1
Resíduo de Concreto GROSSO	1,10	55,1	2,55	1,76	21,5	0,29	0,08	0,081	<0,1
Resíduo de ardósia natural - FILIPE	5,17	60,5	16,2	7,09	1,73	3,24	0,79	0,164	1,88
Res. de ardósia calcinada -100°C-FILIPE	<0,14	63,2	16,9	7,41	1,80	3,39	0,82	0,168	1,95
Filtro - Teresa	<0,14	94,0	2,71	1,32	0,02	<0,1	0,18	<0,01	<0,1
Cinza de casaca de arroz - Teresa	INF	93,3	0,15	0,06	0,90	0,30	<0,01	0,372	<0,1
Cimento CPV-ARI	0,16	20,0	4,62	2,76	60,1	1,69	0,23	0,225	0,22
* REP Resíduo de marmoraria - 1S	2,74								
* STD SARM3	1,17								
* REP Resíduo de marmoraria - 1S		52,9	11,7	4,22	9,82	3,49	0,80	0,367	2,30
* STD AMS0211		24,6	1,36	1,04	24,7	14,6	0,05	0,080	<0,1

Análises	K2O	MnO	LOI
	XRF79C	XRF79C	PHY01E
	%	%	%
Método			
Unidade			
Limite Detecção	0,01	0,01	-45,00
Resíduo de marmoraria - 1S	3,42	0,06	9,05
Resíduo de marmoraria - 2S	2,59	0,04	17,40
Resíduo de marmoraria - 3S	3,14	0,05	15,22
Resíduo de marmoraria - 1C	2,90	0,06	13,97
Resíduo de marmoraria - 2C	3,22	0,04	14,17
Resíduo de marmoraria - 3C	4,24	0,06	5,96
Resíduo de ardósia VIN	3,68	0,11	4,18
Minério 1	0,08	0,44	7,20
Resíduo de minério de ferro Nara	0,38	0,23	6,12
Resíduo de Concreteira FINO	0,49	0,06	24,64
Resíduo de Concreteira GROSSO	0,54	0,03	16,25
Resíduo de ardósia natural - FILIPE	3,78	0,11	4,49
Res. de ardósia calcinada -100°C-FILIPE	4,01	0,12	0,38
Filto - Teresa	0,73	<0,01	0,49
Cinza da casaca de arroz - Teresa	1,49	0,30	3,04
Cimento CPV-ARI	0,95	0,16	5,24
* REP Cinza da casaca de arroz - Teresa			2,92
* STD SG_079			7,13
* REP Resíduo de marmoraria - 1S	3,36	0,06	
* STD AMIS0211	0,36	0,07	