



Danielle de Cássia Santos de Viveiros

**REJEITO DO MINÉRIO DE MANGANÊS COMO  
MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Dissertação Orientada pelo Professor Marcelo de Souza  
Picanço

Belém – Pará – Brasil

2017

Universidade Federal do Pará  
Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



**Danielle de Cássia Santos de Viveiros**

**Rejeito do minério de manganês como material de construção civil.**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Marcelo de Souza Picanço

Belém

Junho de 2017

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Danielle de Cássia Santos de Viveiros.

TÍTULO: Rejeito do minério de manganês como material de construção civil.

GRAU: Mestre

ANO: 2017

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

### **Danielle de Cássia Santos de Viveiros.**

Av. Augusto Correa, nº1, Campus Universitário do  
Guamá, Laboratório de Engenharia Civil, Belém,  
Pará. CEP 66075-970

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Biblioteca Central / UFPA, Belém – PA

---

### **Viveiros, Danielle de Cássia Santos de.**

Rejeito do minério de manganês como material de construção civil.

Orientador: Marcelo de Souza Picanço.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de  
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2017.

1. Rejeito de Manganês. 2. Resíduos de minas. 3. Argamassa. 4. Concreto.

CDD - XX. ed. XXX.XXXXX

---

Universidade Federal do Pará  
Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



**Danielle de Cássia Santos de Viveiros**

**Rejeito do minério de manganês como material de construção civil.**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPA. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço**

Orientador

Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

**Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macedo**

Examinador Interno

Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

**Prof. Dra. Andrielli Moraes de Oliveira**

Examinador Externo

Universidade Federal de Uberlândia - UFU

Belém, 02 de Junho de 2017.

*“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa,  
nunca tem medo, nunca se arrepende”*

*(Leonardo da Vinci)*

## **Agradecimentos**

À Deus, através das minhas orações e fé, por nunca me abandonar e me manter centrada nos momentos difíceis que tive que enfrentar ao longo do mestrado.

Ao Prof. Dr. Marcelo Picanço que me orientou na pesquisa.

Ao prof. Dr. Pompeu pelos ensinamentos adquiridos com a disciplina engenharia dos materiais e aos demais professores que me ajudaram nessa trajetória.

A CAPES pelo financiamento da pesquisa, na forma de bolsa de mestrado.

Aos laboratoristas Joel e seu Maneca pelas ajudas nos ensaios.

Aos meus amigos Francisco Salgado Neto (meu melhor amigo e minha dupla no mestrado) e Maurílio Pimentel (vulgo Mau Mau) que muito me ajudaram e me aturaram, à todas as amizades que fiz na Universidade Federal do Pará durante o mestrado.

Ao homem da minha vida, aquele que me educou e me ensinou a ser melhor a cada dia e que nunca mediu esforços para me dar sempre o melhor, a quem me espelho e tenho orgulho da pessoa íntegra, de bom caráter, inteligente e dono de um coração gigante, MEU SUPER PAI E MÉDICO PARTICULAR Dr. VIVEIROS, a você dedico essa minha grande realização pessoal. A minha mãe por sempre orar por mim, aos meus irmãos e as minhas mais preciosas joias Maria Eduarda e Rafaela.

Ao meu namorado Diovanne Inzaghi e a minha amiga Ana Clédina que sempre estiveram torcendo por mim.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que direta e indiretamente contribuíram para que eu chegasse até aqui. O MEU MUITO OBRIGADA!!!

## **Resumo**

VIVEIROS, D. C. S. **Rejeito do minério de manganês como material de construção civil.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2017.

Fatores como aumento da demanda mundial por minério de manganês e impactos ambientais associados à disposição final de rejeitos têm motivado estudos que visam o aproveitamento dos materiais contidos em barragens de rejeitos de minerações. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo principal estudar o aproveitamento do rejeito de manganês como material de construção civil. Para tanto, realizou-se a caracterização do rejeito de Mn do ponto de vista físico, químico, mineralógico, ambiental e quanto a reatividade com o meio ao qual está exposto. A partir dessas análises foram investigadas aplicações viáveis para o rejeito. A primeira análise verificou seu aproveitamento como filler no cimento Portland, para isso foram fabricadas argamassas de referência e argamassas com substituições de 6, 8 e 10% ao cimento. As argamassas foram ensaiadas quanto a resistência à compressão e absorção de água total e índice de vazios aos 28 dias. Os ensaios mostraram que as argamassas com teores de substituição obtiveram resultados positivos quando comparados com as argamassas de referência. Induzindo ao ganho de resistência principalmente para os percentuais de 6 e 8%, assim como, para os resultados de absorção total e índice de vazios. A segunda investigação verificou o aproveitamento do rejeito de Mn como agregado miúdo na confecção de concretos, foram fabricados concretos de referência e concretos com substituições de 15, 20, 25 e 30% ao agregado miúdo natural. Por meio da análise de resistência à compressão axial notou-se um resultado positivo para ambas as amostras, principalmente para os concretos com substituição de 15 e 20%. As análises de resistência à tração e módulo de elasticidade alcançaram resultados satisfatórios para ambas as amostras, principalmente para os concretos com 20, 25 e 30% de substituição. Na análise de absorção capilar os concretos com substituições apresentaram variações significativas quando comparados aos concretos de referência. As amostras de 15% e 30% foram as que menos absorveram água, sendo que os resultados das amostras de 20 e 25% ainda ficaram abaixo dos valores de absorção do concreto de referência. Desta forma, o aproveitamento deste rejeito como material de construção civil se torna viável do ponto de vista técnico e ambiental.

### **Palavras-chave:**

Rejeito de Manganês; Resíduos de minas; Argamassa; Concreto.

## **Abstract**

VIVEIROS, D. C. S. Manganese ore tailings as material for civil construction. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2017.

The increasing global demand for manganese ore and environmental impacts associated with the disposal of ore waste have motivated studies about the reuse of materials from tailings dams. In this context, the main objective of this work was to study the reuse of manganese waste as materials for civil construction. For this purpose a characterization of the Mn tailings was made from a physical, chemical, mineralogical, environmental and reactivity point of view. From these analyzes, feasible applications for the tailings were investigated. The first one was to study its reutilization as a filler in Portland cement. For this, reference mortars and mortars with 6, 8 and 10% substitutions were made to the cement. The mortars were tested for compressive strength and total water absorption and voids index at 28 days. The tests showed that the mortars with substitution contents obtained positive results when compared to the reference mortars. Inducing the resistance gain mainly for the percentages of 6 and 8%, as well as for the results of total absorption and voids index. A second investigation was carried out to study the reuse of Mn tailings as a fine aggregate in the manufacture of concrete. For this purpose, reference concrete and concretes were made with 15, 20, 25 and 30% substitutions to the natural fine aggregate. Through the analysis of resistance to axial compression a positive result was observed for both samples, especially for concretes with 15 and 20% substitution. The tests of tensile strength and modulus of elasticity achieved satisfactory results for both samples, especially for concretes with 20, 25 and 30% of substitution. In the capillary absorption analysis, the concretes with substitutions presented significant variations when compared to the reference concretes. The samples of 15% and 30% were the ones that less absorbed water, and the results of the 20 and 25% samples were still below the absorption values of the reference concrete. In this way, the reuse of this waste as materials for civil construction becomes feasible from a technical and environmental point of view.

Keywords:

Manganese tailings; Mine wastes; Mortar; Concrete.

## Lista de Figuras

| <b>Figura</b>   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| Figura 1.1 - Estrutura da Dissertação .....   | 20            |
| Figura 2.1 - Processo de beneficiamento do minério de Mn .....  | 29            |
| Figura 2.2 - Imagem aérea da Serra de Buritirama .....  | 31            |
| Figura 2.3 - Imagem da Serra Buritirama.....  | 32            |
| Figura 2.4 - Difração de raio-x dos IOTs .....  | 40            |
| Figura 3.1 - Organograma de planejamento da pesquisa.....   | 42            |
| Figura 3.2 - Organograma da caracterização do rejeito Mn .....  | 42            |
| Figura 3.3 - Curva granulométrica do agregado miúdo e limites da NBR NM 7211.....   | 45            |
| Figura 3.4 - Lavra na Serra de Buritirama (A); Rejeito de Mn (B).....   | 47            |
| Figura 3.5 - Análise de granulometria à laser das amostras e cimento Portland CP V .....  | 49            |
| Figura 3.6 - Distribuição granulométrica das amostras e limites da NBR NM 7211 .....  | 50            |
| Figura 3.7 – Difratoograma de raio x do rejeito de Mn.....  | 52            |
| Figura 3.8 - MEV (a,c) e EDS (b,d) .....  | 54            |
| Figura 3.9 - Avaliação IAP com cal .....  | 56            |
| Figura 3.10 - Gráfico de expansões ao longo do tempo .....  | 59            |
| Figura 4.1 – Resistência à compressão das argamassas com substituição parcial do cimento por rejeito de Mn aos 28 dias. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. ....   | 66            |
| Figura 4.2 – Absorção de água total das argamassas com substituição parcial do cimento por rejeito de Mn aos 28 dias. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. Asterisco (*) indica diferença estatística entre grupos (ANOVA; $P < 0,05$ ).....  | 67            |
| Figura 4.3 – Índice de vazios das argamassas com substituição parcial do cimento por rejeito de Mn aos 28 dias. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre argamassas para a mesma variável. (ANOVA; $P < 0,05$ ). ..... | 68            |
| Figura 4.4 – Resistência à compressão dos concretos com substituição parcial de AMN por rejeito de Mn aos 28 dias. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão.....   | 70            |
| Figura 4.5 – Estrutura cristalina de corpo centrado: representação da célula unitária por esferas rígidas (a), célula unitária com esferas reduzidas (b) e agregado de muitos átomos (c). .....   | 71            |
| Figura 4.6 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos com substituição parcial do AMN por rejeito de Mn aos 28 dias. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. (ANOVA; $P < 0,05$ ) .....   | 73            |
| Figura 4.7 – Módulo de elasticidade dos concretos com substituição parcial do AMN por rejeito de Mn aos 28 dias. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão .....  | 74            |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.8 – Linha de tendência dos valores médios do módulo elasticidade.....  | 74 |
| Figura 4.9 – Absorção capilar. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando $P < 0,05$ . ..... | 76 |
| Figura 4.10 - MEV da amostra C15Mn (a) e MEV da amostra C30Mn (b).....  | 77 |
| Figura 4.11 - EDS da amostra C15Mn (a) e EDS da amostra C30Mn.....  | 78 |
| Figura 4.12 - MEV e EDS da amostra C15Mn (a) e MEV e EDS da amostra C30Mn (b).....  | 80 |

## Lista de Tabelas

| <b>Tabela</b>  | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| Tabela 2.1 - Principais minerais de manganês .....                                     | 23            |
| Tabela 2.2 - Classificação dos minérios de Mn em função dos teores de Mn.....          | 25            |
| Tabela 2.3 - Composição Mineralógica do minério de Mn.....                             | 25            |
| Tabela 2.4 - Análise química do minério de Mn .....                                    | 26            |
| Tabela 2.5 - Dosagens .....  | 34            |
| Tabela 2.6 - Composição Química do rejeito de Mn.....                                  | 34            |
| Tabela 2.7 - Dosagem de diferentes amostras .....                                      | 36            |
| Tabela 2.8 - Composição química (% em massa) .....                                     | 36            |
| Tabela 2.9 - Análise química dos IOTs .....  | 39            |
| Tabela 3.1 – Caracterização do Agregado Graúdo.....                                    | 44            |
| Tabela 3.2 – Caracterização do agregado miúdo natural .....                            | 45            |
| Tabela 3.3 – Granulometria do Rejeito de Mn como agregado miúdo .....                  | 49            |
| Tabela 3.4 – Características físicas do Rejeito de Mn como agregado miúdo .....        | 50            |
| Tabela 3.5 – Análise de área superficial específica (BET).....                         | 51            |
| Tabela 3.6 - Análise química do rejeito de Mn .....                                    | 53            |
| Tabela 3.7 - Resultado IAP com cal.....  | 55            |
| Tabela 3.8 – Resultado IAP com cimento .....   | 57            |
| Tabela 3.9 - Quantidade de corpos de prova de argamassa.....                           | 60            |
| Tabela 3.10 – Consumo de Materiais em Kg/m <sup>3</sup> para todas as argamassas ..... | 60            |
| Tabela 3.11 - Quantidade de corpos de prova de concreto.....                           | 62            |
| Tabela 3.12 – Consumo dos materiais para a confecção dos concretos .....               | 63            |

# SUMÁRIO

| Capítulo  | Página    |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>15</b> |
| <b>1.1. Considerações Gerais .....</b>  | <b>15</b> |
| <b>1.2. Justificativa .....</b>   | <b>16</b> |
| <b>1.3. Objetivos .....</b>   | <b>18</b> |
| 1.3.1. Objetivo Geral .....   | 18        |
| 1.3.2. Objetivos Específicos .....  | 18        |
| <b>1.4. Estrutura da dissertação .....</b>  | <b>18</b> |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....</b>   | <b>21</b> |
| <b>2.1. Manganês.....</b>   | <b>21</b> |
| 2.1.1. Manganês no Brasil .....   | 21        |
| 2.1.2. Minérios de Manganês - Aspectos Gerais .....   | 21        |
| 2.1.3. Mineralogia .....  | 22        |
| 2.1.4. Classificação quanto ao Tipo de Minérios de Manganês .....   | 24        |
| 2.1.5. Características dos Minérios de Manganês .....   | 26        |
| 2.1.6. Beneficiamento dos Minérios de Manganês .....  | 28        |
| 2.1.7. Aspectos ambientais, riscos e danos possíveis relacionados ao uso de barragens como forma de disposição final de rejeitos de mineração ..... | 30        |
| 2.1.8. Aproveitamento de rejeito de Manganês .....  | 33        |
| 2.1.9. Emprego de rejeitos das atividades de mineração na construção civil.....   | 37        |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>  | <b>41</b> |
| <b>3.1. Planejamento experimental .....</b>   | <b>41</b> |
| <b>3.2. Etapa 1: Caracterização dos materiais .....</b>   | <b>43</b> |
| 3.2.1. Cimento Portland.....  | 43        |
| 3.2.2. Agregado Graúdo .....  | 43        |
| 3.2.3. Agregado Miúdo.....  | 44        |
| 3.2.4. Água .....   | 46        |
| 3.2.5. Aditivo.....   | 46        |
| 3.2.6. Rejeito de manganês.....   | 46        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.2.6.1. Amostragem.....   | 46        |
| 3.2.6.2. Caracterização Física.....  | 48        |
| 3.2.6.3. Caracterização Mineralógica.....  | 51        |
| 3.2.6.4. Caracterização Química.....   | 52        |
| 3.2.6.5. Morfologia da partícula.....  | 53        |
| 3.2.6.6. Caracterização de Reatividade.....  | 54        |
| <b>3.3. Etapa 2: Argamassas produzidas com rejeito de mn como filer ao cimento portland.....</b> | <b>59</b> |
| 3.3.1. Desenvolvimento das argamassas.....   | 59        |
| 3.3.2. Ensaio de resistência à compressão e absorção de água.....                                | 61        |
| <b>3.4. Etapa 3: Rejeito de mn como agregado miúdo no concreto.....</b>                          | <b>62</b> |
| 3.4.1. Desenvolvimento dos concretos.....  | 62        |
| 3.4.2. Propriedades do concreto.....   | 64        |
| 3.4.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....  | 64        |
| <b>4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                                  | <b>65</b> |
| <b>4.1. Argamassas produzidas com rejeito de Mn como filer ao cimento Portland.....</b>          | <b>65</b> |
| 4.1.1. Avaliação da resistência por compressão axial.....  | 65        |
| 4.1.2. Avaliação da absorção de água.....  | 67        |
| <b>4.2. Rejeito de Mn como agregado miúdo no concreto.....</b>                                   | <b>69</b> |
| 4.2.1. Avaliação das propriedades do concreto.....   | 69        |
| 4.2.1.1. Avaliação da resistência por compressão axial.....                                      | 69        |
| 4.2.1.2. Avaliação da resistência à tração por compressão diametral.....                         | 72        |
| 4.2.1.3. Avaliação do módulo de elasticidade.....  | 73        |
| 4.2.1.4. Avaliação da absorção capilar.....  | 75        |
| 4.2.2. Análises em microscopia eletrônica de varredura.....                                      | 77        |
| <b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>  | <b>81</b> |
| <b>5.1. Conclusões.....</b>  | <b>81</b> |
| <b>5.2. Sugestões.....</b>   | <b>82</b> |
| <b>Referências Bibliográficas.....</b>   | <b>83</b> |



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

As alterações do equilíbrio ecológico e o impacto da atividade humana sobre a ecossfera terrestre começaram a se transformar em assunto de preocupação de alguns cientistas e pesquisadores durante a década de 60, ganharam dimensão política a partir da década de 70, e são hoje um dos assuntos mais polêmicos do mundo. Não é mais possível implantar qualquer projeto ou discutir qualquer planejamento sem considerar o impacto sobre o meio ambiente.

As atividades humanas, chamadas econômicas, alteram o meio ambiente, a mineração, a agricultura, a exploração florestal, a produção de energia, os transportes, as construções civis e as indústrias básicas (químicas e metalúrgicas) são as causadoras de quase todo o impacto ambiental existente na terra (MELO, 2012). O impacto das demais atividades econômicas torna-se pouco significativo quando comparado às citadas anteriormente.

A indústria extrativa mineral altera intensamente o território onde realiza-se a mineração e as áreas vizinhas, onde são despejados os rejeitos. Além do mais, quando temos a presença de substâncias químicas nocivas na fase de beneficiamento do minério, podem significar um problema sério do ponto de vista ambiental.

A indústria da construção civil é visada enquanto atividade industrial na emissão de gases de efeito estufa. Em caráter de emergência nacional e internacionalmente e interesse ambiental no desenvolvimento sustentável, enfatizam-se as quantidades significativas das emissões de CO<sub>2</sub> geradas na produção de cimento Portland (EVANGELISTA, 2011). Assim como é o setor responsável pelo consumo de maior volume de recursos naturais em estimativas que variam de 15 a 50% dos recursos extraídos, por estas razões, é de fundamental importância o desenvolvimento de materiais alternativos que atendam a essa atividade.

O aumento da degradação e dos níveis de impacto ambiental é mundialmente notório, resultante principalmente pela falta de gestão adequada dos resíduos gerados. De acordo com

a Agenda 211/1992 os 3Rs (redução, reutilização e reciclagem) constituem os primeiros passos da hierarquia de objetivos que formam a estrutura de ação necessária para o manejo ambientalmente saudável dos resíduos (MMA, 2016). Portanto, é necessário um novo agir de cada ser humano, das lideranças e de todos os segmentos da sociedade para estabelecer novos modelos de gestão dos recursos naturais, bem como do aproveitamento de resíduos provenientes dos mais diversos segmentos.

Nesse interim, de acordo com Dantoft et al. (2008, *apud* EVANGELISTA, 2011) uma abordagem holística para o desenvolvimento industrial sustentável com a chamada ecologia industrial seria uma ótima proposta. Essa abordagem na prática implicaria em “reciclar os resíduos produzidos por uma indústria para que substituam matérias-primas *in natura* de outras e assim reduzam o impacto ambiental de ambas”.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

A extração mineral está relacionada com o meio ambiente devido à grande quantidade de material extraído e pelo grande volume de resíduos produzidos. Fatos como estes que geram impactos ambientais significativos.

O manganês está entre os vinte elementos mais abundantes na crosta terrestre, sendo o Brasil um dos maiores produtores deste minério, estando em 5º (quinto) lugar no ranking mundial como maior produtor de manganês, detendo em 2014 a parcela de 6,2% da produção mundial, e atingindo cerca de 2,7 milhões de toneladas (Mt) na produção brasileira, segundo informações do Departamento Nacional de Produção Mineral. As principais empresas produtoras foram: VALE S/A (MG e PA), Mineração Buritirama S/A (PA), Urucum Mineração S/A (MT) e Sociedade Brasileira de Imóveis Ltda (MS) que juntas foram responsáveis por 89,9% da produção (BRASIL, 2015).

De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (2015), o estado do Pará destaca-se como o maior fornecedor de manganês, com sua grande província mineral localizada na Serra dos Carajás, responsável pela geração em 2014 de 70% de toda a produção de concentrado de manganês do país. O polo minerador da Serra dos Carajás divide-se em duas grandes minas, uma situada no município de Parauapebas chamada Mina do Azul

---

<sup>1</sup> Agenda 21/1992 um instrumento de planejamento para a construção de sociedades sustentáveis, em diferentes bases geográficas, que concilia métodos de proteção ambiental, justiça social e eficiência econômica.

e a outra no município de Marabá a 485 km da capital Belém denominada Mina de Buritirama local onde foi retirado o rejeito estudado nesta pesquisa.

A atividade mineradora da Serra de Buritirama produz na ordem de 50 kg de rejeito por tonelada de liga produzida, sendo que a produção gira em torno de 300 toneladas por dia (CASTRO, 2011). O rejeito proveniente da lavagem do minério de manganês é depositado em barragens a beira do rio Itacaiúnas. Para as mineradoras as barragens são o ponto alto da preservação ambiental, já que não deixam partículas sólidas, provenientes dos rejeitos, sejam carregadas para os corpos hídricos receptores, impedindo seu assoreamento e contaminação. Todavia, segundo Nascimento (2015), ainda que o descarte seja feito em uma barragem segura, o volume de rejeito cresce vertiginosamente, tornando-se um problema ambiental. Visto que no período chuvoso os rejeitos têm alcançado os cursos d'água impossibilitando o seu uso por não haver uma destinação específica, o custo de armazenamento acaba se elevando, resultando em uma grande problemática ambiental pelo fato de não existir um uso adequado, e, portanto, sem aproveitamento, sua destinação é continuar armazenado.

Considerando a necessidade de diminuir os impactos ambientais relacionados à atividade de mineração e de reduzir os custos com a manutenção das barragens de rejeitos, empresas mineradoras estão buscando parcerias com universidades e centros de pesquisa para estudar possibilidades de agregar valores aos seus resíduos (MELO, 2012).

Tendo entendimento dessas necessidades, a indústria mineradora como grande geradora de resíduos e a construção civil como potencial consumidora configuram panorama ideal para a reciclagem e aproveitamento destes resíduos, de forma adequadamente técnica, econômica e ambiental.

Faz-se a partir desses pressupostos a motivação e o objetivo dessa pesquisa, buscando por meio do aproveitamento de rejeitos do beneficiamento do minério de manganês da serra de Buritirama-PA, uma aplicação como material de construção civil. Avaliando sua caracterização química, física, mineralógica, de reatividade e ambiental, assim como, ensaios tecnológicos específicos para um determinado emprego. Portanto, espera-se que os resultados obtidos nesta pesquisa possam fornecer informações fidedignas para viabilizar o uso do rejeito de manganês como material de construção civil. Assim como, evitar a degradação do ambiente pela não destinação de resíduos em solos e evitar a geração de passivos ambientais e a preservação de recursos naturais não renováveis com a minimização de sua retirada.

## 1.3. OBJETIVOS

### 1.3.1. Objetivo Geral

Devido à grande quantidade de resíduo de minério de manganês gerado durante a atividade mineradora, este trabalho tem como objetivo geral estudar o aproveitamento do rejeito de manganês como material de construção civil.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar o rejeito proveniente da exploração de manganês da Serra de Buritirama do ponto de vista químico, físico, mineralógico e ambiental;
- Investigar preliminarmente a atividade pozolânica do rejeito de manganês em argamassas com cal e com cimento;
- Investigar também, em caráter preliminar, a reação álcali-agregado;
- Estudar o aproveitamento do rejeito de manganês como fíler ao cimento Portland na produção de argamassas com substituição em massa de 6, 8 e 10%, analisar os efeitos da substituição parcial do cimento por rejeito avaliando a sua resistência à compressão bem como sua absorção de água total e índice de vazios;
- Estudar a aplicabilidade do rejeito de manganês como agregado miúdo na confecção de concretos com substituição em massa de 15, 20, 25 e 30% e avaliar suas propriedades mecânicas e microestrutura.

## 1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente pesquisa está dividida em cinco capítulos, conforme descrito a seguir, e demonstrado na Figura 1.1:

O primeiro capítulo é apresentado a introdução abordando a importância do tema, as justificativas, os objetivos e a estrutura da pesquisa.

O segundo capítulo é constituído por uma revisão bibliográfica, onde inicialmente explana sobre o minério de manganês; aspectos gerais; sua mineralogia; classificação; características; beneficiamento; aspectos ambientais, riscos e danos possíveis relacionados ao uso de barragens como forma de disposição final de rejeitos de mineração; aplicações de aproveitamento do rejeito de manganês e outros rejeitos de atividade de mineração na construção civil.

O terceiro capítulo aborda os materiais e métodos, dividido em três etapas. A etapa 1: descreve o planejamento experimental e a caracterização dos materiais; a etapa 2 aborda o uso do rejeito de manganês como fíler ao cimento Portland em argamassas produzidas; a etapa 3 explana sobre o emprego do rejeito de manganês como agregado miúdo na confecção de concretos.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos dos ensaios, seguidos de sua análise e discussão.

O quinto capítulo finaliza o trabalho com as conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

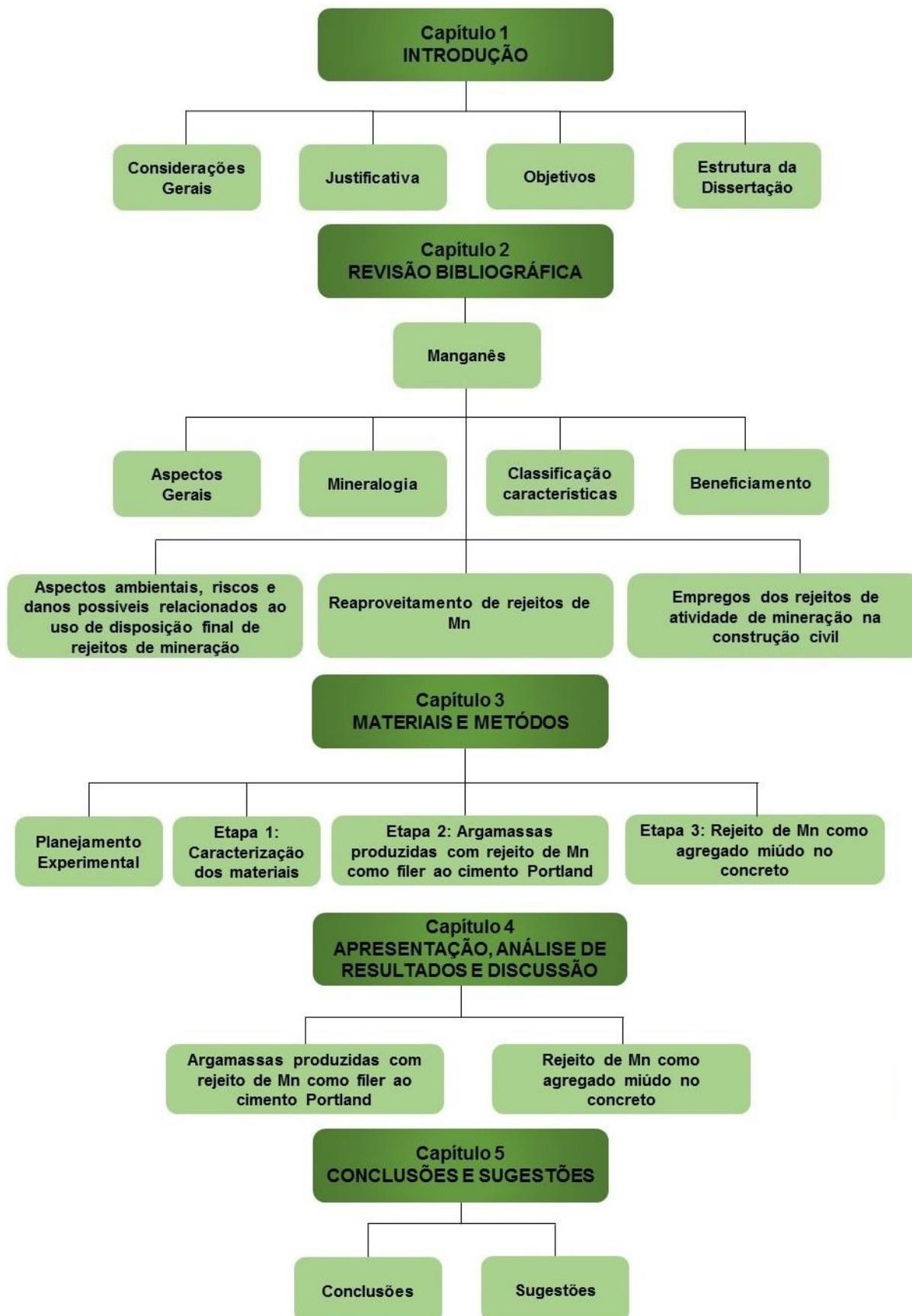


Figura 1.1 - Estrutura da Dissertação

## **2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

### **2.1. MANGANÊS**

#### **2.1.1. Manganês no Brasil**

O minério de manganês é um dos primeiros minerais com produção regular no Brasil, sua produção data do século XIX, ocupando papel importante no país por ser um minério de recurso natural, seja pelas reservas existentes, seja pela essencialidade na produção de ferro ligas e aço, para a qual ainda é um insumo fundamental.

O Brasil é o 5º maior produtor de manganês do mundo, detendo, em 2014 a parcela de 6,2% da produção mundial, segundo informações do Departamento Nacional de Produção Mineral. A produção brasileira estimada de concentrado de manganês atingiu cerca de 2,7 milhões de toneladas (Mt), neste mesmo ano. As principais empresas produtoras foram: VALE S/A (MG e PA), Mineração Buritirama S/A (PA), Urucum Mineração S/A (MT) e Sociedade Brasileira de Imóveis Ltda (MS) que, juntas, foram responsáveis por 89,9% da produção (BRASIL, 2015).

O estado do Pará se destaca como maior fornecedor de manganês, sendo responsável pela geração em 2014 de 70% de toda a produção de concentrado de manganês do país. Sua principal fonte é a mina do Azul, cuja concessão de exploração está no município de Parauapebas, situado a 860 Km de Belém, capital do estado.

A segunda fonte é a mina de Buritirama, que integra também a grande província mineral da Serra dos Carajás. A mineradora possui instalações industriais de lavra e beneficiamento no distrito de Vila Nova União, município de Marabá, no estado do Pará.

#### **2.1.2. Minérios de Manganês - Aspectos Gerais**

De acordo com estudos do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) os minérios de manganês se formam a partir de protominérios originados em ambientes sedimentares marinhos ou lagunares, tanto por precipitação química como por deposição elástica. Estes sedimentos e protominérios contendo manganês quando submetidos a processos geológicos (metamorfismo), podem ser enriquecidos, propiciando o aumento do conteúdo de manganês e dando origem aos minérios de alto teor (MME, 2009).

O comportamento termodinâmico do minério de manganês é semelhante ao do minério de ferro, devido a sua compatibilidade geoquímica, é habitual a associação paragenética entre os minerais e a acumulação de minérios contendo os dois elementos, em diferentes proporções. Logo, torna-se comum a presença de ferro e manganês em diversas formações ferríferas, onde são produzidos tanto o minério de manganês como o de ferro ou, ainda, minérios tipo ferro-manganês.

O manganês é pertencente à família do ferro, tem número atômico 25 e massa atômica 54,93. Participa com 0,09% em peso na crosta terrestre, o que é aproximadamente cinquenta e seis vezes menor do que o ferro. É um metal de cor prata cinzenta, duro e quebradiço. Seu ponto de fusão é de 1260°C e possui densidade de 7,2 g/cm<sup>3</sup>. Seus estados de oxidação mais comuns são +2, +3, +4, +6 e +7 (FARIA, 2011), ainda que encontrados desde +1 a +7. Os compostos que apresentam manganês com estado de oxidação +7 são agentes oxidantes muito enérgicos. A temperatura ambiente, o manganês puro não é atacado por oxigênio, nitrogênio ou hidrogênio. A altas temperaturas, este reage violentamente com oxigênio, enxofre e fósforo (REIS, 2010).

São conhecidas quatro formas alotrópicas do manganês,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\delta$ . A variação  $\alpha$ -manganês é estável abaixo de 850°C, possui estrutura cúbica de corpo centrado com 58 átomos em sua célula unitária. O  $\beta$ -manganês é estável acima de 850°C, possui 20 átomos por célula unitária de estrutura cúbica (CASTRO, 2011).

### 2.1.3. Mineralogia

A mineralogia do manganês é variada e complexa. O manganês é um metal encontrado em sua forma elementar e está distribuído em diversos ambientes geológicos e disperso em uma variedade de rochas sob a forma de óxidos, dentre os quais destacam-se: dióxidos, hidróxidos, silicatos e carbonatos (SAMPAIO et al., 2008). Os autores mencionam que os dióxidos constituem as mais importantes fontes comerciais do metal, destacando-se a pirolusita, a psilomelana e a manganita.

Dentre os minerais, alguns são considerados por vários autores como os mais importantes comercialmente e mais frequentes. A Tabela 2.1 apresenta os principais minerais de manganês, fórmulas químicas e tipo de ocorrências.

Tabela 2.1 - Principais minerais de manganês

| Mineral      | Fórmula Química   | Tipo de ocorrência |
|--------------|---|--------------------|
| Criptomelana | $\text{KMn}_8\text{O}_{16}$                                       |                    |
| Pirolusita   | $\text{Mn}_2\text{-}\beta$  |                    |
| Nsutita      | $\text{Mn}_2\text{-}\gamma$                                       |                    |
| Bimessita    | $\text{Mn}_2\text{-}\delta$                                       | Óxidos             |
| Jacobsita    | $(\text{Mn,Fe})_3\text{O}_4$                                      |                    |
| Hausmannita  | $\text{Mn}_3\text{O}_4$   |                    |
| Psilomelana  | $\text{BaMn}_5\text{O}_{10}\cdot\text{H}_2\text{O}$               |                    |
| Todorokita   | $(\text{Mn, Ca}) \text{Mn}_5\text{O}_{11}\cdot\text{H}_2\text{O}$ |                    |
| Manganita    | $\text{MnO(OH)-}\gamma$   | Hidróxidos         |
| Groutita     | $\text{MnO(OH)-}\beta$  |                    |
| Rodonita     | $\text{MnSiO}_3$  |                    |
| Tefroíta     | $\text{Mn}_2\text{SiO}_4$   |                    |
| Espessartita | $\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$                  | Silicatos          |
| Braunita     | $(\text{Mn,Si})_2\text{O}_3$                                      |                    |
| Rodocrosita  | $\text{MnCO}_3$   | Carbonatos         |

Fonte: Santos (2013)

Algumas considerações, descritas a seguir, são fundamentadas por SAMPAIO et al. 2008.

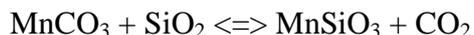
Pirolusita - usualmente formado pela oxidação de outros minerais também de manganês. É o de maior importância comercial (CETEM, 2008).

Psilomelana - o segundo mais importante sob o aspecto comercial. É um óxido hidratado contendo de 45 a 60% de Mn, porém com quantidades variáveis de bário e potássio. É muito comum sua presença em depósitos secundários, apresentando-se como uma forma coloidal de  $\text{MnO}_2$  que supostamente absorveu impurezas, incluindo água, sódio, potássio e bário (CETEM, 2008).

Rodocrosita - é um carbonato ( $\text{CaCO}_3$ ) de manganês com quantidades variáveis de ferro, cálcio e carbonatos de manganês. É muito encontrado como uma substituição metasomática de calcário nos veios, em filões de prata (CETEM, 2008).

Rodonita - é um silicato de manganês, em cuja estrutura cristalina ocorrem cálcio, na forma de  $\text{CaSiO}_3$  no máximo 20% em peso;  $\text{Fe}_2^+$ , substituindo o Mn em até 14% em peso;

zinco, em substituição à formação de um tipo de rodonita, também chamada de fowlerita,  $\text{Ca}(\text{Zn,Mn})_4(\text{Si}_5\text{O}_{15})$ . A rodonita ocorre em depósitos de manganês, como resultado de atividades metamórficas. O mineral, ausente de impurezas, pode ser formado com base em rodocrosita que, ao reagir com a sílica, produz rodonita e dióxido de carbono, segundo a reação (CETEM, 2008):



Manganita - formado pela redução de pirolusita, o mineral ocorre em veios e está, invariavelmente, associado a outros minerais de manganês (CETEM,2008).

Braunita e manganita - ocorrem, em menores quantidades, em muitos depósitos de manganês. A braunita contém até 10% de  $\text{SiO}_2$ , que a transforma em um oxissilicato, o único com alguma importância comercial (CETEM, 2008).

Litiofilita - ( $\text{LiMnPO}_4$ ) é um óxido de manganês com quantidades variáveis de outros metais, como cobalto, níquel e cobre (CETEM, 2008).

Nsutita - ( $\text{MnO}_2\text{-}\gamma$ ) é um composto não estequiométrico e poroso, comumente empregado na fabricação de baterias, conferindo-lhes melhor rendimento. O nome provém da região de Nsuta, no Gana (CETEM, 2008).

Todorokita - nome com origem em Todoroki, mina de manganês no Japão, onde o mineral foi encontrado em nódulos de manganês (CETEM, 2008).

Hausmannita - é um mineral primário de manganês contido em veios associados às rochas ígneas, encontrado em quantidade relativamente pequena (CETEM,2008).

#### 2.1.4. Classificação quanto ao Tipo de Minérios de Manganês

De acordo com Gonçalves e Serfaty (1976, *apud* Reis, 2010) para fins metalúrgicos, os concentrados de minérios de manganês classificam-se, em alto, médio e baixo teor de Mn. Teores por volta de 46% de Mn são classificados de alta concentração, em torno de 40%, média concentração, ambos são considerados mais raros e poucos países detêm reservas expressivas. De acordo com CETEM (2001, *apud* MME, 2009) no Brasil destacam-se as reservas localizadas no complexo mineiro de Carajás no estado do Pará, enquanto que as reservas exploradas de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Bahia, detêm a produção com teores de Mn abaixo de 35%.

Segundo Maranhão (1985, *apud* FARIA, 2011), a Tabela 2.2 apresenta uma classificação dos minérios de manganês em função dos teores de Mn.

Tabela 2.2 - Classificação dos minérios de Mn em função dos teores de Mn

| Conteúdo  | Tipo Metalúrgico |            |            |
|---|------------------|------------|------------|
|   | Alto teor        | Médio Teor | Baixo Teor |
| Mn  | >46 %            | 40%        | <35%       |
| Fe (máx.)   | 8%               | 6%         | 10%        |
| SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12%              | 15%        | 20%        |
| P (máx.)  | 0,18%            | 0,30%      | -          |
| Cu +Pb + Zn                                       | 0,1%             | 0,25%      | -          |

Fonte: Maranhão (1985, *apud* FARIA, 2011)

Faria (2011) analisou em sua pesquisa amostras de minérios de manganês de três minas, e conclui que quanto maior o teor de manganês, menor é a concentração do SiO<sub>2</sub>. O teor de manganês da Mina do Azul, é o maior entre eles, com 47,68%, apresentando uma concentração de SiO<sub>2</sub> de 3,16%. A Mina do Urucum apresenta minérios com teor de 42,69% de manganês, com 5,67% de SiO<sub>2</sub>. E no Morro da Mina os minérios possuem o teor mais baixo de 28,44%, apresentando a maior concentração de SiO<sub>2</sub> em sua composição, 24,59% (FARIA, 2011).

O complexo mineiro da Região dos Carajás no estado do Pará, possui duas grandes minas, a Mina do Azul e a Mina de Buritirama. A composição mineralógica qualitativa e análise química dos principais minérios de manganês da Mina do Azul está representada na Tabela 2.3 e 2.4.

Tabela 2.3 - Composição Mineralógica do minério de Mn

| Amostra          | Mineral identificado                             |  |                                  |   |
|------------------|--|--|----------------------------------|---|
|                  | Predominante<br>(> 40%)                          | Maior<br>(< 20%)   | Menor<br>(<10%)                  | Minoritário<br>(<3%)  |
| Minério de<br>Mn | Criptomelana<br>KMn <sub>8</sub> O <sub>16</sub> | Todorokita<br>(Na, Ca, K) <sub>2</sub> Mn <sub>6</sub> O <sub>12</sub> ·3-4<br>H <sub>2</sub> O) | Gibbsita<br>Al (OH) <sub>3</sub> | Espessartita<br>Mn <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>  |
|                  |  | Pirolusita<br>MnO <sub>2</sub>   |                                  | Magnetita<br>Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub><br>Nsutita<br>Mn (O, OH) <sub>2</sub> |

Fonte: FARIA et al, (2012)

Tabela 2.4 - Análise química do minério de Mn

| Amostra       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | Fe    | SiO <sub>2</sub> | Mn     | P      | TiO <sub>2</sub> | MgO    |
|---------------|--------------------------------|-------|-------|------------------|--------|--------|------------------|--------|
| Minério de Mn | 5,22%                          | 0,12% | 3,59% | 3,16%            | 47,68% | 0,097% | 0,24%            | 0,18 % |

Fonte: FARIA et al, (2012)

### 2.1.5. Características dos Minérios de Manganês

De acordo com Brasil (2011) a característica do minério de manganês para fins de aplicação, distingi o metal entre metalúrgico e não metalúrgico, sendo que este primeiro é o mais importante, absorvendo a maior parte do mineral produzido, o qual consome aproximadamente 85% da produção. O restante da produção se destina a indústrias de pilhas eletrolíticas (10%) e indústria química (5%).

No uso metalúrgico, de acordo com Santos (2013), é usado para obtenção de gusa, ferro-ligas e aços. As aplicações deste mineral são devidas às suas características físico-químicas, podendo atuar como:

- Agente dessulfurante - Na forma de minério, liga ou sucata. Pode ser empregado tanto no alto forno como na aciaria para diminuir a quantidade de enxofre (sulfetos contidos no gusa ou no aço). A presença de enxofre nos aços promove a formação de FeS (sulfeto de ferro), de baixo ponto de fusão (950 - 1000°C), dificultando a forjaria e laminação dos produtos. Havendo teores suficientes de Mn, devido a maior afinidade deste elemento com o enxofre, ocorre formação de MnS (sulfeto de manganês), de ponto de fusão semelhante ao do aço;
- Agente desoxidante - O manganês tem maior afinidade pelo oxigênio do que pelo ferro, quando na forma de ferro-liga, reduz o FeO (óxido de ferro) presente no banho de refino com consequente escorificação de MnO (óxido de manganês). Mas outros agentes desoxidantes mais fortes já vêm sendo usados;
- Agente oxidante - Na forma de minério, pode ser usado para manter uma escória de elevado potencial de oxidação, que facilitará a eliminação do P e C, dissolvidos no aço, que assim são escorificados. Esse papel é de pouca importância, dado, o baixo rendimento, custos e processos mais eficientes de oxigenação;

- Aços especiais - Variadas quantias de manganês introduzidas nas etapas metalúrgicas dão características especiais ao aço, tais como a maleabilidade, tenacidade e dureza. O minério deve possuir teores elevados de Mn e baixos teores de Fe, resultando uma relação de Mn/Fe de 6 a 7.

Na indústria não metalúrgica, o manganês é utilizado para fabricação de fertilizantes, pilhas eletrolíticas, cerâmicas, tintas, vernizes, reagentes químicos, entre outros.

O manganês tem sido utilizado como nutriente de solos, que apresentam baixo teor deste elemento. Na forma de sulfato de manganês, é utilizado principalmente como elemento nutriente. Geralmente, o sulfato de manganês é introduzido por pulverização nas plantas. O manganês está envolvido em várias reações enzimáticas e na fotossíntese. Atua na assimilação do nitrogênio amoniacal que deve ser aproveitado imediatamente, do contrário se perderá. Toma parte na resistência dos vegetais à seca, promove o melhor desenvolvimento das raízes e também tem relação íntima com o zinco e o boro. Por outro lado, teores altos de manganês na planta podem determinar o aparecimento de sintomas de deficiência de ferro (REIS, 2010)

Na fabricação de pilhas e baterias, a pirolusita,  $MnO_2$ , (dióxido de manganês), para este fim tem que ter alto teor de manganês, mais alto do que os usados na metalurgia, o que leva a um preço também maior. O dióxido de manganês age como um despolarizador nas células elétricas do tipo Leclanché (SULLY, 1955, *apud* CASTRO, 2011). Na bateria, o anodo e catodo são úmidos, e no funcionamento da pilha, durante corrente elétrica, o hidrogênio é formado em um dos eletrodos na forma gasosa, impedindo que se molhe e a energia seja cortada. O dióxido de manganês age oxidando o hidrogênio e água formada.

O minério de manganês também é utilizado na indústria de vidro, onde o dióxido de manganês age como descorante a fim de eliminar a cor esverdeada do vidro, devido à presença de íons de ferro existentes nos seus insumos e, como corante, para dar tons de roxo e preto (SANTOS, 2013). Neste caso, diz-se que o dióxido de manganês tem a função de corante. Entretanto, a cor específica do vidro depende do estado de oxidação e da quantidade do dióxido de manganês adicionado à mistura, para cada caso específico de coloração desejada, há uma quantidade otimizada de dióxido de manganês.

Na fabricação de tintas e vernizes é usado como secante, devido, as características oxidantes do minério de manganês na forma de óxidos, sulfatos, que aceleram a formação da película da tinta e do verniz (REIS, 2010).

Na indústria cerâmica, Castro (2011), cita que o minério de manganês, finamente moído, é adicionado aos esmaltes cerâmicos resultando nas cores castanho e preto. Quando adicionado às argilas vermelhas obtém-se tijolos pretos de efeito decorativo. Geralmente, o minério de manganês utilizado é na forma de óxido.

Devido às suas propriedades altamente oxidantes, o manganês é usado na forma de sais complexos (permanganato) nas reações de oxirredução. Um novo uso em desenvolvimento é em organometálicos, que são produtos químicos orgânicos que têm metais pesados na sua estrutura molecular, é também muito aplicado na produção de produtos farmacêuticos (cloreto, óxido e sulfato de manganês).

O manganês pode ainda substituir o chumbo na adição à gasolina para evitar a poluição ambiental e sem produzir efeitos adversos aos motores. O composto ciclopentadienila-tricarbonila de manganês é bem solúvel na gasolina, óleo e álcool etílico, sendo geralmente utilizado como antidetonante em substituição ao chumbo (REIS, 2010).

#### 2.1.6. Beneficiamento dos Minérios de Manganês

Entende-se por beneficiamento o tratamento dado aos minerais, visando preparar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios por métodos físicos ou químicos sem alterar a constituição química destes (BRASIL, 2015).

Os depósitos de minérios de manganês são processados por técnicas simples de lavagem e/ou técnicas gravíticas (REIS, 2005). Onde nenhum reagente é requerido, resultando na redução de custos diretos e também ambientais. Essa técnica aplica-se pela separação dos minerais em meio denso. Segundo Reis (2005), esse procedimento é viável devido à alta densidade que os minerais de manganês, em geral, possuem, contrastando com a densidade mais baixa daqueles de ganga.

O minério de manganês tradicionalmente em função de sua utilização é preparado em usina de beneficiamento com uma sequência de operações de britagem, peneiramento e classificação, produzindo produtos de granulometria distintas: minério granulado com dimensões entre 75 e 35 mm, minério médio com dimensões variando entre 35 e 9 mm e minério de manganês fino (sinter-feed) com granulometria variando de 9 mm a 0,15 mm (MME,2009).

As duas grandes mineradoras do Estado do Pará, utilizam planta de beneficiamento por lavagem. A usina de beneficiamento da Mineração Vale, utiliza-se de beneficiamento

úmido com sistema de alimentação de água, proveniente de barragem visando a lavagem do minério e posterior classificação. O rejeito da usina de beneficiamento é depositado em barragem própria para o material descartável (MME, 2009).

A Mineração Buritirama, tem planta de beneficiamento onde o minério bruto, devidamente homogêneo, passa pelos processos de britagem primária, desagregação e lavagem em tanque rotativo, classificação em peneira vibratória, rebitagem e nova classificação em classificadores espirais. Segundo Nascimento (20015), os processos de cominuição, lavagem e peneiramento são empregados para remover a parte argilosa do minério e concentrar a fração granulada deste, preferível para fins metalúrgicos. O rejeito do minério de manganês é a fração do minério que, após o processamento, apresenta granulometria inferior a 0,15 mm (MINERAÇÃO BURITIRAMA, 2016). A Figura 2.1 mostra o processo beneficiamento do minério de manganês.

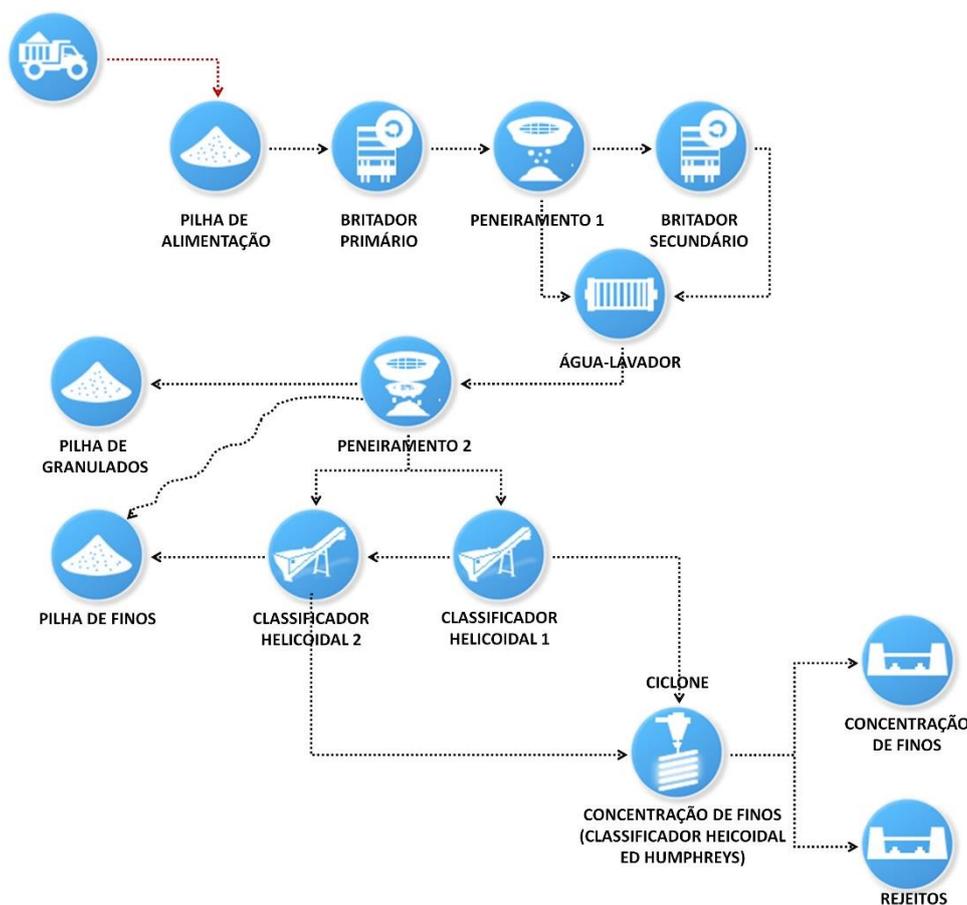


Figura 2.1 - Processo de beneficiamento do minério de Mn

Fonte: <http://mineracaoburitirama.com.br/produto/>

### 2.1.7. Aspectos ambientais, riscos e danos possíveis relacionados ao uso de barragens como forma de disposição final de rejeitos de mineração

Assim como toda exploração de recurso natural, a atividade de mineração acarreta impactos no meio ambiente seja no que diz respeito à exploração de áreas naturais ou mesmo na geração de resíduos.

A produção dos minerais apresenta, relacionadas ao seu processo produtivo, as etapas de preparação da área, extração ou lavra, beneficiamento e comercialização do minério. A extração ou lavra consiste na retirada, normalmente a céu aberto, do mineral que contém um teor economicamente viável. Em seguida, o material extraído é direcionado para o beneficiamento. Em decorrência desta etapa grandes volumes e massas de resíduos misturados à água são gerados, material a que se dá o nome de rejeito (BRASIL, 2015). De acordo com a NBR 13028 (ABNT, 2006), rejeito é “todo e qualquer material não aproveitável economicamente, gerado durante o processo de beneficiamento de minérios”.

Depois de produzido, o rejeito é disposto em pilhas, por empilhamento a seco ou em barragens, dentre outros. Entretanto, segundo a Fundação Estadual do Meio Ambiente (2011, *apud* Andrade, 2014), as barragens caracterizam a principal forma de disposição de rejeitos, armazenando em torno de 85 % dos rejeitos de mineração. Na NBR 13028 (ABNT, 2006), barragem é definida como “qualquer estrutura que forme uma parede de contenção de rejeitos, para sedimentos e/ou para formação do reservatório de água”.

Silva (2007) e Castro et al. (2011); descreveram as barragens de rejeito como empreendimentos que apresentam significativos impactos ambientais associados, tais como:

- desmatamento na fase de construção;
- poluição da água superficial e subterrânea durante a operação e após o fechamento da mina;
- geração de poeira gerada na praia de rejeito; e
- impacto visual em todas as fases da vida útil da barragem.

Ainda no que diz respeito aos impactos ambientais, as águas direcionadas para as barragens de rejeito, de um modo geral, são reutilizadas no processamento de minérios e os sólidos, entretanto, irão compor essas barragens. Segundo Nascimento (2015), por mais que o descarte seja feito em uma barragem segura, o volume de rejeito cresce vertiginosamente,

tornando-se além de um problema ambiental, uma questão econômica, pois o custo envolvido para armazenamento apenas aumenta, sem que uma destinação específica seja dada, resultando em uma grande problemática pelo fato de não existir um uso, e sem aproveitamento, sua destinação é continuar armazenado. Ademais, as barragens são normalmente, obras de engenharia de grande porte, dando origem a impactos ambientais desde a sua construção, que poderão persistir até mesmo após a sua desativação (ANDRADE, 2014). Podendo ocasionar grandes danos em decorrência de seu rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento.

No Brasil, em setembro de 2014, o rompimento de uma barragem de rejeitos de uma mineradora, localizada no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, deixou mortos e feridos. Causando graves impactos ambientais em córregos da bacia hidrográfica do Rio das Velhas que abastece a região metropolitana de Belo Horizonte (CRUZ, 2014).

Segundo Cruz Neto (2014) os trabalhadores do Assentamento Cinturão Verde, nas proximidades da Mina de Buritirama, no complexo mineiro da Região dos Carajás no estado do Pará, alegam que, no período chuvoso, os rejeitos provenientes da lavagem do minério de manganês têm alcançado os cursos d'água do rio Itacaiúnas impossibilitando o seu uso. As imagens aéreas da Serra de Buritirama (FIGURA 2.2 e 2.3) mostram a proximidade das barragens de rejeito com o rio Itacaiúnas.



Figura 2.2 - Imagem aérea da Serra de Buritirama  
Fonte: <http://www.mineracaoburitirama.com.br/buritirama>



Figura 2.3 - Imagem da Serra Buritirama

Fonte: <https://www.google.com.br/maps/place/>

O Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), afirma que as barragens de rejeito apresentam riscos significativos no que diz respeito à estabilidade e ruptura, interferência nas águas subterrâneas, restrições para uso futuro e falha no sistema de cobertura e drenagem. E vem propondo recomendações para o adequado gerenciamento dessas barragens (IBRAM, 2013).

Podemos evidenciar no Brasil algumas normas de regulamentação das ações com vistas à segurança e minimização de impactos ambientais em todas as fases da vida útil de uma barragem, tais como:

- Lei Federal n. 6938/81 - estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) e inclui, em seu Art. 18, a Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) como parte integrante do processo de licenciamento de atividades e empreendimentos efetiva ou potencialmente poluidores ou causadores de degradação ambiental;
- Resolução CONAMA n. 01/86 - estabelece critérios básicos e diretrizes para o uso e implementação da AIA.
- Lei Federal n. 12334/10 - estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

### 2.1.8. Aproveitamento de rejeito de Manganês

Cavalcante et al. (2012) cita no relatório de pesquisa dos resíduos sólidos da atividade de mineração, no decênio 1996-2005, que a produção total de rejeito de manganês foi de 2.567 milhões de toneladas e, que para o cenário da produção de rejeitos para o período 2010-2030 será de 36.071 milhões de toneladas.

Tão relevante é o tema em questão que o reaproveitamento dos rejeitos das barragens tem sido foco de discussões em empresas, órgãos ambientais e no meio acadêmico. A progressiva tendência mundial sobre sustentabilidade ambiental propicia o desenvolvimento científico. No ramo das engenharias, além da preocupação em melhorar processos produtivos, é evidente o esforço para reaproveitar resíduos e reduzir o impacto ambiental causado pela disposição destes na natureza.

Adentrando no estudo de reaproveitamento de rejeitos da mineração de manganês, os autores Lima, Vasconcelos e Silva (2008), estudaram a flotação para concentração de rejeito, utilizando o descarte com granulometria baixo de 0,106mm, conseguindo alcançar recuperação metalúrgica do manganês de até 63%, mas o enriquecimento máximo de 32% de Mn nos concentrados obtidos.

Rodrigues et al. (2014) visaram estudar os efeitos causados pela incorporação de rejeito de minério de manganês em formulações de cerâmica argilosa, para avaliar até que ponto é possível incorporar o referido rejeito sem que haja prejuízo das propriedades dos produtos. Foram propostas algumas formulações contendo quantidades variadas de rejeito. Os corpos de prova obtidos por prensagem foram sinterizados de 1000°C a 1200°C por 2 h. Os resultados mostraram que o rejeito atua como fundente, melhorando propriedades do material, diminuindo a porosidade e absorção de água e aumentando a resistência mecânica das peças cerâmicas.

Castro (2011) pesquisou a possibilidade de aplicação do rejeito de manganês como matéria prima de cerâmicas vermelhas, utilizadas para blocos de vedação. Onde, foram formuladas diferentes massas cerâmicas com teores de 0; 2,5; 5 e 10% em peso de adição de resíduo à argila utilizada comercialmente e sinterizadas em diferentes temperaturas, 850°C, 950°C e 1050°C. Os resultados apontaram que a adição de 10%, na queima a 1050°C, alcançaram aumentos de até 130% na resistência à flexão, tendo como valor de 29 MPa para cerâmica de referência, e de 66,7 MPa com adição de 10%. Outra abordagem, consistiu na possibilidade de diminuir a temperatura de queima para 850°C, como consequente redução de

energia dispendida para produção da cerâmica, obtendo ainda um aumento na resistência à flexão para 36,6 MPa. A autora concluiu que a adição do rejeito de manganês à massa cerâmica, para produção de cerâmica vermelha, mostrou-se viável do ponto de vista técnico.

Nascimento (2015) analisou as propriedades mecânicas e durabilidade de tijolo de solo cimento com adição do rejeito de manganês. Os resultados mostraram-se promissores por atender aos requisitos definidos pela norma NBR 8491 (ABNT, 2012) apresentando valores de compressão simples superiores individualmente a 1,75 MPa, valores de absorção de água inferiores à 20% e insignificante variação dimensional, o autor ainda demonstrou sua adequação às principais intempéries da região na radiação ultravioleta e umidade de acordo com os resultados obtidos no ensaio em câmara de envelhecimento acelerado, onde observou que quantidades desprezíveis de material se desprendem do tijolo solo-cimento após dias de exposição e caso exposto às intemperes apresentaria “resistência” satisfatória e mínimas chances de liberar ao meio ambiente o rejeito mineral.

Salguero et al. (2014) estudaram uma aplicação para os rejeitos da exploração de minérios de manganês do Cinturão da Península Ibérica, na produção de concreto. Utilizaram o rejeito de manganês em forma de pó substituindo 20% por parte do agregado miúdo. Foram feitos estudos comparativos entre as amostras de referência e as amostras com a nova substituição.

As tabelas 2.5 e 2.6 apresentam respectivamente as dosagens das amostras de referência e de substituição e a composição química do rejeito de Mn.

Tabela 2.5 - Dosagens

| <b>Dosagem/<br/>m<sup>3</sup></b> | Cimento<br>(Kg) | Água<br>(L) | A/C  | Agregado<br>graúdo | Agregado<br>miúdo | Substituição<br>Mn (Kg) | Superplastificante<br>(kg) |
|-----------------------------------|-----------------|-------------|------|--------------------|-------------------|-------------------------|----------------------------|
| <b>Referência</b>                 | 375             | 165         | 0,44 | 925,8              | 995,7             | -                       | 4,69                       |
| <b>Substituição<br/>de Mn</b>     | 375             | 165         | 0,44 | 925,8              | 796,6             | 199,1                   | 4,69                       |

Fonte: Salguero et al. (2014)

Tabela 2.6 - Composição Química do rejeito de Mn

| <b>Amostra</b> | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | MgO  | K <sub>2</sub> O | CaO  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | TiO <sub>2</sub> | MnO  |
|----------------|------------------|--------------------------------|-------------------|------|------------------|------|-------------------------------|------------------|------|
| <b>% massa</b> | 36,09            | 6,56                           | 0,12              | 3,81 | 1,57             | 12,4 | 0,08                          | 0,05             | 15,7 |

Fonte: Salguero et al. (2014)

Os testes experimentais indicaram a adequação do novo material para aplicação, principalmente quanto a resistência à compressão. A amostra com substituição atingiu maior resistência à compressão (56,44 MPa) aos 28 dias, em relação a amostra de referência (41,03 MPa) aos 28 dias. Os autores concluíram que as experiências dos ensaios demonstraram que o rejeito de Mn proporciona melhores propriedades ao concreto, e sugeriram o reaproveitamento deste rejeito no setor de construções rodoviárias, por serem um grande consumidor de concreto e pelas aplicações serem com baixas exigências estruturais. E o reaproveitamento deste rejeito mineral que até então estava estocado nas barragens do Cinturão da Península Ibérica e sem destino, contribuirá para eliminar a degradação ambiental.

Yang et al. (2014) investigaram a possibilidade de utilização de resíduo de manganês eletrolítico (EMR) para preparos de concreto de cimento de enxofre (SC), foram feitos estudos em argamassas de cimento de enxofre e argamassas de cimento Portland. Foram discutidas as propriedades mecânicas, microestrutura e durabilidade. Os resultados da microestrutura indicaram que o resíduo de manganês eletrolítico e os agregados foram envoltos de forma apertada por uma estrutura de empacotamento de partículas formadora de enxofre modificada hidrofóbicamente. As novas amostras de concreto sulforoso apresentaram alta resistência mecânica e excelente durabilidade ambiental.

O EMR é resíduo sólido produzido em filtros após a lixiviação de ácido sulfúrico de minério de carbonato de manganês,  $MnO_2$ , onde ocorre desferrização oxidativa e neutralização da amônia.

Concretos de enxofre (SC) e argamassas são materiais compósitos termoplásticos de alto desempenho, alta resistência e resistência à fadiga, feitos de agregado mineral, enchimento (fíler) e com enxofre como aglutinante e temperatura acima do ponto de endurecimento de enxofre (120°C) (Hills, 1993, *apud* YANG ET AL., 2014). Diferente do tradicional Concreto de Cimento Portland (PCC), o concreto de enxofre tem a permeabilidade muito baixa da água e a resistência excepcional aos ácidos e aos agentes do sal.

As tabelas 2.7 e 2.8 apresentam as dosagens das argamassas produzidas com enxofre modificado e a argamassa de referência produzida com cimento Portland e a composição química do EMR e da areia.

Tabela 2.7 - Dosagem de diferentes amostras

| Amostra    | Enxofre (%) | EMR (%) | Areia (%) | Cimento (%) | Água (%) | Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> ) |
|------------|-------------|---------|-----------|-------------|----------|---|
| S1         | 45          | 35      | 20        | -           | -        | 2,23                                    |
| S2         | 45          | 30      | 25        | -           | -        | 2,25                                    |
| S3         | 45          | 25      | 30        | -           | -        | 2,20                                    |
| S4         | 50          | 30      | 20        | -           | -        | 2,04                                    |
| S5         | 50          | 25      | 25        | -           | -        | 2,09                                    |
| S6         | 50          | 20      | 30        | -           | -        | 2,05                                    |
| S7         | 55          | 30      | 15        | -           | -        | 1,90                                    |
| S8         | 55          | 25      | 20        | -           | -        | 1,97                                    |
| S9         | 55          | 20      | 25        | -           | -        | 1,94                                    |
| Referência | -           | -       | 55        | 30          | 15       | 2,23                                    |

Fonte: Yang et al. (2014)

Tabela 2.8 - Composição química (% em massa)

| Material | Composição Química (%) |                                |                                |                 |       |       |                  |
|----------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------|-------|------------------|
|          | SiO <sub>2</sub>       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | CaO   | MgO   | MnO <sub>2</sub> |
| EMR      | 41,24                  | 19,10                          | 12,58                          | 10,62           | 8,40  | 2,00  | 4,11             |
| Areia    | 94,548                 | 2,525                          | 0,703                          | -               | 0,594 | 0,334 | -                |

Fonte: Yang et al. (2014)

Os resultados da microestrutura indicaram que o EMR e os agregados foram envoltos de forma apertada por uma estrutura de empacotamento de partículas formadoras de enxofre modificada hidrofóticamente. As amostras com EMR produzidas obtiveram resistências à compressão e flexão de cerca de 48, 89-63, 17 MPa e 7, 12-9, 47 MPa, respectivamente. O material SC fabricado tem alta resistência à permeação de soluções ácidas ou alcalinas, devido à hidrofobicidade do enxofre e boas propriedades de dispersão de EMR em solvente sólido de enxofre. O teste de lixiviação mostrou que o conteúdo de íons de metais pesados estava abaixo dos limites dos Padrões Nacionais de Descarga de Água Residual Integrada na China (GB 8978-1996). Os autores comentaram que a pesquisa desenvolveu uma técnica ecológica e eficaz para o uso de resíduo de manganês eletrolítico como matéria-prima de cimento de enxofre, e que o material desenvolvido também é um bom candidato para

instalações subterrâneas pela indústria da construção e estabilização de resíduos sólidos em um sistema de barreira de resíduos (YANG ET AL., 2014).

### 2.1.9. Emprego de rejeitos das atividades de mineração na construção civil

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal nº 12305/2010, a disposição final de resíduos no meio ambiente deve ser empregada somente como o último recurso. Neste sentido, dentro de um plano gerenciamento de resíduos, a que estão sujeitos todos os empreendimentos minerários (art. 20, inciso I da PNRS), as barragens de rejeito devem ser vistas como alternativas provisórias para o armazenamento e não como uma solução ambiental final para os resíduos sólidos gerados na mineração.

Peixoto<sup>2</sup> comenta que “a mineração é de uma magnitude inacreditável. Quando se fala em geração de rejeito, que vai para as barragens, nas minerações de pequeno porte, estamos falando em algo em torno de 400 toneladas de rejeito por dia. Não conseguimos reaproveitar todo o rejeito de mineração porque a ordem de grandeza é gigante, mas conseguimos colocar essa condição do rejeito em maior segurança”.

Coelho (2008), pesquisando a utilização de rejeitos de atividade de mineração de ferro, afirma que os rejeitos constituem materiais potencialmente interessantes para a construção civil, desde que atendidas as premissas de melhoria de suas propriedades geotécnicas.

As características químicas destes resíduos, por exemplo, são muito próximas às requeridas para fabricação de produtos de cerâmica. A fabricação de pavimento e substituição dos agregados para concreto são também opções para as quais a composição química não é muito rigorosa, tendo maior importância a granulometria e a resistência do material e podem ser avaliados para utilização na construção civil. Por fim, entre outros usos, pode-se avaliar a aplicação dos rejeitos para fabricação do cimento, uma vez que o alto teor de ferro no cimento pode eliminar a incorporação do ferro em pó no cimento convencional (ZHANG et al., 2006, *apud* ANDRADE, 2014).

---

<sup>2</sup> Ricardo André Fiorotti Peixoto. Coordenador do departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto. Texto extraído de uma entrevista lida no site <https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2015/12/02/rejeitos-de-barragens-podem-ser-usados-na-construcao-civil.htm>.

Yellishetty et al. (2008) analisaram a adequação de resíduos da mineração de ferro, considerando tanto o material gerado antes do processamento do minério, chamado estéril, quanto o material gerado depois do beneficiamento do minério, o rejeito, de uma mina de ferro da Índia para uso na construção civil. Os autores concluíram que as partículas com granulometria de 12,5 a 20 mm são bastante adequadas para uso na fabricação de concreto. As partículas com granulometria entre 4,75 a 12,5 também foram avaliadas com êxito quando utilizadas como areia para obras de construção diversas. Por fim, as partículas inferiores a 4,75 mm se mostraram bastante adequadas à fabricação de tijolos.

Chao Li et al. (2010) investigaram a possibilidade de utilizar os rejeitos de minério de ferro como matéria prima para a preparação de material cimentício, abreviado como TSC, incluindo análises de suas propriedades mecânicas e propriedades físicas. O TSC1 foi preparado misturando 30 % de rejeito de ferro, 34% de escória de alto forno, 30% de clínquer e 6% de gesso. Os resultados mostraram que a caulinita do rejeito de ferro foi decomposta completamente após a magnetização da torrefação, o que promoveu a propriedade cimentícia do TSC1. Além disso, as propriedades mecânicas do TSC1 são semelhantes com as do cimento Portland TSC, de acordo com a norma chinesa padrão GB 175-2007. Os autores na sua conclusão confirmaram por meio das propriedades mecânicas e físicas a utilidade do TSC1, indicando que é possível usar o rejeito de ferro para substituir até 30% das matérias primas para produzir material cimentício. Ocasionalmente importantes significados ambientais e econômicos, pois, o TSC1 produzido pode não só consumir grandes quantidades de rejeitos de minérios de ferro, mas também economizar muitos recursos naturais para o clínquer, como calcário e fonte de ferro em particular e assim diminuindo os custos de produção do cimento.

Pesquisas incluindo o concreto, material de construção mais utilizado na sociedade moderna, têm sido realizados igualmente visando o reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro. Aitcin (2009) afirma que nos dias de hoje cada vez mais tem-se aceitado a incorporação de diferentes minerais e materiais na composição do concreto. Além disso, nota-se que o concreto e o cimento estão evoluindo no que diz respeito ao meio ambiente dentro de uma perspectiva de desenvolvimento sustentável e que isto se deve ao fato de mais componentes alternativos terem sido adicionados ao clínquer.

Toffolo et al. (2014) estudaram a aplicação dos rejeitos das barragens de minério de ferro como agregados para a produção dos blocos de concreto de pavimentação. O estudo comparativo das características físicas e mecânicas de blocos de concreto para pavimentação

fabricados com substituição de 10%, 50% e 80% do agregado miúdo por rejeito de ferro, em dosagens específicas, indicaram bons resultados de resistência à compressão, expansibilidade, absorção de água e apontaram a viabilidade do emprego de agregados artificiais provenientes da reciclagem do rejeito de mineração para a fabricação destes blocos.

Aristimunho e Bertocini (2012) estudaram a aplicação de lama de minério de ferro em forma de pó em argamassa de cimento Portland. O traço de referência foi elaborado com argamassa composta por uma parte de cimento e três de areia e com relação água/cimento de 0,60. E os ensaios foram divididos em três grupos, sendo eles: grupo I, foi elaborado fazendo-se diferentes adições de minério de ferro em pó em relação à massa de cimento do traço de referência. Realizaram-se adições de 4%, 6%, 8% e 20% (% em massa). O grupo II foi elaborado fazendo-se diferentes substituições da areia por minério de ferro em pó. Realizaram-se substituições de 20%, 60% e 100% da areia (% em massa). O grupo III foi elaborado fazendo-se diferentes substituições do cimento por minério de ferro em pó. Realizaram-se substituições de 10%, 20% e 30% do cimento (% em massa). Os autores concluíram que o aproveitamento da lama de minério de ferro na forma de pó em argamassa é viável tecnicamente, apresentando melhor comportamento mecânico quando aplicado em adição de 8% (1: 3: 0,08) e em substituição de 20% da areia (1: 2,4: 0,6). Por outro lado, as três substituições do cimento obtiveram resistências inferiores à referência.

Huang et al. (2013) estudaram a viabilidade de utilizar rejeitos de minério de ferro em pó (IOTs) para desenvolver compostos de cimento (ECCs) mais sustentáveis. A ECC é uma classe única de compostos de cimento reforçados com fibras de alta performance com alta ductilidade e durabilidade. Os cimentos de alta performance usados no ECC limitam o desenvolvimento sustentável do material e aumentam o custo do material comparado com o concreto normal. Os IOTs foram usados para substituir parcialmente o cimento, em 40% e 80%. A tabela 2.9 apresenta a análise química e a figura 2.4 mostra a difração de raio-x do rejeito do minério de ferro (IOTs).

Tabela 2.9 - Análise química dos IOTs

| <b>Amostra</b> | SiO <sub>2</sub> | CaO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> |
|----------------|------------------|------|--------------------------------|------|--------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| <b>% massa</b> | 69,52            | 4,14 | 7,44                           | 3,72 | 8,13                           | 1,38              | 1,97             | 0,03            |

Fonte: Huang, et al. (2013)

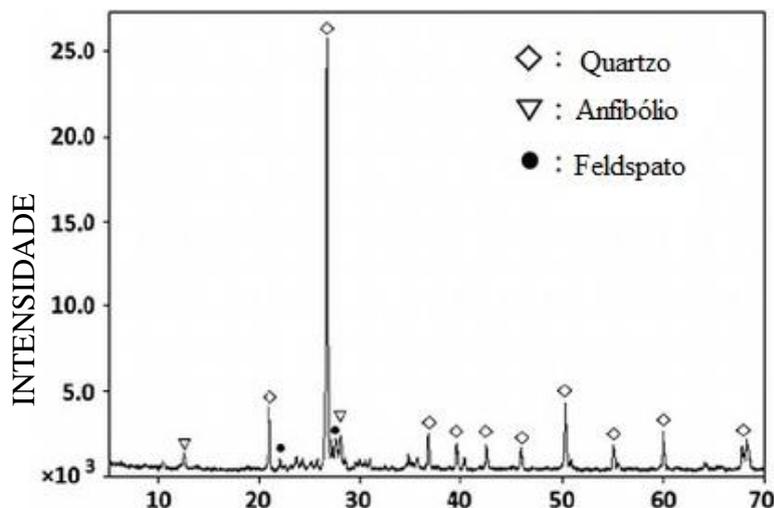


Figura 2.4 - Difração de raio-x dos IOTs

Fonte: Huang, et al. (2013)

Os resultados demonstraram viabilidade na incorporação do IOTs para desenvolver ECC mais sustentáveis, pois mantém as características de ductibilidade e durabilidade, assim como melhoram a sustentabilidade do material. Os autores concluíram que o ECC sustentável apresenta uma capacidade de tensão de resistência à tração de 5,1 a 6,0 Mpa e resistência à compressão de 46 a 57 MPa aos 28 dias. O teor de cimento do ECC sustentável é reduzido para 117,2 a 350,2 kg por m<sup>3</sup> o que é próximo ou até mesmo inferior ao teor de cimento no concreto normal. A substituição de cimento por IOTs resulta em uma redução de 10 a 32% no consumo de energia e uma redução de 29 a 63% em emissões de dióxido de carbono no ECC sustentável em comparação ao ECC típico.

Analisando o panorama apresentado os impactos sociais e ambientais advindos da disposição final de rejeitos em barragens; a redução da disponibilidade e qualidade de materiais naturais para empresas da mineração e de construção civil; e os resultados satisfatórios obtidos na utilização de rejeitos de mineração como materiais da construção, vislumbra-se um cenário bastante favorável para solução ambiental das barragens de rejeito e o aproveitamento dos resíduos sólidos presentes.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Procurando estabelecer a alternativa mais adequada para utilização do rejeito de manganês como material de construção civil, o planejamento experimental foi dividido em 3 etapas.

A etapa 1 constituiu da caracterização dos materiais utilizados na produção de argamassas e concretos desta pesquisa. Realizou-se a caracterização física, química, mineralógica, ambiental e de reatividade do rejeito de manganês para investigar uso potencial como pozolana, ou, se como areia, sua reação álcali agregado.

A etapa 2 investigou a capacidade de aproveitamento do rejeito de manganês moído como fíler ao cimento Portland na produção de argamassas com substituição em massa de 6, 8 e 10%, onde avaliou-se sua resistência à compressão aos 28 dias, absorção de água total e índice de vazios.

A etapa 3 empregou o rejeito de manganês como agregado miúdo no concreto com substituição em massa de 15, 20, 25 e 30%, onde considerou a caracterização do rejeito in natura. Avaliou-se sua resistência à compressão, sua resistência à tração por compressão diametral, seu módulo de elasticidade aos 28 dias, absorção de água por capilaridade e análise microscópica eletrônica de varredura (MEV). Para nortear o estudo, foram desenvolvidos organogramas com os planejamentos da pesquisa, os quais são apresentados nas Figuras 3.1 e 3.2.

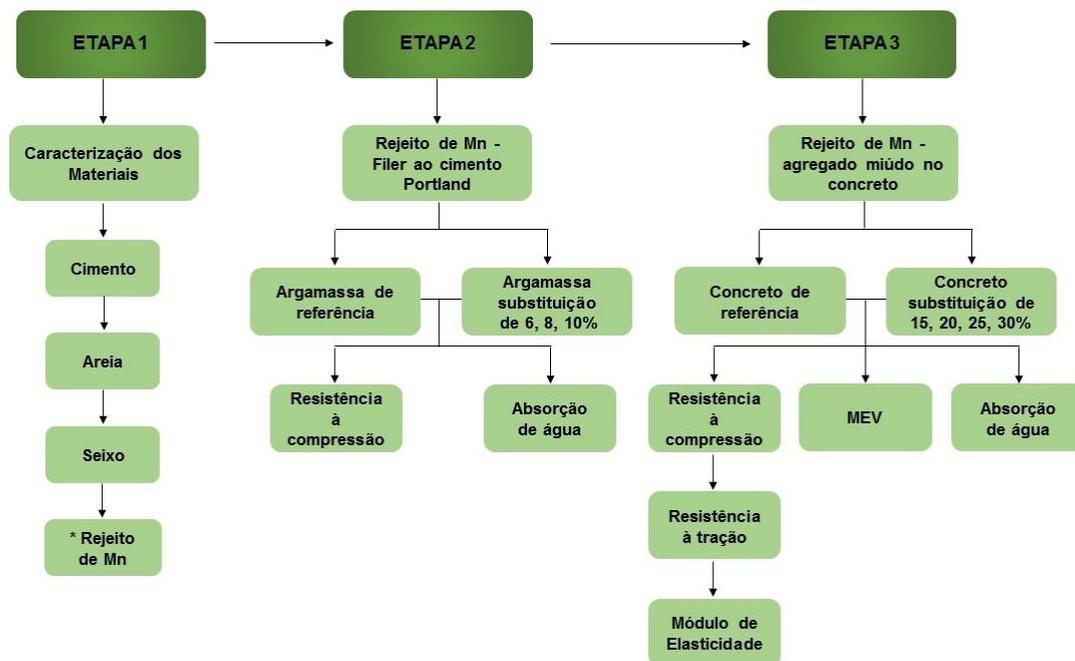


Figura 3.1 - Organograma de planejamento da pesquisa

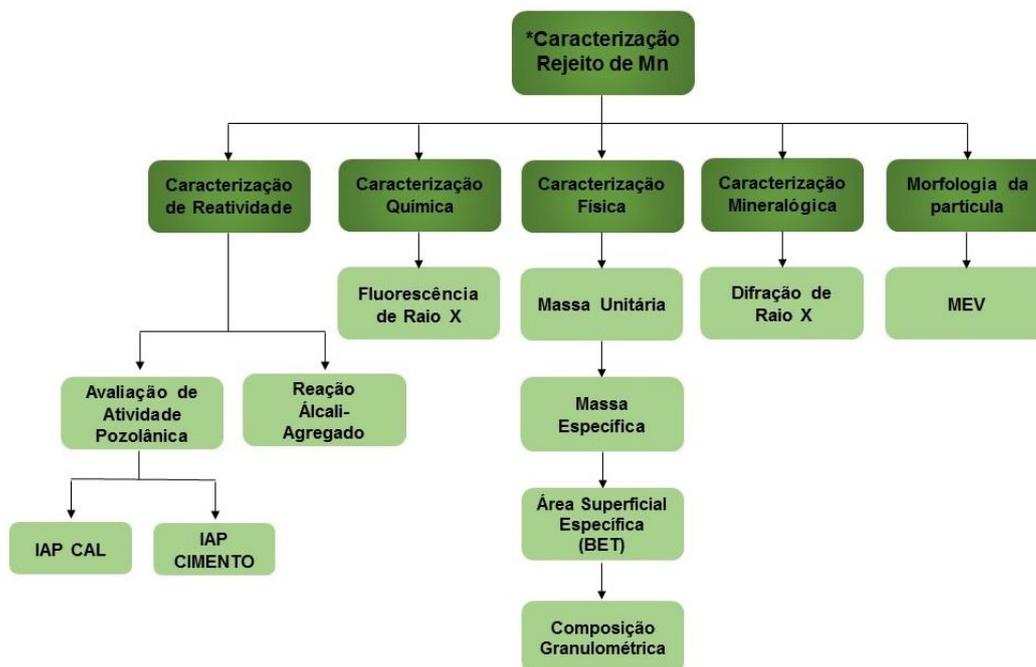


Figura 3.2 - Organograma da caracterização do rejeito Mn

## 3.2. ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 3.2.1. Cimento Portland

Nesta pesquisa foram adotados dois tipos distintos de cimentos um primeiro para a investigação do uso do rejeito de manganês como fíler no cimento, optou-se por utilizar o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI) devido sua pureza e possuir apenas de 0 a 5% de material carbonático e assim poder analisar os efeitos da substituição parcial do cimento por rejeito de manganês. Para caracterização deste cimento utilizou-se a norma NBR NM 23 (ABNT 2001) e determinou-se sua massa específica de 3,09 g/cm<sup>3</sup>.

Quanto ao estudo da aplicação do rejeito de manganês como agregado miúdo na confecção de concretos, optou-se por utilizar o cimento Portland tipo CP-IV 32 (Cimento Portland Pozolânico) especificado pela NBR 5736 (ABNT, 1999) com massa específica de 3,10 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.2.2. Agregado Graúdo

Foi utilizado na confecção dos concretos o agregado graúdo natural de origem silicosa, nomeado de seixo rolado e que atende aos requisitos descritos na NBR 7211 (ABNT, 2009) quanto aos parâmetros avaliados. A tabela 3.1 indica os resultados dos ensaios de caracterização deste agregado.

Tabela 3.1 – Caracterização do Agregado Graúdo

| <b>Agregado Graúdo (Seixo)</b>    |                         |                        |                           |                        |
|-----------------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|
| <b>Abertura das Peneiras (mm)</b> | <b>Massa Retida (g)</b> | <b>% Retida</b>        | <b>% Retida Acumulada</b> | <b>Norma de Ensaio</b> |
| 75                                | 0                       | 0,00                   | 0,00                      |                        |
| 37,5                              | 0                       | 0,00                   | 0,00                      |                        |
| 19                                | 0                       | 0,00                   | 0,00                      |                        |
| 9,5                               | 860                     | 43,00                  | 43,00                     |                        |
| 4,75                              | 840                     | 42,00                  | 85,00                     |                        |
| 2,36                              | 273                     | 13,65                  | 98,65                     | ABNT NBR NM 248 (2003) |
| 1,18                              | 13                      | 0,65                   | 99,30                     |                        |
| 0,6                               | 5                       | 0,25                   | 99,55                     |                        |
| 0,3                               | 2                       | 0,10                   | 99,65                     |                        |
| 0,15                              | 3                       | 0,15                   | 99,80                     |                        |
| Fundo                             | 4                       | 0,20                   | 100,00                    |                        |
|                                   | 2000                    | 100                    |                           |                        |
| Massa Específica                  |                         | 2,63 g/cm <sup>3</sup> |                           | ABNT NBR NM 53 (2009)  |
| Massa Unitária                    |                         | 1,50 g/cm <sup>3</sup> |                           | ABNT NBR NM 45 (2006)  |
| Módulo de Finura                  |                         | 6,25 mm                |                           | ABNT NBR NM 248 (2003) |
| Dimensão Máxima                   |                         | 19 mm                  |                           | ABNT NBR NM 248 (2003) |

### 3.2.3. Agregado Miúdo

Utilizou-se areia proveniente dos leitos dos rios próximos à cidade de Belém para a confecção das argamassas e concretos. Essa areia passou pelo processo de secagem, com o auxílio de estufa e foi armazenada em tonéis. Para efeito de caracterização foi determinada sua massa unitária e índice de vazios NBR NM 45 (ABNT, 2006), composição granulométrica NBR NM 248 (ABNT, 2003) e massa específica segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009) conforme apresentado na Tabela 3.2 e na Figura 3.3 compara-se a curva granulométrica do agregado miúdo com os limites das zonas granulométricas.

Tabela 3.2 – Caracterização do agregado miúdo natural

| Agregado Miúdo (areia)     |                  |                        |                    |                        |
|----------------------------|------------------|------------------------|--------------------|------------------------|
| Abertura das Peneiras (mm) | Massa Retida (g) | % Retida               | % Retida Acumulada | Norma de Ensaio        |
| 4,75                       | 0                | 0,00                   | 0                  | ABNT NBR NM 248 (2003) |
| 2,36                       | 10,03            | 1,01                   | 1,01               |                        |
| 1,18                       | 54,23            | 5,44                   | 6,45               |                        |
| 0,6                        | 123,59           | 12,40                  | 18,85              |                        |
| 0,3                        | 570,54           | 57,24                  | 76,09              |                        |
| 0,15                       | 163,4            | 16,39                  | 92,49              |                        |
| 0,075                      | 35,88            | 3,60                   | 96,09              |                        |
| Fundo                      | 39               | 3,91                   | 100,00             |                        |
|                            | 996,67           | 99,67                  |                    |                        |
| Massa Específica           |                  | 2,57 g/cm <sup>3</sup> |                    | ABNT NBR NM 52 (2009)  |
| Massa Unitária             |                  | 1,61 g/cm <sup>3</sup> |                    | ABNT NBR NM 45 (2006)  |
| Módulo de Finura           |                  | 1,95 mm                |                    | ABNT NBR NM 248 (2003) |
| Dimensão Máxima            |                  | 2,36 mm                |                    | ABNT NBR NM 248 (2003) |
| Índice de Vazios           |                  | 37%                    |                    | ABNT NBR NM 45 (2006)  |
| Fator de empacotamento     |                  | 63%                    |                    | ABNT NBR NM 45 (2006)  |

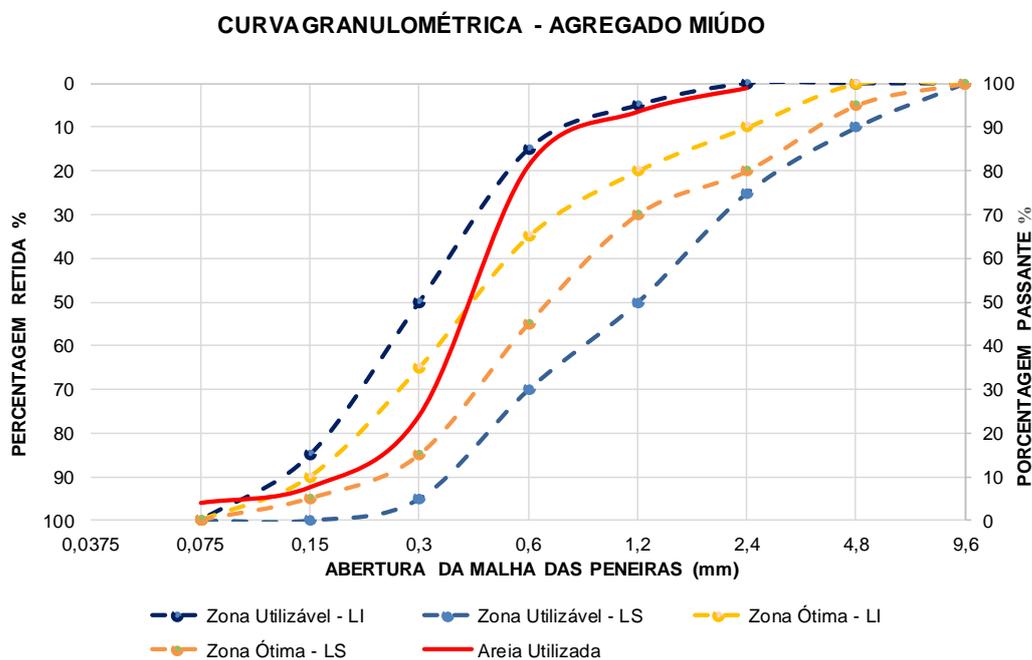


Figura 3.3 - Curva granulométrica do agregado miúdo e limites da NBR NM 7211 (ABNT, 2009).

Pelos resultados obtidos observa-se que o agregado miúdo natural apresenta uma distribuição contínua, variando entre as zonas utilizáveis e ótimas. Foi empregada também nessa pesquisa a areia normatizada para a realização dos ensaios de atividade pozolânica com cal (NBR NM 5751, 2015) e com cimento Portland (NBR NM 5752, 2014). A produção de areia normal brasileira obedece à norma NBR 7214 (ABNT, 2015). De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), único a produzir esse material no Brasil, a areia normal brasileira é certificada por meio de ensaios granulométricos e petrográficos dos componentes. É classificada em quatro frações granulométricas, ou seja, material retido entre peneiras de abertura nominal de 2,4 mm e 1,2 mm (grossa); 1,2 mm e 0,6 mm (média grossa); 0,6 mm e 0,3 mm (média fina) e 0,3 mm e 0,15 mm (fina).

#### 3.2.4. Água

Utilizou-se água potável com temperatura de 28°C e pH 6,0 oriunda da Universidade Federal do Pará que atualmente produz sua água. Portanto, o abastecimento hídrico da universidade oferece água válida para a produção de concretos.

#### 3.2.5. Aditivo

Empregou-se na produção das argamassas aditivo super plastificante, à base de sais sulfonados e carboidratos em meio aquoso, densidade de  $1,20 \pm 0,02$  kg/litro, PH  $8,5 \pm 1,0$  com dosagem recomendada pelo fabricante de 0,30 a 2% sobre a massa do aglomerante (cimento Portland). E para a confecção dos concretos utilizou-se aditivo super plastificante de terceira geração, baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, densidade de  $1,067 - 1,107$  g/cm<sup>3</sup>, PH aproximado de 6,6 (20 °C).

#### 3.2.6. Rejeito de manganês

##### 3.2.6.1. Amostragem

###### ❖ Procedência

O rejeito mineral utilizado nesta pesquisa é oriundo da exploração de manganês da região Sudeste do estado do Pará. A amostra foi retirada das barragens, na Serra de Buritirama, local onde é extraído o minério e acumula-se o rejeito conforme ilustrado nas Figura 3.4(a) e 3.4 (b). As minas estão localizadas na bacia do Rio Itacaiúnas que deságua na

região entre as latitudes  $5^{\circ}29'16''\text{S}$  -  $5^{\circ}51'39''\text{S}$  e longitudes  $49^{\circ}28'13''\text{W}$  -  $50^{\circ}17'30''\text{W}$  (MINERAÇÃO BURITIRAMA S.A, 2016).



Figura 3.4 - Lavra na Serra de Buritirama (A); Rejeito de Mn (B)

Fonte: <http://www.mineracaoburitirama.com.br/buritirama/>

#### ❖ Coleta da Amostra

Do volume de rejeito de manganês gerado pela Mineração Buritirama coletou-se uma amostra segundo as prescrições da NBR 10007 (ABNT, 2004) que trata da amostragem de resíduos sólidos. Aproximadamente 80 kg de amostra foram retiradas com permissão do diretor da mineradora e enviadas para o Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA), onde foram armazenadas em recipientes plásticos para serem utilizadas nesta pesquisa.

#### ❖ Preparação das amostras

No laboratório o rejeito de manganês permaneceu em estufa à temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$  por 24 horas para obtenção de constância da massa. Para se promover uma caracterização completa do rejeito de manganês, as amostras foram divididas em dois grupos distintos: grupo 01 - rejeito de manganês in natura (retirado da barragem) para confecção do concreto e grupo 02 - rejeito de manganês (processado em moinho de bolas) para reaproveitamento como fíler no cimento Portland.

No grupo 02, foram retirados 10 quilogramas (kg) das amostras que passaram por um processo de moagem a seco no moinho de bolas da marca EMIC com velocidade de 12 RPM. Esse tipo de moagem é largamente utilizado para a redução do tamanho das partículas de um material, pois a granulometria é um fator importante na reatividade da pozolana e também no efeito fíler quando adicionada ao cimento, argamassas e concretos.

A realização do processo de moagem foi executada com base na aplicação feita por Pouey (2006), onde foram empregadas a proporção de 5 kg de bolas para 1 kg do material a ser moído. A quantidade de bolas foi dividida em 2/3 de bolas pequenas e 1/3 de bolas grandes, visto que as bolas menores possuem maior potencial de moagem.

Os tempos de moagem foram preestabelecidos em 1, 2, 3 e 4 horas, buscando identificar por meio do ensaio de granulometria à laser, o tempo suficiente para obter a granulometria desejada, isto é, diâmetro igual ou menor que ao do cimento (POUEY, 2006). Com o resultado da granulometria à laser, foram moídos o restante do material.

#### 3.2.6.2. Caracterização Física

As características físicas avaliadas no rejeito de manganês foram distribuição granulométrica, área superficial específica (BET), massa unitária e índice de vazios de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006) e massa específica (NBR NM 23, 2001).

Nesta pesquisa foram desenvolvidos dois métodos de distribuição granulométrica, a investigação do uso do rejeito de manganês como fíler no cimento Portland foi realizada por difração à laser buscando identificar a melhor granulometria desejada, as amostras foram moídas com tempo de 1 hora (RMn1), 2 horas (RMn2), 3 horas (RMn3) e 4 horas (RMn4).

A Figura 3.5 apresenta as curvas granulométricas do cimento Portland CP V e das amostras moídas do rejeito de manganês, com base nesta análise, identificou-se que a amostra RMn1 mais se aproxima com a granulometria do cimento, adotou-se esta para os ensaios. Para o rejeito de manganês ser utilizado como fíler, as partículas deveriam necessariamente ter dimensão igual ou inferior às partículas do cimento para atuarem como agente nucleador das fases hidratadas.

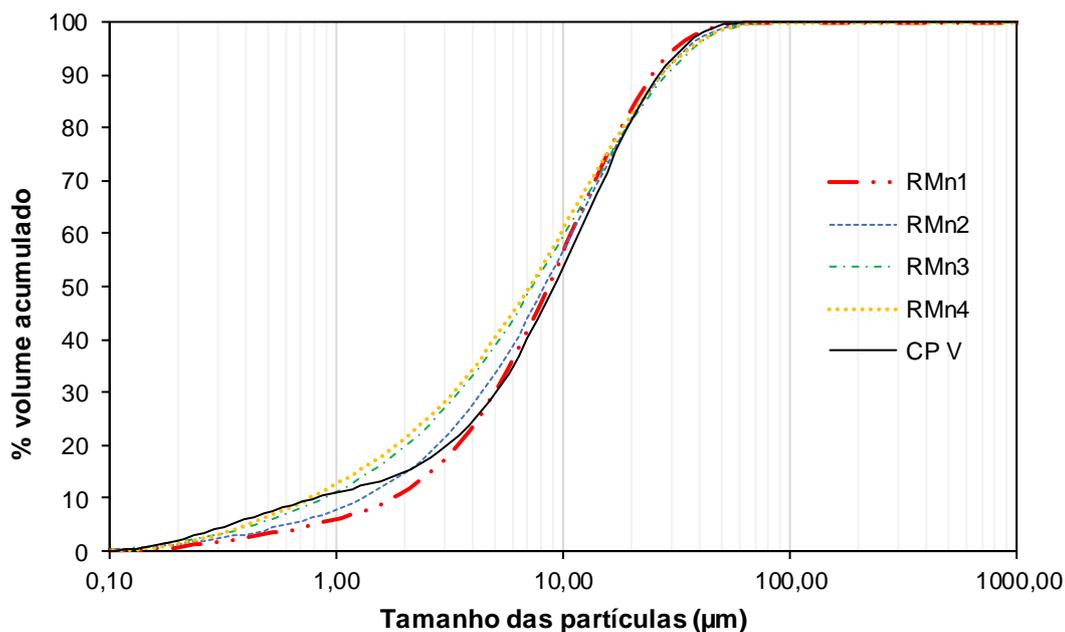


Figura 3.5 - Análise de granulometria à laser das amostras e cimento Portland CP V

Para análise técnica da utilização do rejeito de manganês como agregado miúdo na produção de concretos, foi realizado a composição granulométrica pelo método das peneiras de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). As tabelas 3.3 e 3.4 apresentam os resultados da caracterização física e a figura 3.6 mostra as curvas das análises granulométricas do agregado miúdo natural (areia), rejeito de manganês e da mistura composta por 70% de AMN e 30% de rejeito, sendo este percentual o máximo utilizado na substituição do AMN por rejeito de Mn, apresentam-se dentro das faixas das zonas utilizáveis proposta pela NBR NM 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 3.3 – Granulometria do Rejeito de Mn como agregado miúdo

| Granulometria do Rejeito de Mn |                  |          |                    |                           |
|--------------------------------|------------------|----------|--------------------|---------------------------|
| Abertura das Peneiras (mm)     | Massa Retida (g) | % Retida | % Retida Acumulada | Norma de Ensaio           |
| 4,75                           | 26,08            | 2,61     | 2,61               | ABNT NBR NM 248<br>(2003) |
| 2,36                           | 188,85           | 18,91    | 21,53              |                           |
| 1,18                           | 158,36           | 15,86    | 37,39              |                           |
| 0,6                            | 214,45           | 21,48    | 58,87              |                           |
| 0,3                            | 154,95           | 15,52    | 74,39              |                           |
| 0,15                           | 147,95           | 14,82    | 89,20              |                           |
| 0,075                          | 81,3             | 8,14     | 97,35              |                           |
| Fundo                          | 26,48            | 2,65     | 100,00             |                           |
|                                | 998,42           | 99,84    |                    |                           |

Tabela 3.4 – Características físicas do Rejeito de Mn como agregado miúdo

|                        |                        |                        |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| Massa Específica       | 3,84 g/cm <sup>3</sup> | ABNT NBR NM 52 (2009)  |
| Massa Unitária         | 1,63 g/cm <sup>3</sup> | ABNT NBR NM 45 (2006)  |
| Módulo de Finura       | 1,94 mm                | ABNT NBR NM 248 (2003) |
| Dimensão Máxima        | 4,75 mm                | ABNT NBR NM 248 (2003) |
| Índice de Vazios       | 57%                    | ABNT NBR NM 45 (2006)  |
| Fator de Empacotamento | 43%                    | ABNT NBR NM 45 (2006)  |

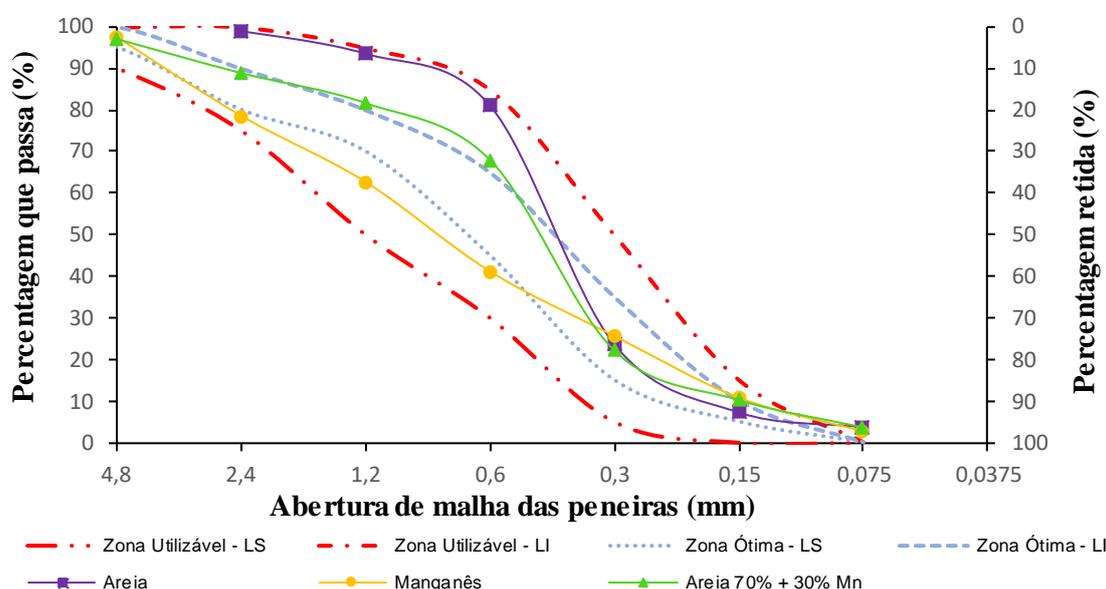


Figura 3.6 - Distribuição granulométrica das amostras e limites da NBR NM 7211 (ABNT, 2009).

A granulometria do rejeito de Mn apresenta distribuição contínua, embora muito próxima ao limite superior da zona utilizável. Por outro lado, nota-se, que a areia, possui uma distribuição mais uniforme, com maior percentual (57,24%) retido na peneira 0,3 mm, variando entre as zonas utilizáveis e ótimas, caracterizando um material com razoável graduação. Em contrapartida a substituição da areia por 30% de rejeito de manganês faz com que a mistura se torne menos uniforme em relação a areia, com melhor graduação dos grãos, com percentual superior (45,66 %) retido na peneira 0,3 mm.

A análise de área superficial específica, determinado pelo método B.E.T. (Brunauer Emmett Teller) por adsorção de nitrogênio, realizado no Laboratório de Análises Químicas do Instituto de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará. Tal método é baseado na

determinação da quantidade de nitrogênio gasoso necessário para cobrir a superfície de uma amostra. Desta forma, foram obtidos os resultados da área superficial específica e do volume dos poros (porosidade), apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Análise de área superficial específica (BET)

| <b>Amostras</b> | <b>Área Superficial Específica<br/>(m<sup>2</sup>/g)</b> | <b>Volume do Poro<br/>(cm<sup>3</sup>/g)</b> |
|-----------------|--|--|
| CP V            | 9,194  | 0,0012                                       |
| Rejeito de Mn*  | 15,0687  | 0,048  |

\* rejeito de Mn moído - 1 hora

De acordo com Bauer (2015) a área superficial específica serve para bem caracterizar a finura de um material granulado, tendo aplicação quase que somente em materiais de grande finura (cimento e fíler), logo, sua área B.E.T. será tanto maior quanto mais fino ele for. Assim, torna-se relevante sua investigação como fíler no cimento Portland, pois, é essencial que o material possua características uniformes, especialmente a finura (DAL MOLIN, 2005).

### 3.2.6.3. Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica do rejeito de manganês foi obtida por meio da Difração de Raios X (DRX), pelo método do pó, realizado no Laboratório de Análises Químicas do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará.

As análises foram realizadas em difratômetro modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), da PANalytical, com Goniômetro PW3050/60 ( $\Theta/\Theta$ ) e com tubo de raios-x cerâmico de anodo de Cu ( $K\alpha_1 = 1,540598 \text{ \AA}$ ), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200 W, 60 kv e filtro  $K\beta$  de Níquel. O detector utilizado foi do tipo RTMS, X'Celerator. A coleta dos difratogramas foi realizada com passo angular de  $0,02^\circ$  e o tempo por passo 0.5 s e intervalo de medida entre os ângulos de Bragg ( $2\theta$ ) de  $0^\circ$  e  $70^\circ$ . A aquisição dos dados foi feita com o software X'Pert Data Collector, versão 2.1a, e o tratamento dos dados com o software X'PertHighScore versão 2.1b, também da PANalytical.

A Difração de raio X é um ensaio que auxilia na avaliação da reatividade do material, foi executado com o propósito de se identificar as fases, amorfa ou cristalina, dos minerais que constituem o rejeito de manganês. Indicando, caso haja predominância da forma cristalina, baixa atividade e caso apresente-se amorfo, maior potencial pozolânico.

Os materiais com fases cristalinas caracterizam-se por apresentarem em seus difratogramas formas com intensa quantidade de picos, enquanto que os materiais com fases

amorfas se caracterizam por apresentarem curvas com formas abauladas e ausência de picos. Portanto, um material cristalino é aquele em que os átomos estão situados em um arranjo que se repete, ou periódico, ao longo de grandes distâncias atômicas (CALLISTER, 2014).

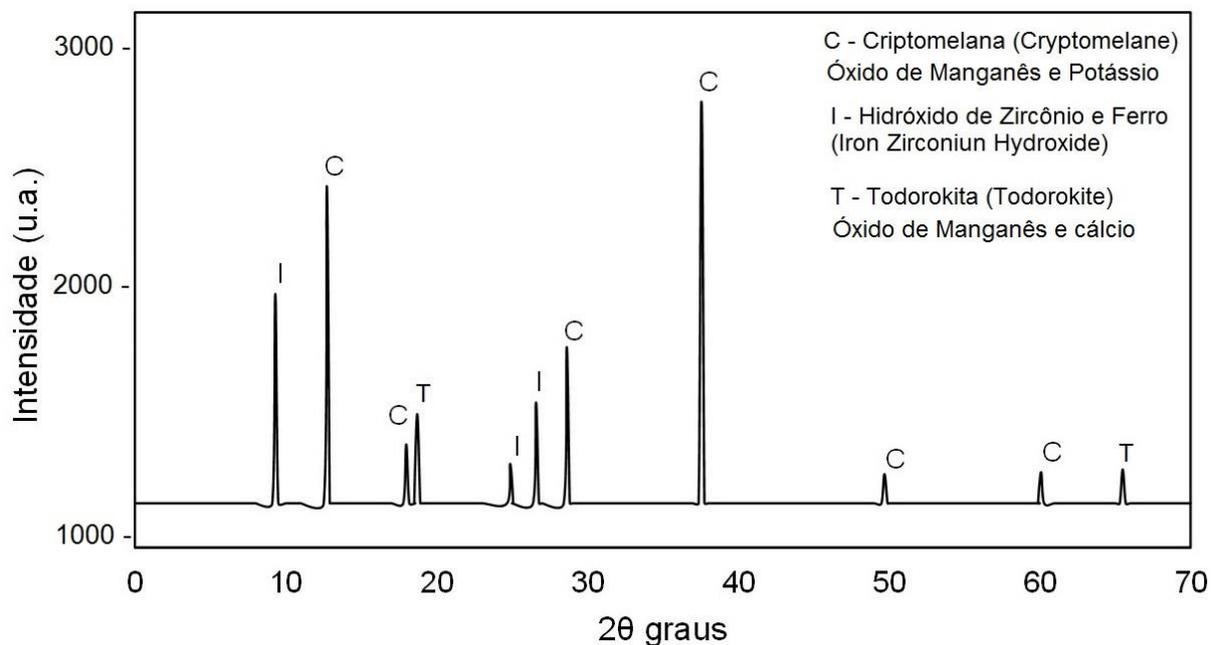


Figura 3.7 – Difratograma de raio x do rejeito de Mn

Observa-se na Figura 3.7 que o difratograma do rejeito de manganês apresenta inúmeros picos de difração, apresentando ser um material predominantemente cristalino, ou seja, que gera associações entre os átomos segundo as próprias afinidades em cristais. Portanto, o rejeito de Mn por ser um metal e todos os metais formam estrutura cristalina sob condições normais de solidificação (CALLISTER, 2014), irá apresentar-se como um material maciço e denso. Além disso, os picos caracterizam, qualitativamente, os principais minerais presentes na amostra, sendo eles: Criptomelana ( $\text{KMn}_8\text{O}_{16}$ ), Hidróxido de Zircônio e Ferro ( $\text{ZrFe}_{0,38}\text{H}_{1,24}(\text{PO}_4)_2 \cdot 2,8\text{H}_2\text{O}$ ) e Todorokita ( $\text{Mn, Ca} \text{Mn}_5\text{O}_{11} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ).

#### 3.2.6.4. Caracterização Química

Para validar a caracterização química da amostra do rejeito de manganês foi utilizada a análise por Fluorescência de Raios X (FRX), realizado no Laboratório de Análises Químicas do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará.

As análises foram realizadas por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X, utilizando espectrômetro WDS seqüencial, modelo Axios Minerals da marca PANalytical, com tubo de raios-X cerâmico, anodo de ródio (Rh) e máximo nível de potência 2,4 KW. Na preparação utilizou-se: Pastilha Prensada - 5 g de amostra + 1,5 g de aglomerante (cera de

parafina), respectivamente, a mistura foi prensada com uma carga de 20 toneladas. As aquisições e tratamento dos dados foram realizados por meio do software SuperQ Manager da PANalytical.

Na Tabela 3.6 é apresentada a análise química quantitativa do rejeito de manganês em função dos principais óxidos, obtida pelo método da fluorescência de raios-X (FRX). A partir deste ensaio podemos inferir que o rejeito não classifica-se como adição mineral pozolânica, pois a somatória de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  e a perda ao fogo não atendem as exigências químicas da NBR 12653 (ABNT, 2015) que é de no mínimo 70% da somatória para classes N e C e 50% para classe E, assim como o percentual máximo de perda ao fogo é de 10% para classe N e 6% para classes C e E.

Tabela 3.6 - Análise química do rejeito de Mn

| <b>Rejeito de Manganês</b>     |                |
|--------------------------------|----------------|
| <b>Componente</b>              | <b>% massa</b> |
| SiO <sub>2</sub>               | 6,38           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7,25           |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,68           |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,34           |
| MgO                            | 0,35           |
| BaO                            | 1,46           |
| K <sub>2</sub> O               | 2,29           |
| CaO                            | 0,21           |
| MnO                            | 60,46          |
| NiO                            | 0,20           |
| ZnO                            | 0,37           |
| Perda ao Fogo                  | 15,94          |

### 3.2.6.5. Morfologia da partícula

As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDS) foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura da marca LEO, modelo 1430 VP do Instituto de Geociências da UFPA, no Laboratório de Análises através do microscópio eletrônico de varredura. A Figura 3.8 mostra a morfologia do rejeito de manganês e os elementos químicos constituintes. Pode-se observar que as formas das partículas são irregulares, com textura superficial áspera (Fig. 3.8a e 3.8c) e nas Figuras 3.8b e 3.8d a presença dos elementos químicos Mn, Si, Al, Fe, Ti, K, O e suas quantidades de picos.

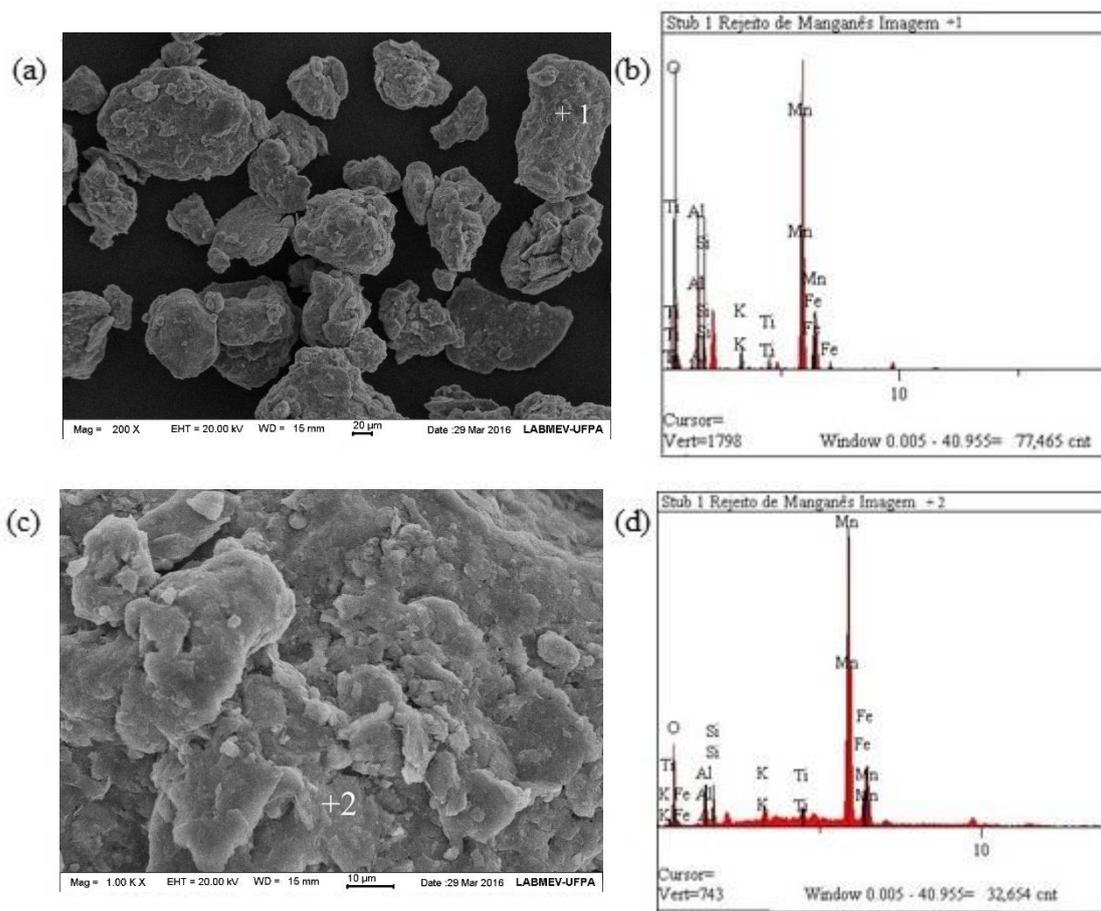


Figura 3.8 - MEV (a,c) e EDS (b,d)

### 3.2.6.6. Ensaio de Potencial Reatividade

Procurando estabelecer alternativas mais adequadas para aplicação do rejeito de manganês como material de construção civil, foram realizados ensaios de potencial reatividade. Com o propósito de reforçar a hipótese de que o rejeito de manganês analisado pela FRX não se caracteriza como material pozzolânico, buscou-se avaliar o índice de atividade pozzolânica (IAP) com cal e cimento. Assim como, avaliar sua reação álcali-agregado para a condição de aplicação como agregado miúdo.

#### ❖ Índice de atividade pozzolânica com cal

De acordo com a NBR 5751 (ABNT, 2015) o índice de atividade pozzolânica com cal é o valor da resistência à compressão simples em corpos de prova de 50 mm de diâmetro x 100 mm de altura, o qual deve ser superior a 6 MPa para que o material seja caracterizado como pozzolana segundo NBR 12653 (ABNT, 2015).

A NBR 5751 estabelece a utilização dos materiais nas seguintes proporções:

- Hidróxido de Cálcio: 104 gramas;
- Areia normal brasileira de acordo com a NBR 7214 (ABNT, 2015): 936 gramas, sendo 234 g de cada uma das quatro frações;
- Material pozolânico determinado pela equação 3.1.

$$m = 2 \cdot \frac{\delta_{\text{poz}}}{\delta_{\text{cal}}} \cdot 104\text{g} \quad (3.1)$$

A seguir os índices das fórmulas são definidos:

$m$  = quantidade de pozolana em massa;

$\delta_{\text{poz}}$  = valor da massa específica do material pozolânico;

$\delta_{\text{cal}}$  = valor da massa específica do hidróxido de cálcio (podendo ser fornecido pelo fabricante).

A quantidade necessária de água é estabelecida pelo o índice de consistência de  $(225 \pm 5)$  mm, determinado segundo a NBR 7215 (ABNT, 1997). Foram moldados três corpos de prova de acordo com a NBR 7215 e sua cura ocorreu em duas etapas: nas primeiras 24 horas, os moldes permaneceram em ambiente à temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C. Durante os 6 dias decorrentes, foram mantidos em estufa à temperatura de  $(55 \pm 2)$  °C. Em seguida os corpos de prova foram armazenados ainda dentro dos moldes, em ambiente à temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C, durante 2 horas, posteriormente capeados e ensaiados à compressão.

Segue abaixo os resultados obtidos para o IAP com cal, a Tabela 3.7 apresenta a resistência à compressão média dos corpos de prova ensaiados e a Figura 3.9 mostra a resistência mínima prevista na NBR 12653 (ABNT, 2015).

Tabela 3.7 - Resultado IAP com cal

| <b>Argamassa</b>               | <b>Resistência à compressão (MPa)</b> |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| Corpo de prova CP <sub>1</sub> | 0,98                                  |
| Corpo de prova CP <sub>2</sub> | 1,18                                  |
| Corpo de prova CP <sub>3</sub> | 1,03                                  |
| Média                          | 1,06                                  |

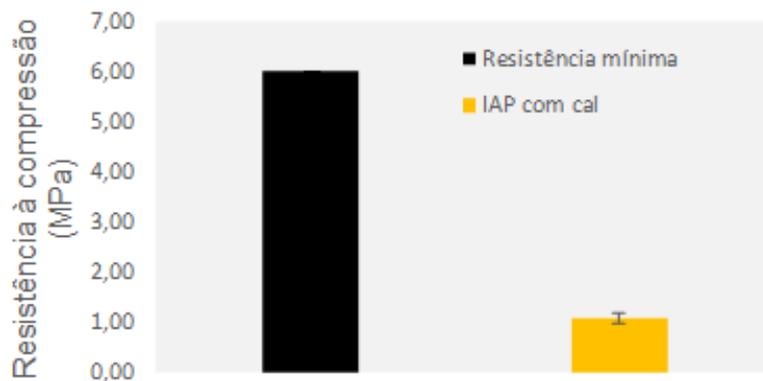


Figura 3.9 - Avaliação IAP com cal

A argamassas produzidas neste ensaio não atingiram o valor mínimo de 6 MPa exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2015), para que sejam consideradas materiais pozolânicos. Observa-se que a amostra ensaiada alcançou 17,66% da resistência mínima exigida.

❖ Índice de atividade pozolânica com cimento Portland

A NBR 5752 (ABNT 2014) especifica um método para determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias, sendo calculado pela relação entre a resistência à compressão da argamassa A e da Argamassa B descrita pela equação 3.2.

$$I_{\text{cimento}} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

A seguir os índices das fórmulas são definidos:

$I_{\text{cimento}}$  = índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, onde o resultado é expresso em porcentagem (%);

$f_{cB}$  = resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados com cimento Portland CP II F-32 e substituição de 25% de material pozolânico (argamassa B);

$f_{cA}$  = resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados somente com cimento Portland CP II F-32 como material cimentício (argamassa A).

Foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos de (50 x 100) mm para argamassa de referência e quatro para argamassa com substituição, misturados e curados de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1997). A quantidade de material em massa para cada argamassa foi estabelecida pela norma NBR 5752 (ABNT 2014).

Os resultados obtidos para IAP com cimento, seguem apresentados na Tabela 3.8 e a Figura 3.10 apresenta o percentual do IAP com cimento e material pozolânico, bem como o percentual do IAP mínimo previsto pela NBR 12653 (ABNT, 2015).

Tabela 3.8 – Resultado IAP com cimento

| <b>Resistência à compressão aos 28 dias</b> |                          |
|---|--------------------------|
| <b>Referência</b>                           | <b>Resistência (MPa)</b> |
| A1Ref                                       | 23,10                    |
| A2Ref                                       | 20,21                    |
| A3Ref                                       | 23,31                    |
| A4Ref                                       | 21,92                    |
| Média                                       | 22,10                    |
| <b>Argamassa (CP + 25% Mn)</b>              |                          |
| A25Mn1                                      | 7,46                     |
| A25Mn2                                      | 6,78                     |
| A25Mn3                                      | 6,97                     |
| A25Mn4                                      | 7,61                     |
| Média                                       | 7,20                     |
| IAP com cimento Portland                    | 32%                      |

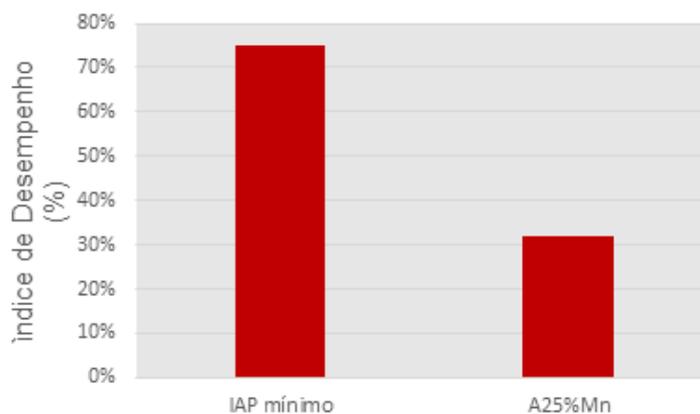


Figura 3.10 - Avaliação IAP com cimento

O IAP com cimento Portland foi de 32%, não atingindo o percentual mínimo de 75% exigido pela NBR 12653 (ABNT 2015), para que seja considerado um material pozolânico. Verificou-se que as argamassas com adição de rejeito de manganês obtiveram uma significativa queda de resistência em relação às argamassas de referência. Portanto, confirma-se a hipótese inicial do resultado da FRX que o rejeito de manganês estudado não classifica-se como material pozolânico.

#### ❖ Reação Álcali-Agregado (RAA)

A reação álcali-agregado é um problema de degradação que pode se desencadear em estruturas de concreto. Trata-se de uma reação química lenta que ocorre entre alguns minerais presentes nos agregados e hidróxidos alcalinos presentes nos poros do concreto. O produto dessa reação é um gel sílico-alcalino hidrófobo, ou seja, que aumenta de volume quando em contato com a água, levando à intensa fissuração da estrutura. Sendo assim, a prevenção é a melhor forma de evitar o surgimento de RAA, portanto, conhecer a potencialidade reativa dos agregados é fundamental.

O método mais difundido é o da ASTM C 1260, que foi normalizado no Brasil pela NBR 15577-4 (ABNR, 2008), de acordo com essa norma foram moldados três (03) primas de argamassa misturada em um misturador mecânico (argamassadeira), com o agregado que se desejou avaliar. Na dosagem foram utilizados 990g (gramas) de rejeito de manganês em frações granulométricas conforme solicita a norma, 440 g de cimento CPV – ARI e 206,8 litros de água. Depois de moldados, foram colocados em câmara úmida por 24 horas, após esse período, os prismas de argamassa foram desmoldados e alocados em um recipiente com água e levados a estufa com 80°C de temperatura por 24 horas. Posteriormente, foram submetidos a um banho térmico em torno de 80°C de solução de hidróxido de sódio (NaOH), por 28 dias de imersão, somando 30 dias de idade. Foram realizadas leituras periódicas do comprimento das barras conforme preconiza a norma. Os resultados de expansão são avaliados após 30 dias, contados a partir da data da confecção das barras.

De acordo com a NBR 15577-4 (ABNT, 2008), são considerados potencialmente reativos aos álcalis, os agregados que apresentarem expansões maiores que 0,19% e, potencialmente inócuos, agregados com expansões inferiores a esse valor, sendo que o cálculo sempre considera a média dos três (03) primas de argamassa.

A Figura 3.11 apresenta o gráfico das expansões ao longo do tempo. Pode-se observar que o rejeito de manganês caracterizou-se como material potencialmente inócuo, por apresentar expansões inferiores a 0,19% conforme classifica a NBR 15577-4 (ABNT, 2008), portanto, a sua aplicabilidade como agregado miúdo torna-se relevante.

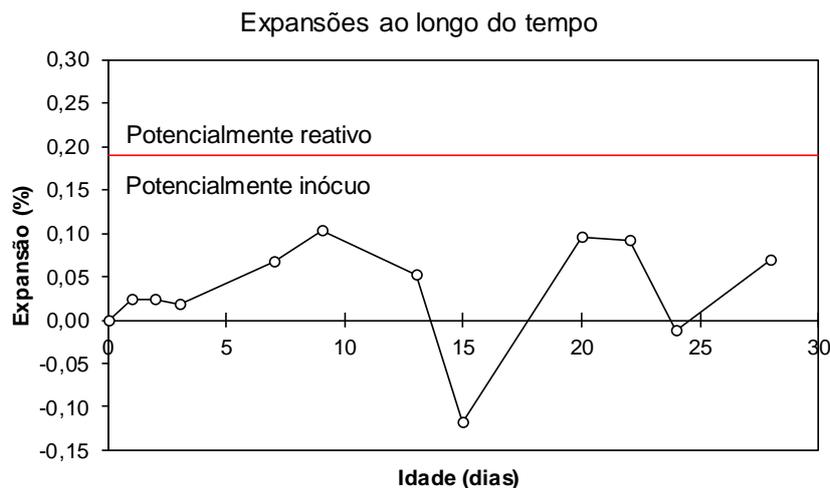


Figura 3.10 - Gráfico de expansões ao longo do tempo

### 3.3. ETAPA 2: ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM REJEITO DE MN COMO FÍLER AO CIMENTO PORTLAND

#### 3.3.1. Desenvolvimento das argamassas

Visando investigar uma aplicação viável para o rejeito de manganês como material de construção civil, foi examinado nesta etapa, sua capacidade de reaproveitamento em substituição ao aglomerante, como fíler ao cimento Portland.

Para mensurar os efeitos da substituição parcial do cimento por rejeito de manganês nas propriedades de argamassas, preparou-se uma argamassa de controle sem substituição do cimento por rejeito de manganês, de traço 1:3 (cimento: areia), que será citada no presente estudo como argamassa ARef e argamassas substituindo em massa o cimento nos teores de 6% (A6Mn), 8% (A8Mn) e 10% (A10Mn), por rejeito de manganês. Foram escolhidos esses percentuais em razão da norma brasileira estabelecer um percentual de 6 a 10% de teor de fíler em relação à massa do cimento (NBR 11578, 1997). As amostras foram preparadas utilizando uma relação água/aglomerante de 0,5, adicionalmente usou-se aditivo superplastificante quando necessário, para manter a mesma consistência para todas as argamassas, de  $220 \pm 20$  mm e não alterar a relação água/ (cimento + Mn). Para a produção das argamassas de cimento Portland foram utilizadas as seguintes quantidades de corpos de prova apresentadas na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Quantidade de corpos de prova de argamassa

| Amostra | Quantidades       |                                  |                  |
|---------|-------------------|----------------------------------|------------------|
|         | % de substituição | Resistência à Compressão 28 dias | Absorção de água |
| ARef    | 0                 | 3                                | 3                |
| A6Mn    | 6%                | 3                                | 3                |
| A8Mn    | 8%                | 3                                | 3                |
| A10Mn   | 10%               | 3                                | 3                |
|         | Total Parcial     | 12                               | 12               |
|         | Total             |                                  | 24               |

Para o cálculo da quantidade de rejeito de manganês foram estabelecidas as massas específicas do cimento ( $3,09 \text{ g/cm}^3$ ) e do rejeito ( $3,84 \text{ g/cm}^3$ ). A quantidade de rejeito foi determinada para obtenção do mesmo volume de cimento subtraído, mantendo a mesma relação volumétrica entre pasta e agregado. Os detalhes do consumo dos materiais utilizados estão apresentados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Consumo de Materiais em  $\text{Kg/m}^3$  para todas as argamassas

| Argamassas | Cimento | Rejeito de Mn | Agregado Miúdo | Água   | Aditivo |
|------------|---------|---------------|----------------|--------|---------|
| ARef       | 499,98  | 0,00          | 1499,93        | 249,99 | 0,00    |
| A6Mn       | 413,51  | 24,81         | 1499,93        | 249,99 | 2,30    |
| A8Mn       | 407,54  | 32,60         | 1499,93        | 249,99 | 2,50    |
| A10Mn      | 394,47  | 39,45         | 1499,93        | 249,99 | 2,95    |

As argamassas foram fabricadas em um misturador mecânico, com velocidade de rotação da pá de  $140 \pm 5 \text{ Rr/min}$ , e velocidade do movimento planetário de  $62 \pm 5 \text{ Rr/min}$ . Adicionou-se à água pré-misturada com o aditivo, agregado miúdo, cimento e rejeito de manganês respectivamente no misturador mecânico, misturando-se completamente em um intervalo de tempo de 5 minutos. Após a mistura, às argamassas foram analisadas quanto à consistência. Finalmente às argamassas foram adicionadas em moldes metálicos e mantidas 24h à temperatura ambiente ( $28 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Às amostras foram então removidas dos moldes metálicos e deixadas à cura imersa em água saturada de hidróxido de cálcio até 28 dias, idade do ensaio. A temperatura e a umidade relativa do ambiente de laboratório foram de  $28 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $94\% \pm 1\%$  respectivamente, para todos os ensaios.

### 3.3.2. Ensaios de resistência à compressão e absorção de água

O ensaio de resistência à compressão foi baseado nas recomendações das normas NBR 7215 (ABNT, 1997) com ruptura dos corpos de prova aos 28 dias e foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UFPA.

A determinação da absorção de água por imersão e índice de vazios seguiram as prescrições normativas da NBR 9778 (ABNT, 2009). Foram moldados três corpos-de-prova (CPs) cilíndricos, com 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, para cada teor de substituição. Após a cura aos 28 dias, os CPs foram mantidos por um período de 72 horas na estufa a  $(105 \pm 5)$  °C para a secagem. Depois de secos os CPs foram pesados na balança com precisão de 0,01g. E imersos em água em temperatura ambiente logo após a pesagem. Após 72 horas de imersão, os CPs foram levados à fervura e mantidos nesta condição por 5 horas e depois passou pelo processo de resfriamento, até atingir a temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C. Os CPs foram pesados na condição saturada superfície seca e posteriormente, foram pesados na balança hidrostática com precisão de 0,1g.

A absorção de água por imersão de cada corpo-de-prova ( $A_i$ ), em porcentagem, foi determinada pela equação 3.3:

$$A_i = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} * 100 \quad (3.3)$$

A seguir os índices das fórmulas são definidos:

$m_{\text{sat}}$  = massa da amostra saturada após imersão e fervura (g);

$m_s$  = massa da amostra seca (g).

O índice de vazios ( $I_v$ ) de cada amostra, em porcentagem, foi calculado pela equação 3.4:

$$I_v = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} * 100 \quad (3.4)$$

Onde:

$m_i$  = massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

### 3.4. ETAPA 3: REJEITO DE MN COMO AGREGADO MIÚDO NO CONCRETO

#### 3.4.1. Desenvolvimento dos concretos

Dando continuidade no estudo de uma aplicação viável para o rejeito de manganês como material de construção civil, nesta etapa, foi avaliado os efeitos da substituição parcial do agregado miúdo natural por rejeito de manganês in natura nas propriedades do concreto.

Para a dosagem do concreto utilizou-se o método do IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992) que consiste em ajustar um teor ótimo de argamassa ( $\alpha$ ) estabelecendo como parâmetro de controle, o valor de abatimento do tronco de cone, que neste estudo fixou-se em  $100 \pm 20$  mm. A dosagem visou um concreto com traço de referência fixado em 1:4,53, que é mencionado na presente pesquisa como concreto CREF, com  $F_{ck}$  de 30 MPa e concretos confeccionados com substituição em massa de areia, nos teores de 15% (C15Mn), 20% (C20Mn), 25% (C25Mn) e 30% (C30Mn), por rejeito de manganês. A fim de alcançar tal resistência foi utilizado um teor de argamassa de 51% e uma relação água/ cimento de 0,58, adicionou-se aditivo superplastificante para manter a mesma consistência e não alterar a relação água/cimento. Para os valores correspondentes obteve-se um traço unitário de 1:1,82:2,71.

Para a produção dos concretos foram utilizadas as seguintes quantidades de corpos de prova apresentados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Quantidade de corpos de prova de concreto

| Amostra | Quantidades       |                          |                      |                        |                  |
|---------|-------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|------------------|
|         | % de substituição | Resistência à compressão | Resistência à Tração | Módulo de elasticidade | Absorção de água |
| CRef    | 0                 | 3                        | 3                    | 3                      | 3                |
| C15Mn   | 15%               | 3                        | 3                    | 3                      | 3                |
| C20Mn   | 20%               | 3                        | 3                    | 3                      | 3                |
| C25Mn   | 25%               | 3                        | 3                    | 3                      | 3                |
| C30Mn   | 30%               | 3                        | 3                    | 3                      | 3                |
|         | Total Parcial     | 15                       | 15                   | 15                     | 15               |
|         | Total Final       | 60                       |                      |                        |                  |

A substituição do agregado miúdo natural (AMN) pelo rejeito de manganês foi realizado por compensação de volume, pois, tratando-se de dosagem, a utilização de um

material com menor massa específica resulta em um volume maior de agregado. Sendo assim, a substituição da massa do AMN pela massa do rejeito de Mn resultaria em traços com volumes menores de rejeito, uma vez que a massa específica do rejeito de Mn é maior que a massa específica do AMN, demandando assim menos água e cimento para produzir traços equivalentes ao traço de referência, obtendo-se desta forma, valores incoerentes. Os detalhes do consumo dos materiais utilizados estão apresentados na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Consumo dos materiais para a confecção dos concretos

| <b>Concreto</b> | <b>Cimento (Kg)</b> | <b>Seixo (Kg)</b> | <b>Areia (Kg)</b> | <b>Rejeito de Mn (kg)</b> | <b>Água (Kg)</b> | <b>Aditivo (ml)</b> |
|-----------------|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|------------------|---------------------|
| CREF            | 8,046               | 21,790            | 14,634            | 0,000                     | 4,660            | 28,200              |
| C15Mn           | 8,046               | 21,790            | 12,439            | 3,280                     | 4,660            | 56,000              |
| C20Mn           | 8,046               | 21,790            | 11,707            | 4,373                     | 4,660            | 77,630              |
| C25Mn           | 8,046               | 21,790            | 10,975            | 5,466                     | 4,660            | 91,750              |
| C30Mn           | 8,046               | 21,790            | 10,244            | 6,560                     | 4,660            | 127                 |

Os concretos foram confeccionados em uma betoneira de eixo inclinado, onde fixou-se o tempo de mistura em 5 minutos e a ordem da mistura, sendo: agregado graúdo, metade da água, agregado miúdo, cimento e o restante da água, posteriormente foi adicionado rejeito de Mn aos poucos devido a amostra conter muitos finos a sua imediata inserção ocasiona perda de consistência e trabalhabilidade, por último adicionou-se o aditivo para melhorar a trabalhabilidade do concreto e atingir o abatimento estabelecido de  $100 \pm 20$  mm.

Seguindo as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2016), após a mistura completa, o concreto foi adicionado e adensado manualmente com haste de aço nos moldes com dimensões de 10 x 20 cm. Terminado o adensamento do concreto nas fôrmas cilíndricas, realizou-se o acabamento superficial e, em seguida, as superfícies dos corpos de prova foram protegidas com filme plástico para evitar a evaporação da água presente na superfície. A desforma foi realizada no dia seguinte à dosagem, posteriormente, os corpos de prova foram colocados imersos em tanques com água e cal para continuar o regime de cura até a idade de controle. Antes dos ensaios mecânicos os corpos de prova foram retificados com o objetivo de proporcionar uma distribuição uniforme dos esforços nas suas superfícies.

### 3.4.2. Propriedades do concreto

A resistência à compressão axial é a avaliação mais usada para o controle do concreto, tanto pela facilidade de execução e baixo custo quanto pela sua importância na segurança das estruturas. O ensaio de resistência à compressão foi baseado nas recomendações da NBR 7215 (ABNT, 1997), com ruptura dos corpos de prova aos 28 dias. Para efeito de controle também foram realizados ensaios de tração por compressão diametral preconizado pela norma NBR 7222 (ABNT, 2011) e módulo de elasticidade conforme a NBR 8522 (ABNT 2008), segundo Mehta e Monteiro (2008), o módulo de elasticidade pode ser definido como sendo a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite proporcional adotado. Ambos ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UFPA.

É interessante evidenciar que o comportamento mecânico não é a única característica a ser estudada quanto ao concreto. A durabilidade deste é uma característica intimamente ligada a vida útil das estruturas de concreto armado, pois a absorção de água ou de agentes agressivos pode provocar danos na armadura. Portanto, a pesquisa também buscou avaliar o efeito da substituição do agregado miúdo por rejeito de manganês na durabilidade do concreto. O ensaio realizado para analisar tal comportamento foi o de absorção de água por capilaridade conforme a NBR 9779 (ABNT 2012). Para a realização deste ensaio é necessário que as amostras estejam completamente frias, ou seja, a uma temperatura com massa constante.

### 3.4.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Por ter uma estrutura heterogênea e complexa, o concreto possui relações estrutura-propriedade que constituem uma fase importante para entendimento do seu comportamento. A aplicação de técnicas de microscopia eletrônica de varredura torna possível analisar a estrutura superficial de uma dada amostra, assim como a estrutura dos materiais constituintes de argamassas e concretos, até uma escala micrométrica auxiliando na explicação do comportamento mecânico e interpretação dos resultados.

As análises de MEV foram realizadas por meio de amostras retiradas de fragmentos dos corpos de prova oriundos do ensaio de resistência à compressão e foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura da marca LEO, modelo 1430 VP do Instituto de Geociências da UFPA, no Laboratório de Análises por meio do microscópio eletrônico de varredura.

## **4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.**

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios de desempenho mecânico das argamassas e dos concretos, feitos e indicados no programa experimental estabelecido no capítulo 3.

### **4.1. ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM REJEITO DE MN COMO FÍLER AO CIMENTO PORTLAND**

Os dados das argamassas (Apêndice B) foram analisados quanto a sua normalidade e sua homocedasticidade utilizando-se os testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente. Confirmando a normalidade e a homocedasticidade, esses foram comparados utilizando-se análise de variância de uma via, pois havia mais de duas condições independentes. Caso os dados não apresentassem uma distribuição homogênea, estes foram comparados utilizando-se análise de variância de Tukey. Assim como, os dados também foram comparados utilizando-se análise de variância de Kruskal-Wallis. Foram consideradas diferenças estatísticas quando  $P < 0,05$ .

#### **4.1.1. Avaliação da resistência por compressão axial**

De acordo com a Figura 4.1 observou-se que estatisticamente os resultados mostraram que a substituição do cimento pelo rejeito de Mn incrementou a resistência à compressão em todos os teores, sendo que, os valores de 6 e 8% foram os que mais contribuíram.

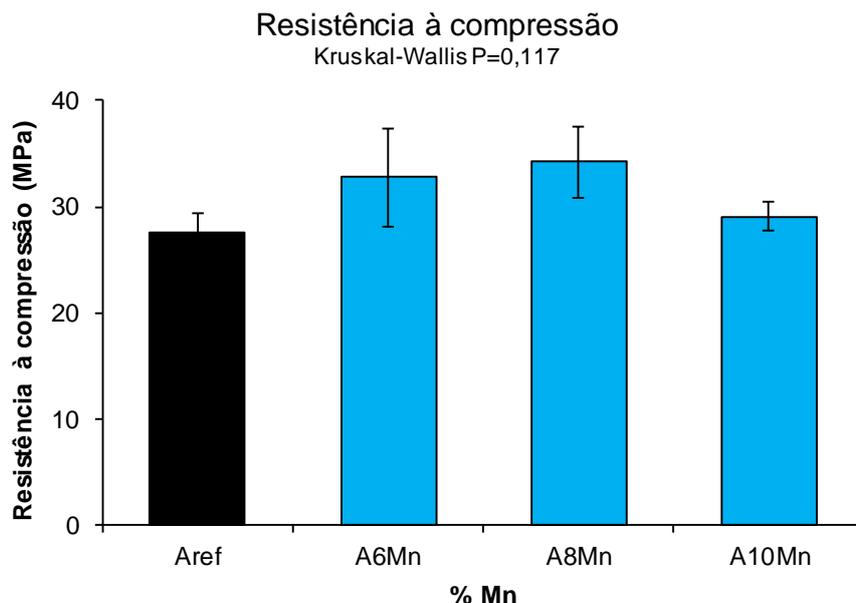


Figura 4.1 – Resistência à compressão das argamassas com substituição parcial do cimento por rejeito de Mn aos 28 dias. Valores expressados em médias  $\pm$  desvio padrão.

(ANOVA;  $P < 0,05$ )

A maioria das adições minerais inclui alguma forma de sílica vítrea que pode compatibilizar com a cal na presença de água, à temperatura ambiente, para formar silicato de cálcio hidratado idêntico aquele formado pela hidratação do cimento. No entanto, conforme Aïtcin (2009), alguns fílers empregados como adição ao cimento não possuem essa propriedade, sendo utilizado com finalidade exclusivamente pela sua presença física, gerando assim um efeito micro fíler, que é responsável por aumentar a densidade da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições, cujo diâmetro médio de partícula, deve ser semelhante ou menor que o do cimento (PILAR, 2012).

Alguns fatores poderiam contribuir para esse resultado, dentre eles: a finura do rejeito, que é um importante parâmetro que influencia o efeito nucleação heterogênea; a área superficial específica que, quando associada a uma função eficiente, pode ser utilizada para descrever o aumento do grau de hidratação ou resistência à compressão das argamassas resultante dos efeitos físicos das adições minerais (LAWRENCE, 2005).

Observou-se que a amostra A10Mn, ganhou menos resistência em relação as amostras A6Mn e A8Mn, porém não menos que em comparação com a Aref. Uma possível interpretação física no caso de pó inerte é que uma partícula da mistura deve influenciar a cinética de hidratação de um grão de cimento apenas se ambas as partículas estiverem suficientemente perto para interagirem entre si. Quando a quantidade de mistura mineral é

pequena, as partículas da mistura tem uma elevada probabilidade de estarem perto de um ou mais grãos de cimento. Por outro lado, quando a quantidade de adição aumenta, esta probabilidade diminui, uma vez que algumas partículas podem ser isoladas a partir de grãos de cimento (CYR et al., 2006).

#### 4.1.2. Avaliação da absorção de água

A substituição parcial do cimento por rejeito de manganês surtiu efeito na absorção de água total (FIGURA 4.1) e, da mesma forma, para o índice de vazios (FIGURA 4.3). Observou-se estatisticamente uma variação significativa na absorção de água entre as argamassas A6Mn e a Aref. A argamassa A6Mn foi a que menos absorveu água, no entanto, as argamassas A8Mn e A10Mn não variaram significativamente em relação a Aref.

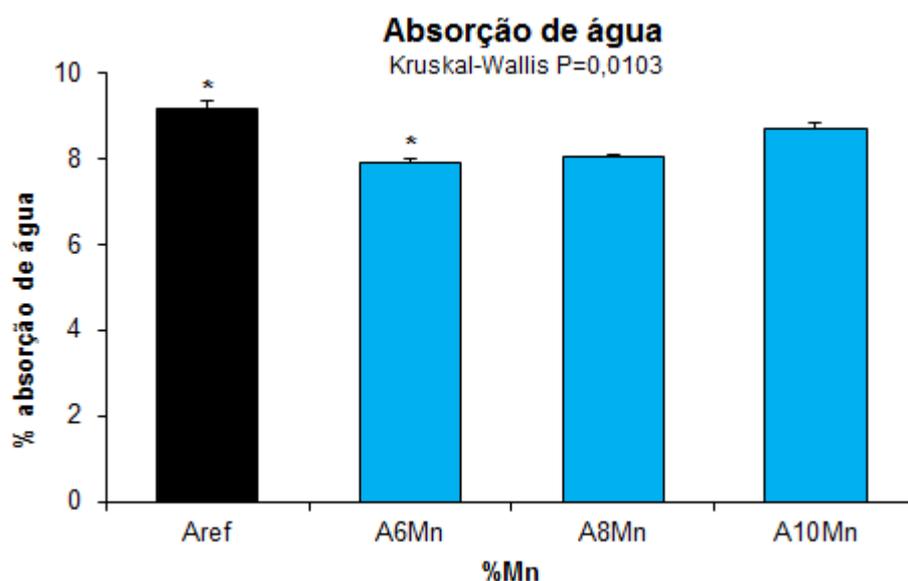


Figura 4.2 – Absorção de água total das argamassas com substituição parcial do cimento por rejeito de Mn aos 28 dias. Valores expressados em médias  $\pm$  desvio padrão. Asterisco (\*) indica diferença estatística entre grupos (ANOVA;  $P < 0,05$ ).

Já para o índice de vazios, observou-se que a argamassa A10Mn não variou significativamente em relação a Aref, assim como, as argamassas A6Mn e A8Mn não variaram entre si. Todavia, houve uma variação significativa entre os grupos A6Mn, A8Mn em relação aos grupos A10Mn e Aref.

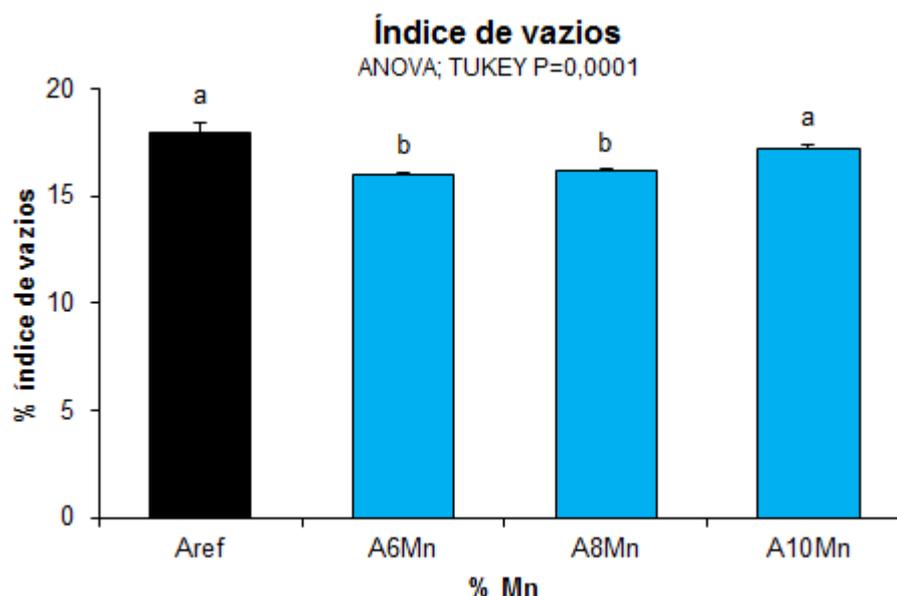


Figura 4.3 – Índice de vazios das argamassas com substituição parcial do cimento por rejeito de Mn aos 28 dias. Valores expressados em médias  $\pm$  desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre argamassas para a mesma variável. (ANOVA;  $P < 0,05$ ).

Observou que em ambos os resultados apresentados, as argamassas com substituição obtiveram um impacto positivo em relação a argamassa de referência, melhorando significativamente o desempenho de todas as amostras principalmente para as amostras A6Mn e A8Mn.

A substituição do cimento por rejeito de manganês nas argamassas propiciou um preenchimento dos vazios com conseqüente refinamento do sistema de poros, com sugestiva diminuição da interligação entre eles, ou seja, uma descontinuidade, produzindo uma diminuição do movimento ascendente da água em relação as argamassas de referência.

Han et al (2017) estudaram os efeitos da substituição de cimento por rejeito de minério de ferro e concluíram que as amostras contendo rejeito de minério de ferro apesar de exibir uma baixa atividade de hidratação nas idades avançadas, seu efeito fíler promove significativamente a hidratação do aglutinante composto aumentando a densidade da pasta, estrutura de poro fino de pasta endurecida e alta resistência à compressão da argamassa.

Esse comportamento apontado pela absorção total de água, bem como, o menor índice de vazios corrobora para às respostas encontradas relacionadas às resistências à compressão das argamassas com rejeito de Mn, contudo, apenas esses estudos não são suficientes para afirmamos a eficiência da aplicabilidade do rejeito de manganês como fíler no cimento Portland nas propriedades das argamassas. No entanto, pode-se inferir que o rejeito de Mn atende o objetivo a que se destina a pesquisa.

## 4.2. REJEITO DE MN COMO AGREGADO MIÚDO NO CONCRETO

### 4.2.1. Avaliação das propriedades do concreto

Os resultados encontrados referentes às propriedades do concreto no estado endurecido foram analisados com base na análise estatística, para dar confiabilidade às conclusões obtidas (Apêndice C). Os dados foram analisados quanto a sua normalidade utilizando-se o teste de Shapiro Wilk. Simultaneamente, os dados foram analisados quanto a sua homogeneidade utilizando-se o teste de Levene. Confirmando-se os resultados dos mesmos, esses foram comparados utilizando-se análise de variância de uma via. Em seguida caso os dados apresentassem desigualdade nas médias, para identificação dos grupos responsáveis pela desigualdade, estes foram analisados utilizando-se a análise de variância de Kruskal-Wallis. Foram consideradas diferenças estatísticas quando  $P < 0,05$ .

#### 4.2.1.1. Avaliação da resistência por compressão axial

A Figura 4.4 apresenta uma análise comparativa entre os concretos sem rejeito e os concretos confeccionados com substituição parcial do agregado miúdo por rejeito de manganês, nos teores de 15% (C15Mn), 20% (C20Mn), 25% (C25Mn) e 30% (C30Mn).

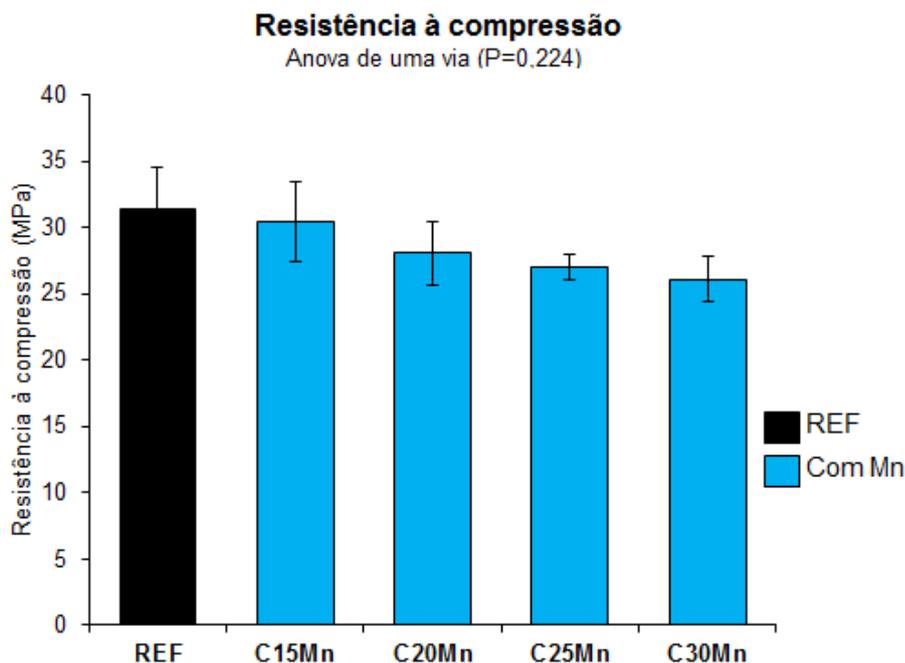


Figura 4.4 – Resistência à compressão dos concretos com substituição parcial de AMN por rejeito de Mn aos 28 dias. Valores expressados em médias  $\pm$  desvio padrão (ANOVA;  $P < 0,05$ )

Quanto às respostas das resistências à compressão, estatisticamente não houve variação significativa nos resultados dos concretos C15Mn, C20Mn, C25Mn, C30Mn quando comparados com o concreto CREF. Proporcionando assim um resultado positivo para ambas as amostras, principalmente para os concretos com substituição de 15 e 20%.

Alguns fatores poderiam contribuir para os resultados. Em primeiro lugar, em razão de sua maior área superficial específica, o rejeito pode demandar mais água da mistura, minimizando a trabalhabilidade e diminuindo a sua resistência à compressão (GANESH PRABHU et al., 2014). Essa demanda de água é diretamente proporcional à taxa de substituição do rejeito de manganês, no entanto, fixou-se a relação água/cimento e o abatimento para todas as amostras, decidiu-se aumentar o teor de aditivo para obter a mesma trabalhabilidade do traço de referência. Com isso, parte da água que seria utilizada para hidratar o cimento, conseqüentemente manter a resistência à compressão, foi absorvida pelo rejeito de Mn.

E em segundo lugar, o rejeito de Mn por possuir uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (FIGURA 4.5) e fator de empacotamento compacto tornam os materiais relativamente rígidos (MEYERS & CHAWLA, 2008; CALLISTER, 2014, ZHAO et al.,

2014). Por outro lado, no entanto, a textura da superfície de um agregado tem uma influência significativa sobre a resistência (ZHAO et al., 2014).

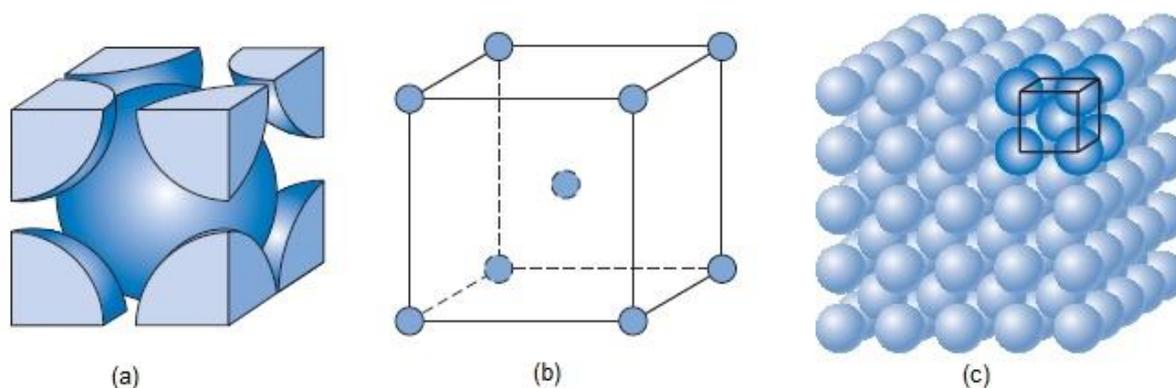


Figura 4.5 – Estrutura cristalina de corpo centrado: representação da célula unitária por esferas rígidas (a), célula unitária com esferas reduzidas (b) e agregado de muitos átomos (c).

Fonte: Callister, 2014

A textura áspera dos rejeitos poderia melhorar a aderência entre a pasta de cimento, que é formada por partículas menores do rejeito, e a interface agregada, o que é benéfico para o desenvolvimento do ganho de força (SHETTIMA et al., 2016). Portanto, isso poderia ajudar no incremento da resistência em certa medida. Com base nos resultados experimentais, podemos ver que, em geral, o efeito benéfico e o ganho de resistência compensam a diminuição da força.

Conforme já citado, Salguero et al. (2014) estudaram uma aplicação com rejeito de manganês na produção de concreto, utilizando o rejeito em forma de pó substituindo 20% por parte do agregado miúdo. Foram feitos estudos comparativos entre três amostras de referência e três amostras com a nova substituição. A resistência à compressão das amostras aumentou em quase 40%, esses resultados foram justificados pelos autores que, apesar do rejeito ser um material muito fino e que demanda muita água do concreto, sua composição química apresenta percentuais significativos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ . Assim como, as três amostras com 20% de rejeito apresentaram menor dispersão nos valores dos resultados de resistência à compressão em relação as três amostras de referência, estas apontaram uma variação maior entre os resultados.

Zhao et al. (2014) investigaram a substituição do agregado miúdo por rejeito de minério de ferro na confecção de concretos com alto desempenho, nas proporções de 20, 30, 40, 50 e 100%. Os resultados das resistências à compressão até 40% se mantiveram

equiparadas com o concreto de referência, a partir de 50% as misturas mostraram uma perda significativa acima de 10%.

Ganesh Prabhu et al. (2014) utilizaram areia de fundição de alumínio em substituição ao agregado miúdo nos valores de 10, 20, 30, 40 e 50%. Os resultados dos ensaios à compressão revelaram que as propriedades de resistência das misturas foram diminuindo com o aumento do percentual de areia de fundição, porém os concretos de até 20% de substituição não mostraram variação significativa em relação ao concreto de referência. Os autores atribuíram essa diminuição à finura do material e concluíram que uma substituição de até 20% pode ser efetivamente utilizada para produção de concreto, sem afetar seus padrões.

Siddique et al. (2009) avaliaram as propriedades mecânicas do concreto, onde o agregado miúdo foi parcialmente substituído por areia de fundição nos percentuais de 10, 20 e 30% para as idades de 28, 56, 91 e 365 dias. Os resultados dos ensaios à compressão aos 28 dias apresentaram discreto aumento da resistência em relação ao concreto de referência e continuaram aumentando, porém, mais significativamente nas idades de 56 a 365 dias. O autor mencionou que o ganho de resistência poderia se dar ao fato de que a areia de fundição ser mais fina que a areia regular, o que resultou numa matriz de concreto mais denso e devido também ao alto teor de sílica presente na amostra.

#### 4.2.1.2. Avaliação da resistência à tração por compressão diametral

Quanto a resistência à tração, observou-se estatisticamente que não houve variação significativa dos concretos C15Mn, C20Mn, C25Mn, C30Mn quando comparados com o concreto CREF (FIGURA 4.6). Todavia, observou-se que as amostras obtiveram uma tendência crescente em relação a amostra de referência, exceto para o C20Mn.

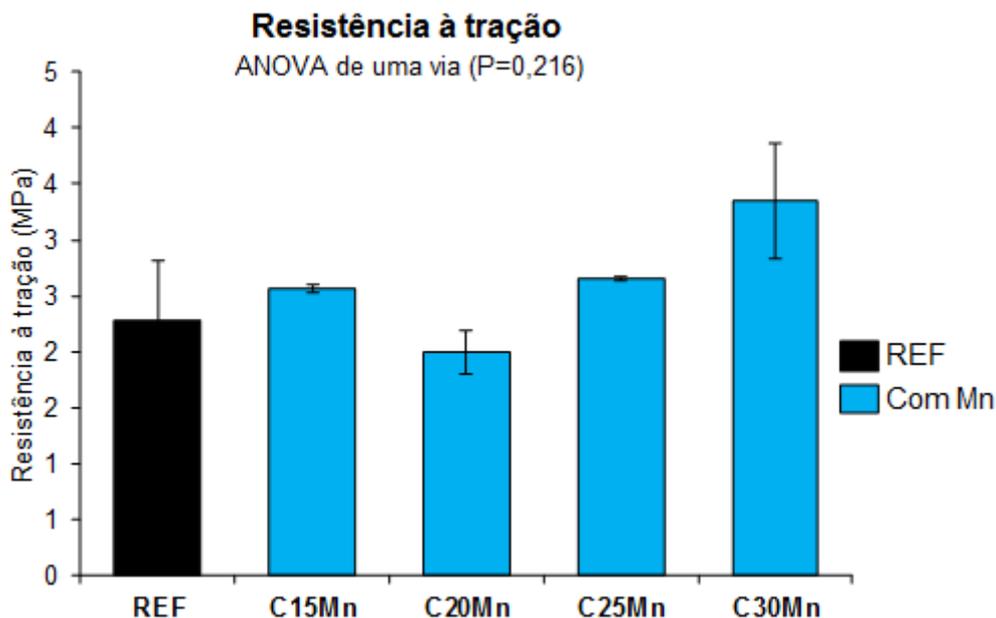


Figura 4.6 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos com substituição parcial do AMN por rejeito de Mn aos 28 dias. Valores expressados em médias  $\pm$  desvio padrão. (ANOVA;  $P < 0,05$ )

Shettima et al., (2016) observaram que as substituições de agregado miúdo por rejeito de minério de ferro (25, 50, 75,100%), aumentaram a resistência à tração em relação ao concreto de referência. Para os autores, o aumento da resistência à tração observado nos concretos com adições de rejeito de minério de ferro pode ser devido à maior ligação entre os agregados e a pasta de cimento formada pelas partículas menores dos rejeitos.

Siddique et al. (2009) avaliaram a resistência à tração de suas amostras com 10, 20 e 30% de areia de fundição em substituição ao agregado miúdo e observaram que houve um aumento nas resistências para todas as idades. Enquanto que, de acordo Ganesh Prabhu et al. (2014) suas amostras com substituições de areia de fundição nos valores de 10 e 20% mantiveram uma boa resistência à tração em relação a amostra de referência, porém, as amostras com substituições de 30, 40 e 50%, os resultados mostraram-se muito inferiores ao de referência.

#### 4.2.1.3. Avaliação do módulo de elasticidade

A Figura 4.7 apresenta os resultados entre os concretos sem rejeito e os concretos com adição de rejeito de manganês proporções de 15, 20, 25 e 30%. Observou-se estatisticamente que não houve variação significativa nos resultados do módulo de elasticidade dos concretos C15Mn, C20Mn, C25Mn, C30Mn quando comparados com o concreto CREF.

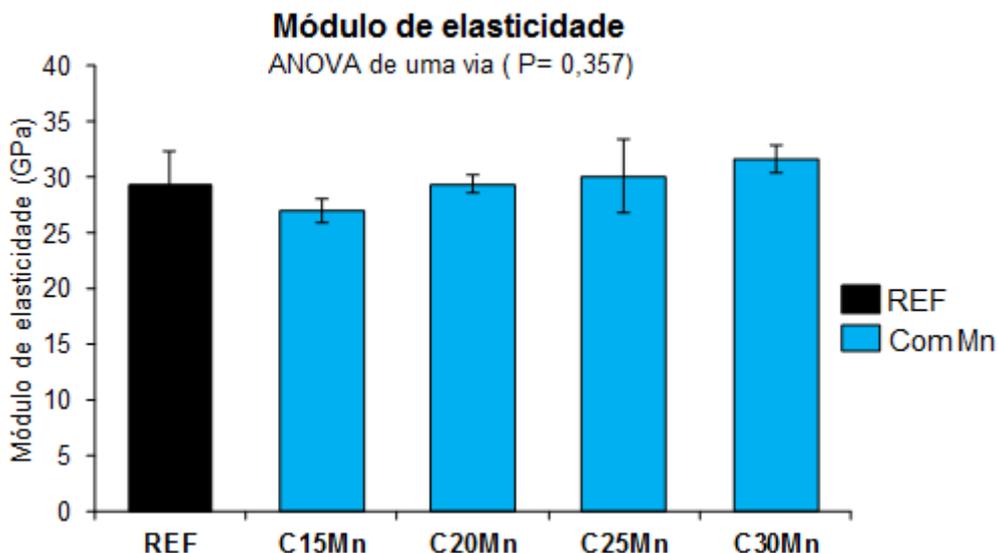


Figura 4.7 – Módulo de elasticidade dos concretos com substituição parcial do AMN por rejeito de Mn aos 28 dias. Valores expressados em médias  $\pm$  desvio padrão (ANOVA;  $P < 0,05$ ).

De forma análoga a Figura 4.8 mostra a linha de tendência dos valores médios do módulo de elasticidade dos concretos aos 28 dias, estas estão muito paralelas e próximas.

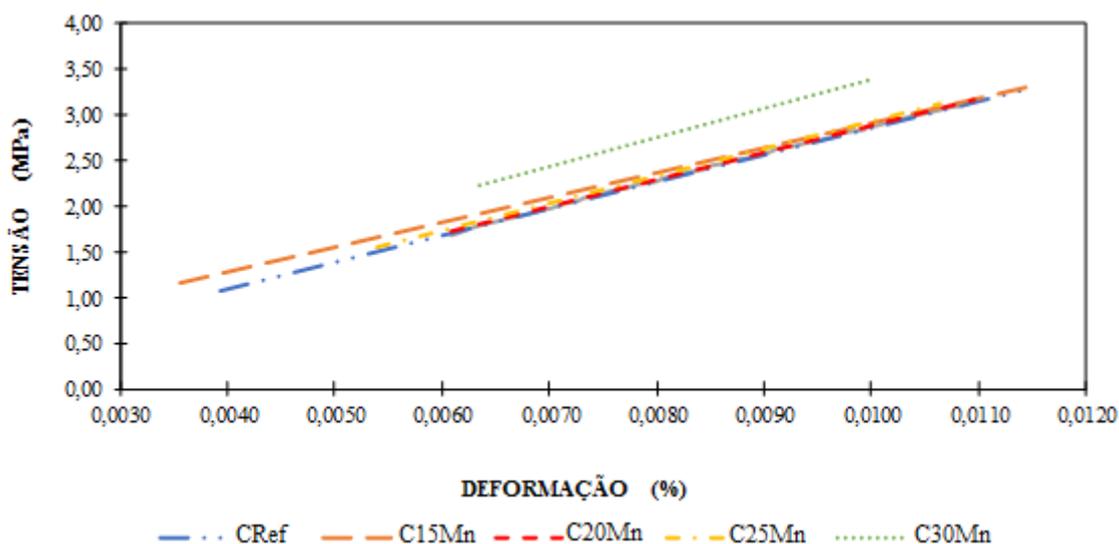


Figura 4.8 – Linha de tendência dos valores médios do módulo elasticidade.

O módulo de elasticidade determina o valor da rigidez de um material, a tendência de crescimento do módulo nos concretos C15Mn, C20Mn, C25Mn, C30Mn, pode ser explicado em razão das propriedades físicas do rejeito de Mn e pelas suas propriedades intrínsecas como metal (MEYERS & CHAWLA, 2008; CALLISTER, 2014).

Salguero et al. (2014) estudaram uma aplicação com rejeito de manganês na produção de concreto, utilizando o rejeito em forma de pó, substituindo 20% por parte do agregado miúdo. Foram feitos estudos comparativos entre três amostras de referência e três amostras com a nova substituição. As amostras de referência e com rejeito de Mn comportaram-se diferentemente em relação ao desempenho da deformação, os concretos com rejeito de Mn apresentaram um aumento na tensão final.

Shettima et al., (2016) observaram que os resultados do módulo de elasticidade das substituições de agregado miúdo por rejeito de minério de ferro (25, 50, 75,100%) foram maiores do que os concretos de referência. Para os autores, isto poderia ser atribuído à resistência à compressão, porosidade e ligação correspondentes entre os agregados e a pasta das misturas.

Ganesh Prabhu et al. (2014) utilizaram areia de fundição de alumínio em substituição ao agregado miúdo, nos valores de 10, 20, 30, 40 e 50%. Os resultados entre os valores do módulo de elasticidade não mostraram grandes diferenças em relação ao concreto de referência e os valores foram relativamente próximos. Os autores concluíram que a taxa de substituição até 20 % pode ser usada efetivamente como agregado miúdo.

Siddique et al. (2009) avaliaram as propriedades mecânicas do concreto, onde o agregado miúdo foi parcialmente substituído por areia de fundição nos percentuais de 10, 20 e 30%, para as idades de 28, 56, 91 e 365 dias. Os resultados dos ensaios indicaram que a substituição do agregado miúdo por areia de fundição melhorou significativamente o módulo de elasticidade das amostras em todas as idades. O aumento do módulo de elasticidade variou entre 5,2% e 12%, dependendo do teor de areia de fundição e idade dos testes.

#### 4.2.1.4. Avaliação da absorção capilar

A substituição parcial do agregado miúdo por rejeito de manganês surtiu efeito na absorção de água capilar (Figura 4.9). Ao longo dos vinte e oito dias os concretos C15Mn, C20Mn, C25Mn e C30Mn obtiveram um comportamento semelhante até o período de 24 horas distinguindo-se do concreto de referência. A partir das 24 horas os concretos C20Mn e C25Mn, indicaram um comportamento similar distinguindo-se dos concretos C15Mn e C30Mn, sendo estes últimos apresentando uma diminuição da taxa de absorção capilar quando comparados com os outros concretos e quanto maior o intervalo de tempo maior essa diferença. De forma geral, ambos os concretos com substituições apresentaram um bom desempenho na taxa de absorção capilar em comparação ao concreto de referência.

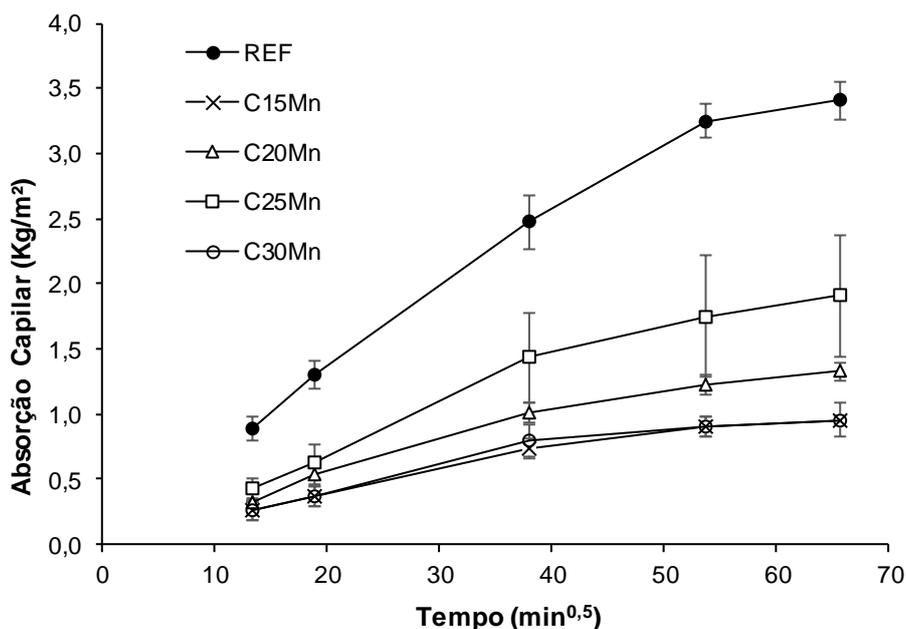


Figura 4.9 – Absorção capilar. Valores expressados em médias  $\pm$  desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando  $P < 0,05$ .

(ANOVA; Kruskal-Wallis,  $P < 0,05$ ).

Quanto às respostas da absorção de água por capilaridade, alguns fatores poderiam contribuir para esse resultado. Em primeiro lugar, a propriedade física da absorção capilar em concretos e argamassas é dependente da distribuição e tamanho dos poros presentes nesses materiais (SMYL; GHASEMZADEH; POUR-GHAZ, 2016). Em segundo lugar, esse comportamento pode ser atribuído, pelo fator de empacotamento, um melhor empacotamento da mistura resulta em sistemas com menos porosidade (CARASEK, 2016). Em terceiro lugar, a fraca trabalhabilidade do concreto diminui a compactação e aumenta a porosidade do concreto. O aumento da porosidade diminui a densidade e eleva a taxa de absorção de água (GANESH PRABHU et al., 2014). Observou-se que ambas as amostras obtiveram uma redução na taxa de absorção capilar em relação ao concreto de referência, no entanto pode-se destacar uma significativa diminuição na absorção para os concretos C15Mn e C30Mn, assim como para o C20Mn.

Para Shettima (2016) a diminuição relativa das capacidades de absorção deve-se provavelmente ao aumento do processo de hidratação e finura dos rejeitos que ocupam tanto os macro como os micro poros na mistura. Em outras palavras, o conteúdo dos minérios influenciam o refinamento de poros e grãos do concreto.

Desta forma, a adição deste rejeito mineral como agregado miúdo na produção de concreto, principalmente para os percentuais de 15 e 20% de substituição, tornam-se uma alternativa viável, visando à diminuição do acúmulo de rejeitos nas barragens, assim como, ajuda diretamente na redução da exploração de jazidas naturais.

#### 4.2.2. Análises em microscopia eletrônica de varredura

As análises do MEV (microscópio eletrônico de varredura) e EDS (espectrometria de energia dispersiva de raios x) permitiram observar a morfologia dos concretos produzidos com rejeito de Mn, além de uma identificação dos componentes químicos presentes nas amostras. Foram feitas análises comparativas entre amostras com menor e maior percentual de rejeito de Mn. Primeiramente realizou-se uma varredura num nível de observação de 100  $\mu\text{m}$  buscando visualizar a imagem como um todo. Seguidamente, a varredura deu-se através do aumento do grau de observação, através da ampliação da lente para 10  $\mu\text{m}$ .

As Figuras 4.10(a) e 4.10(b) mostram a morfologia do concreto C15Mn e C30Mn respectivamente com varredura num nível de observação de 100  $\mu\text{m}$ . Foi difícil identificar o rejeito de Mn nas imagens porque os níveis de cinza do rejeito e da pasta são semelhantes, para isso utilizou-se do recurso de espectrometria de energia dispersiva de raio x para especificar os elementos químicos constituintes. A linha amarela é a delimitação de uma região linear por onde o equipamento EDS realizou as leituras.

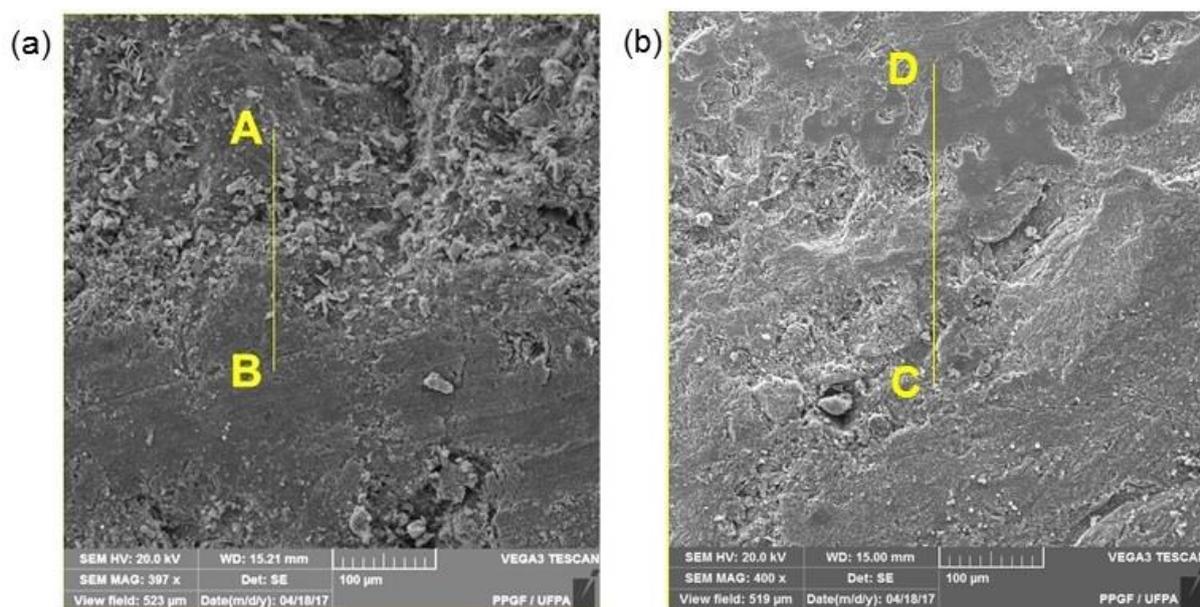


Figura 4.10 - MEV da amostra C15Mn (a) e MEV da amostra C30Mn (b)

Observou-se nas imagens que ambas as amostras mostraram essencialmente as mesmas microcaracterísticas, apresentando áreas uniformes com alguns fragmentos espalhados, porém identificou-se que o concreto C15Mn possui mais porosidade e é menos homogêneo em relação ao C30Mn. Em relação a análise elemental realizada por EDS, as Figuras 4.11(a) e 4.11(b) mostram a presença dos elementos químicos constituintes e sua quantidade de picos das amostras C15Mn e C30Mn respectivamente.

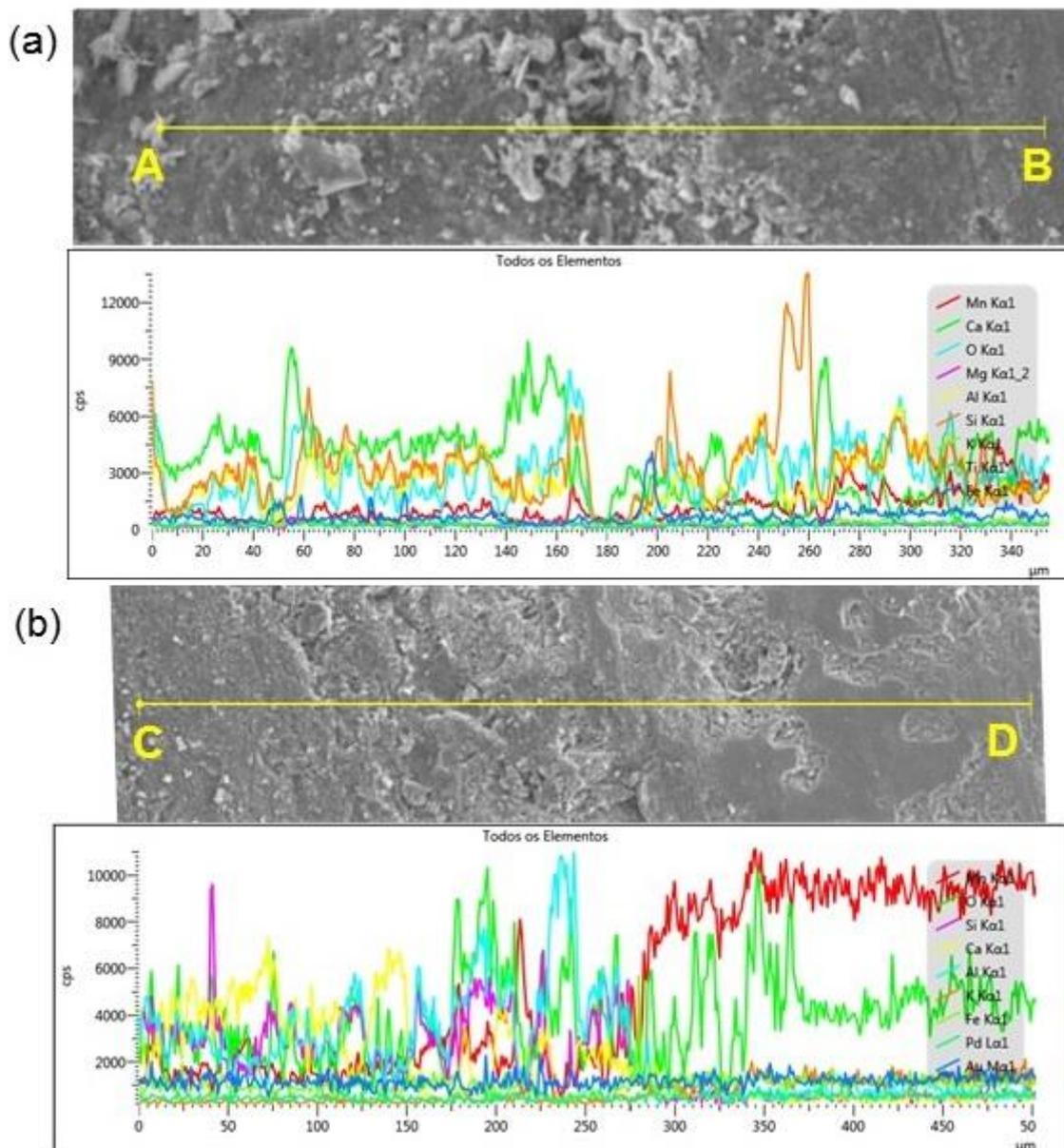


Figura 4.11 - EDS da amostra C15Mn (a) e EDS da amostra C30Mn

Na imagem (a) da amostra C15Mn identificou-se uma concentração maior de Sílica especificada pela cor marrom e Cálcio (cor azul), típico de formação de C-S-H da matriz cimentícia, no qual, é o grande responsável pelas propriedades mecânicas da pasta. Enquanto que a imagem (b) da amostra C30Mn constatou-se do lado direito da imagem uma concentração maior de manganês (cor vermelho), resultando assim em uma superfície mais uniforme e um tom cinza mais escuro.

As Figuras 4.12(a) e 4.12(b) mostram a morfologia do concreto C15Mn e C30Mn respectivamente com varredura num nível de observação de 10  $\mu\text{m}$ . Marcou-se alguns pontos nas imagens para análise elementar através de EDS. Na imagem (a) da amostra C15Mn, observou-se que os cristais formados estão espalhados uns dos outros, exibindo uma morfologia menos compacta, com mais vazios, o espectro 1 identificou uma concentração de Cálcio, Silício e Alumínio e o espectro 2 indicou uma predominância de Cálcio. Enquanto que a imagem (b) mostra uma estrutura mais detalhada do concreto C30Mn, observou-se que os cristais formados estão bastante próximos uns dos outros, gerando uma estrutura com preenchimento dos vazios, sua espectrometria mostrou no ponto 3, um pico alto de Silício, enquanto que nos pontos 4 uma concentração de Manganês.

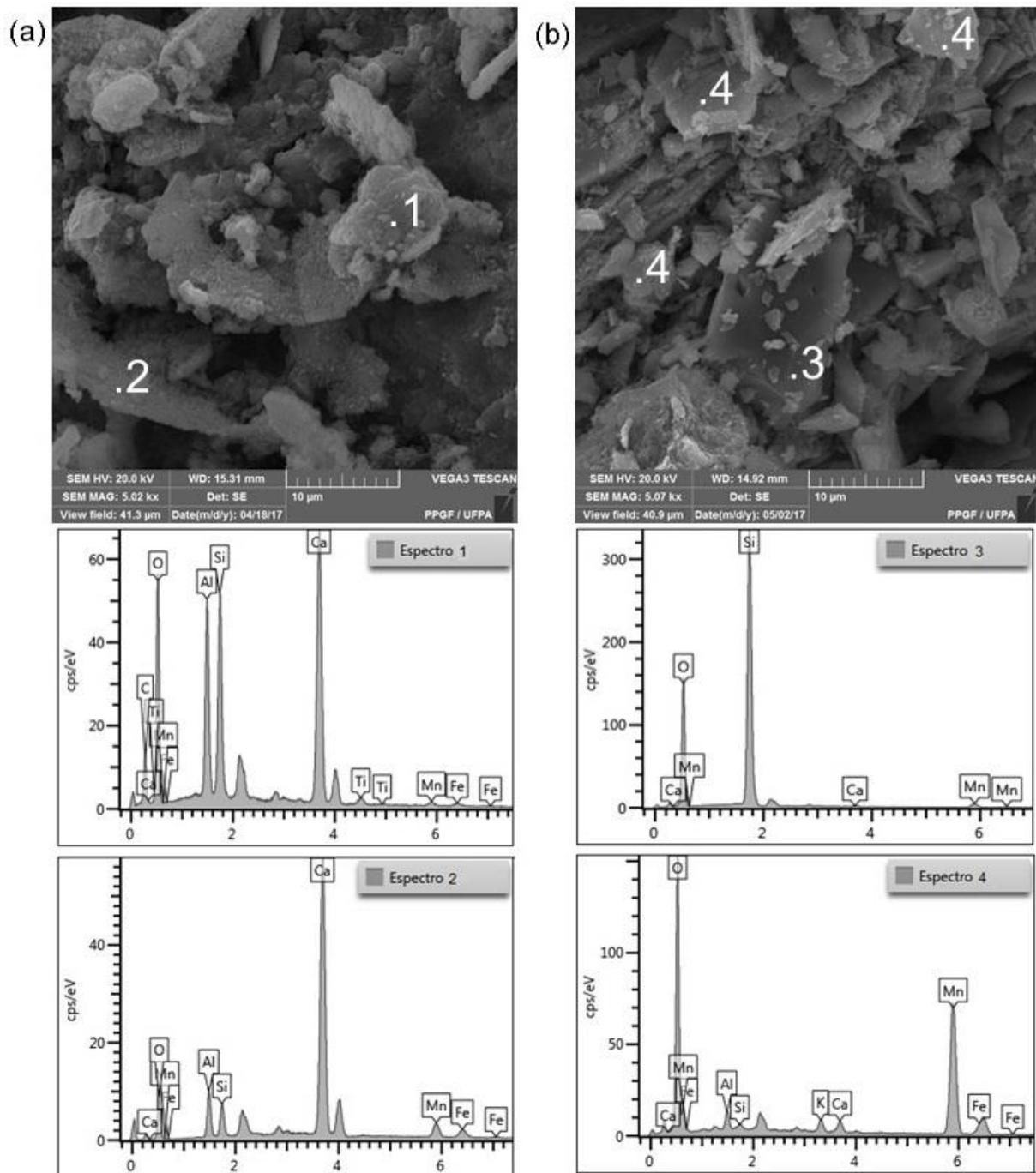


Figura 4.12 - MEV e EDS da amostra C15Mn (a) e MEV e EDS da amostra C30Mn (b)

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1. CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo geral estudar o aproveitamento do rejeito de manganês como material de construção civil, de acordo com os resultados em concordância com o que descreve a literatura, pode-se concluir que as argamassas e os concretos produzidos com rejeito de manganês obtiveram resultados tecnicamente satisfatórios, sugerindo seu uso como material de construção civil.

Por meio da caracterização identificou-se que a soma dos teores médios de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  encontrados nas amostras de rejeito de Mn foi de 18,31%, resultando em um valor muito baixo para que um determinado material seja considerado pozolânico, resultado este corroborado pelo índice de atividade pozolânica do rejeito que se apresentou aquém do mínimo preconizado por norma. Apesar do rejeito de Mn não possuir 80% de material carbonático, para exigências químicas, como recomenda a norma NBR 5732 (ABNT, 1991), foi investigado sua substituição como fíler ao cimento Portland, em razão de suas propriedades físicas. Assim como, em relação a reação álcali-agregado, o rejeito de Mn se classificou como material potencialmente inócuo, portanto, possibilitando sua investigação como agregado miúdo.

A análise da substituição do rejeito de Mn usado como fíler (6, 8, 10%) no cimento Portland em argamassas gerou efeito positivo quando comparados com as argamassas de referência, incrementando a resistência à compressão principalmente para os percentuais de 6 e 8%, assim como, para os resultados de absorção total e índice de vazios.

Foi investigado também a sua utilização como agregado miúdo natural, nos teores de 15, 20, 25 e 30%, na confecção de concretos. Observou-se estatisticamente que não houve variação significativa nas respostas atingindo resultados satisfatórios nas propriedades mecânicas quando comparados aos concretos de referência. Por meio da análise de resistência à compressão axial notou-se um resultado positivo para todas as amostras, principalmente para os concretos com substituição de 15 e 20%. As análises de resistência à tração e módulo de elasticidade alcançaram resultados satisfatórios para ambas as amostras, principalmente para os concretos com 20, 25 e 30% de substituição.

Na análise de absorção capilar os concretos com substituições apresentaram variações significativas quando comparados aos concretos de referência. As amostras de 15% e 30% foram as que menos absorveram água, apresentando resultados muito próximos. A amostra com 25% foi a que mais absorveu água por capilaridade dentre as amostras com percentuais de rejeito de Mn, porém, seu resultado ainda ficou abaixo dos valores de absorção do concreto de referência.

Conclui-se que o rejeito de Mn sob o ponto de vista do seu aproveitamento na construção civil, em função das análises realizadas, indicou o seu uso como proposta viável na forma de adição como fíler e como agregado miúdo. Portanto, viabilizando assim uma alternativa exequível para a sua retirada das barragens, pois, por mais que o descarte seja feito em barragens seguras, o volume do rejeito cresce vertiginosamente, tornando-se um problema ambiental, uma vez que no período chuvoso, os rejeitos têm alcançado os cursos d'água do rio Itacaiúnas impossibilitando o seu uso.

## 5.2. SUGESTÕES

Considerando a enorme quantidade de rejeitos descartados nas barragens, é importante que se dê continuidade nos estudos, cujo objetivo é estudar o aproveitamento do rejeito de manganês como material de construção civil. Sendo assim, descreve-se a seguir algumas propostas de trabalhos para futuras pesquisas:

- Realizar um estudo de calcinação do rejeito de manganês;
- Estudar o aproveitamento do rejeito de Mn como fíler no cimento Portland CP I, nos teores de 6, 8 e 10% nas argamassas para 7, 28 e 63 dias, analisar as propriedades no estado fresco (índice de consistência, teor de ar incorporado e densidade de massa), assim como, analisar as propriedades mecânicas e de durabilidade, como: resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água capilar, absorção de água total, índice de vazios, porosidade por intrusão de mercúrio, carbonatação e absorção de cloretos;
- Estudar o aproveitamento do rejeito de Mn como agregado miúdo na confecção de concretos em teores acima de 30% e analisar as propriedades mecânicas e de durabilidade;
- Estudar outra dosagem do concreto para os teores de 15, 20, 25 e 30% não fixando a relação água/cimento e analisar suas propriedades mecânicas e de durabilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007. Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578: Cimento Portland Composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13028. Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-4. Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5736: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1999.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5751: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211. Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222. Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522. Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779. Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9935. Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 5732: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.

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

AÏTCIN, P.C. Concreto de Alto Desempenho. São Paulo: Pini, 2009.

ANDRADE, Luana Caetano Rocha de. Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, *in natura* e segregados, para aplicação como material de construção civil. Tese. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2014.

ARISTIMUNHO, P. B.; BERTOCINI, S. R. Aplicação de lama de minério de ferro em forma de pó na presença de cimento Portland. Rev. IBRACON Estruturas e Materiais, São Paulo, v.5, n.2, p. 153 – 165. Abril, 2012.

BAUER, F. L. A. Materiais de Construção, 1. 5ª Edição revisada. Rio de Janeiro: LTC, p.488, 2015.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral. Brasília: DNPM, v. 31, 125 p., 2011.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral. Brasília: DNPM, v. 35, 135 p., 2015.

CALLISTER, W. D. Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada. / William D. Callister, Jr.; Tradução: Sérgio Murilo Stamile Soares. 4. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CARASEK, H.; ARAÚJO, R. C.; CASCUDO, O.; ANGELIM, R. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. Matéria, v. 21, n. 3, p. 714-732, 2016.

CASTRO, Camila Gonçalves. Estudo do aproveitamento de rejeitos do beneficiamento do Manganês pela indústria cerâmica. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da rede Temática. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2011.

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

CAVALCANTE, A. L. B.; VIANA, J. P.; SILVA, A. P. M. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas. Relatório de Pesquisa. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA 2012.

CETEM, Centro de Tecnologia Mineral. Rochas & Minerais Industriais. Usos e especificações. Editores: Adão Benvindo da Luz e Fernando Freitas Lins. 2ª edição. Rio de Janeiro, 2008.

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

COELHO, Edmar Fernando Freitas. Estudo do comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro reforçados com fibras sintéticas. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2008.

CRUZ NETO, Raimundo. A expansão da exploração minerária na Amazônia e suas consequências, In: Fórum Carajás, 13 jul. 2014. Disponível em: <http://www.forumcarajas.org.br/portal.php?artigo&mostra&2880>. Acesso em: 02 fev. 2016.

CRUZ, L. Deslizamento de terra em mina deixa vítimas e mobiliza bombeiros em Itabirito. Estado de Minas, Belo Horizonte, 10 set. 2014. Disponível em: <[http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2014/09/10/interna\\_gerais,567542/deslizamento-de-terra-em-mina-deixa-vitimas-e-mobiliza-bombeiros-em-itabirito.shtml](http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2014/09/10/interna_gerais,567542/deslizamento-de-terra-em-mina-deixa-vitimas-e-mobiliza-bombeiros-em-itabirito.shtml)> Acesso em: 06 set. 2016.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. Cement and Concrete Research 36, p.264 – 277, 2006.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações. 1 ed., São Paulo: IBRACON, 2005. pp. 345-379.

EVANGELISTA, Neuza. Estudo da utilização de resíduos industriais de lã cerâmica e lã de vidro em argamassas e concretos. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2011.

FARIA, G. L., REIS, E. L., JANOTTI JR, N., ARAÚJO, F. G. S. Caracterização Química, Física e Mineralógica do produto granulado de manganês proveniente da Mina do Azul. Revista Matéria, v. 17, n. 1, pp. 901 – 908, 2012.

FARIA, Geraldo Lúcio de. Estudo Geometalúrgico de Granulados e Pelota de Minério de Manganês. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2011.

GANESH PRABHU, G.; HYUN, J. H.; KIM, Y. Y. Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production. Construction and Building Materials 70, p. 514–521, 2014.

HAN, F.; SONG, S.; LIU, J. Early-age hydration characteristics of composite binder containing iron tailing powder. Powder Technology 315, p.322–331, 2017.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. São Paulo: Pini; Brasília: SENAI, p. 349, 1992.

HUANG, X.; RANADE R.; LI, V. C.; ASCE, F. Feasibility Study of Developing Green ECC Using Iron Ore. Journal of Materials in Civil Engineering. V.5, Issue 7, p. 923 - 931, 2013

IMI. International Manganese Institute. Disponível em: <<http://www.manganese.org/about-mn/history/>> Acesso em: 01 set 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. Guia para planejamento do fechamento de mina. 1ª Edição. 224 p. 2013. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br>> Acesso em: 06 set. 2016.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength. Cement and Concrete Research 35, p.1092– 1105, 2005.

LIMA, R. M. F.; VASCONCELOS, J. A. and SILVA, G. R. da. Flotação aniônica de rejeito de minério de manganês. Rem: Revista da Escola de Minas, Ouro Preto, vol.61, n.3, p.337-342, set. 2008. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-4672008000300012](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-4672008000300012)> Acesso em: 04 mar. 2016.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3ª Edição. São Paulo: IBRACON, 674 p, 2008.

MELO, Valéria Alves Rodrigues de. Utilização do resíduo gerado na exploração do itabirito em substituição ao agregado miúdo natural para preparação de argamassa de cimento Portland. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Universidade Estadual de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. Mechanical Behavior of Materials. Cambridge University, 2nd edition, 2008.

MINERAÇÃO BURITAMA S.A. Disponível em:  
<<http://www.mineracaoburitama.com.br/buritama/>>. Acesso em: 28 de nov. de 2016.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. Agenda 21. Disponível em:  
<http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21>. Acesso em 12 de outubro de 2016.

MME, Ministério de Minas e Energia. Produto 11: Minério de manganês, Consultor. Luiz Felipe Quaresma. Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia. Relatório Técnico 19, Perfil da mineração de manganês, ago. 2009.

NASCIMENTO, Antônio Carlos Santos do. Tijolo Solo Cimento com Adição de Rejeito de Manganês do Sudeste Paraense. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2015.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto / A. M. Neville, J. J. Brooks: tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M. Tecnologia do concreto / A. M. Neville, J. J. Brooks: tradução: Ruy Alberto Cremonini. 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLSEN, S. E.; TANGSTAD, M.; LINDSTAD, T. Production of Manganese Ferroalloys. Trondheim: Tapir Academic Press, 2007.

PILAR, Ronaldo. Avaliação da Atividade Pozolânica da Cinza Pesada Moída em Pastas de Cimento Portland. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

POUEY, M. T. F. Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico. Tese. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

REIS, Érica Linhares. Caracterização de Resíduos Provenientes da planta de Beneficiamento do Minério de Manganês Sílico - Carbonatado da RDM - Unidade Morro de Mina. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2005.

REIS, Érica Linhares. Caracterização e Tratamento de alguns Minérios de Manganês Utilizados para a produção de Ferro-Ligas, com Ênfase no comportamento do As, Pb, Cd, Hg e Zn. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

RODRIGUES, L. dos S. et al. Avaliação tecnológica de cerâmicas tradicionais incorporadas com rejeito do minério de manganês. Rem: Cerâmica, São Paulo, vol.60, n.356, p.580-585, dez. 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v60n356/v60n356a18.pdf>>. Acesso em: 03 de março de 2016.

SALGUERO, F.; GRANDE, J. A.; VALENTE, T.; GARRIDO, R.; DE LA TORRE, M. L.; FORTES, J. C.; SÁNCHEZ, A. Recycling of manganese gangue materials from waste-dumps in the Iberian Pyrite Belt – Application as filler for concrete production. Construction and Building Materials 54, p. 363 – 368, 2014.

SAMPAIO, João Alves; ANDRADE, Mônica Calixto de; DUTRA, Achilles Junqueira Boudort; PENNA, Márcio Torres Moreira. Manganês. Capítulo 28. Comunicação Técnica elaborada para Edição do Livro Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações Pág. 633 a 648. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. Ministério de Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro. Dezembro, 2008.

SANTOS, Olívia de Souza Heleno. Reciclagem de um Resíduo Proveniente do Beneficiamento de Minério De Manganês. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2013.

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

SIDDIQUE, R.; SCHUTTER, G.; NOUMOWEC, A. Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials* 23, p. 976–980, 2009.

SILVA, João Paulo Souza. Impactos ambientais causados por mineração. *Revista Espaço da Sophia*. n.8. Novembro, 2007.

SMYL, D., GHASEMZADEH, F., POUR-GHAZ, M. Modeling water absorption in concrete and mortar with distributed damage, *Construction and Building Materials* 125, pp. 438-449, 2016.

TOFFOLO, R. V. M.; FILHO, J. N. S.; BATSITA, J. O. S.; SILVA, S. N.; CURY, A. A.; PEIXOTO, R. A. F. Viabilidade técnica de elementos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito de barragem de minério de ferro. In: *Anais do 56º Congresso Brasileiro Do Concreto - CBC2014 – 56CBC*. 2014.

YANG, C.; LV, X.; TIAN, X.; WANG, Y.; KOMARNENI, S. An investigation on the use of electrolytic manganese residue as filler in sulfur concrete. *Construction and Building Materials* 73, p. 305–310, 2014.

YELLISHETTY, M. KARPE, V. REDDY. E. Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: a case study. *Resour Conserv Recycle*. Vol. 52:1283–9. 2008.

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

## APÊNDICE

### APÊNDICE A – Etapa 1: Resultados da reação álcali agregado

Tabela A.1 – Resultado das expansões por idade

| Data                 | Idade | Amostra | Leitura (mm)                 | Expansão (%) | Expansão média (%) |
|----------------------|-------|---------|------------------------------|--------------|--------------------|
| 03/04/2017           | X     | X       | Moldagem                     | X            | X                  |
| 04/04/2017           | X     | X       | Desmoldagem                  | X            | X                  |
| 05/04/2017           | 1     | Barra A | 1,60                         | 0            | 0                  |
|                      |       | Barra B | 0,31                         | 0            |                    |
|                      |       | Barra C | 1,11                         | 0            |                    |
| 06/04/2017           | 2     | Barra A | 1,70                         | 0,035        | 0,023              |
|                      |       | Barra B | 0,34                         | 0,011        |                    |
|                      |       | Barra C | 1,18                         | 0,024        |                    |
| 07/04/2017           | 3     | Barra A | 1,75                         | 0,0170       | 0,019              |
|                      |       | Barra B | 0,44                         | 0,035        |                    |
|                      |       | Barra C | 1,19                         | 0,003        |                    |
| 11/04/2017           | 7     | Barra A | 1,75                         | 0,059        | 0,068              |
|                      |       | Barra B | 0,44                         | 0,084        |                    |
|                      |       | Barra C | 1,19                         | 0,059        |                    |
| 13/04/2017           | 9     | Barra A | 1,98                         | 0,098        | 0,103              |
|                      |       | Barra B | 0,68                         | 0,119        |                    |
|                      |       | Barra C | 1,44                         | 0,091        |                    |
| 17/04/2017           | 13    | Barra A | 1,84                         | 0,049        | 0,052              |
|                      |       | Barra B | 0,48                         | 0,049        |                    |
|                      |       | Barra C | 1,35                         | 0,059        |                    |
| 19/04/2017           | 15    | Barra A | 1,03                         | -0,234       | -0,119             |
|                      |       | Barra B | 0,69                         | 0,123        |                    |
|                      |       | Barra C | 0,48                         | -0,245       |                    |
| 24/04/2017           | 20    | Barra A | 2,00                         | 0,105        | 0,096              |
|                      |       | Barra B | 0,54                         | 0,070        |                    |
|                      |       | Barra C | 1,50                         | 0,112        |                    |
| 26/04/2017           | 22    | Barra A | 1,96                         | 0,091        | 0,092              |
|                      |       | Barra B | 0,63                         | 0,102        |                    |
|                      |       | Barra C | 1,42                         | 0,084        |                    |
| 28/04/2017           | 24    | Barra A | 1,93                         | -0,010       | -0,013             |
|                      |       | Barra B | 0,61                         | -0,007       |                    |
|                      |       | Barra C | 1,36                         | -0,021       |                    |
| 02/05/2017           | 28    | Barra A | 1,91                         | 0,073        | 0,069              |
|                      |       | Barra B | 0,54                         | 0,070        |                    |
|                      |       | Barra C | 1,36                         | 0,063        |                    |
| <b>Classificação</b> |       |         | <b>Potencialmente inócuo</b> |              |                    |

APÊNDICE B – Etapa 2: Resultados dos ensaios para as argamassas

- **Resultado do ensaio de resistência à compressão**

Tabela B.1 – Resultados individuais de resistência à compressão para as argamassas

| Argamassa    | Resistência à compressão (MPa) | Média | Desvio Padrão | Coefficiente de variação (%) |
|--------------|--------------------------------|-------|---------------|------------------------------|
| <b>ARef</b>  | 28,65                          | 27,62 | 1,79          | 6,48                         |
|              | 29,19                          |       |               |                              |
|              | 27,47                          |       |               |                              |
|              | 25,16                          |       |               |                              |
| <b>A6Mn</b>  | 35,48                          | 32,74 | 4,65          | 14,21                        |
|              | 35,38                          |       |               |                              |
|              | 27,37                          |       |               |                              |
| <b>A8Mn</b>  | 31,35                          | 34,21 | 3,32          | 9,71                         |
|              | 37,85                          |       |               |                              |
|              | 33,42                          |       |               |                              |
| <b>A10Mn</b> | 27,57                          | 29,08 | 1,38          | 4,74                         |
|              | 30,27                          |       |               |                              |
|              | 29,39                          |       |               |                              |

- ❖ **Análise estatística**

- Teste de normalidade

Tabela B.2 - Teste de normalidade para todos os grupos de dados para análise de comparação no ensaio de resistência à compressão

| %Mn          | Normalidade $p < 0,05$ |         |         |
|--------------|------------------------|---------|---------|
|              | Shapiro-Wilk           |         |         |
|              | Estatística            | P-valor | Parecer |
| <b>ARef</b>  | 0,916                  | 0,517   | OK      |
| <b>A6Mn</b>  | 0,759                  | 0,021   | NÃO OK  |
| <b>A8Mn</b>  | 0,958                  | 0,605   | OK      |
| <b>A10Mn</b> | 0,961                  | 0,621   | OK      |

- Teste de homogeneidade

Tabela B.3 - Teste de Levene para homogeneidade dos dados no ensaio de resistência à compressão

| <b>Homocedasticidade</b> |         |         |
|--------------------------|---------|---------|
| <b>Levene</b>            |         |         |
| Estatística              | P-valor | Parecer |
| 0,29                     | 0,83    | OK      |

- Teste de Kruskal-Wallis

Tabela B.4 – Teste de Kruskal-Wallis, teste não paramétrico utilizado para comparar três ou mais populações

| <b>Informação</b>           | <b>Valor</b> |
|-----------------------------|--------------|
| Kruskal-Wallis qui-quadrado | 5,885        |
| Graus de Liberdade          | 3            |
| P-valor                     | 0,117        |

| <b>Comparações Múltiplas</b> |                            |                          |                  |
|------------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------|
| <b>Fatores comparados</b>    | <b>Diferença Observada</b> | <b>Diferença Crítica</b> | <b>Diferença</b> |
| 0 - 10                       | 2,58                       | 7,85                     | Não              |
| 0 - 6                        | 4,58                       | 7,85                     | Não              |
| 0 - 8                        | 6,92                       | 7,85                     | Não              |
| 6 - 10                       | 2,00                       | 8,39                     | Não              |
| 8 - 10                       | 4,33                       | 8,39                     | Não              |
| 8 - 6                        | 2,33                       | 8,39                     | Não              |

- **Resultado do ensaio de absorção de água**

Tabela B.5 – Resultados individuais de absorção de água para as argamassas

| <b>% Mn</b>                         | <b>Aref</b> | <b>A6Mn</b> | <b>A8Mn</b> | <b>A10Mn</b> |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>CP 1</b>                         | 9,24        | 7,96        | 8,10        | 8,80         |
| <b>CP 2</b>                         | 9,39        | 7,80        | 8,00        | 8,54         |
| <b>CP 3</b>                         | 8,90        | 7,96        | 8,07        | 8,78         |
| <b>CP 4</b>                         | 9,08        | -           | -           | -            |
| <b>Média</b>                        | 9,15        | 7,91        | 8,06        | 8,71         |
| <b>Desvio padrão</b>                | 0,18        | 0,08        | 0,04        | 0,12         |
| <b>Coefficiente de variação (%)</b> | 1,98        | 0,96        | 0,53        | 1,35         |

❖ **Análise estatística**

- Teste de normalidade

Tabela B.6 - Teste de normalidade para todos os grupos de dados para análise de comparação no ensaio de absorção de água

| <b>Normalidade <math>p &lt; 0,05</math></b> |                     |                |                |
|---|---------------------|----------------|----------------|
| <b>%Mn</b>                                  | <b>Shapiro-Wilk</b> |                |                |
|   | <b>Estatística</b>  | <b>P-valor</b> | <b>Parecer</b> |
| <b>ARef</b>                                 | 0,992               | 0,968          | OK             |
| <b>A6Mn</b>                                 | 0,758               | 0,017          | NÃO OK         |
| <b>A8Mn</b>                                 | 0,947               | 0,558          | OK             |
| <b>A10Mn</b>                                | 0,799               | 0,113          | OK             |

- Teste de homogeneidade

Tabela B.7 - Teste de Levene para homogeneidade dos dados no ensaio de absorção de água

| <b>Homocedasticidade</b> |                |                |
|--------------------------|----------------|----------------|
| <b>Levene</b>            |                |                |
| <b>Estatística</b>       | <b>P-valor</b> | <b>Parecer</b> |
| 1,250                    | 0,348          | OK             |

- Teste de Kruskal-Wallis

Tabela B.8 – Teste de Kruskal-Wallis, teste não paramétrico utilizado para comparar três ou mais populações

| <b>Informação</b>           | <b>Valor</b> |
|-----------------------------|--------------|
| Kruskal-Wallis qui-quadrado | 11,2747      |
| Graus de Liberdade          | 3            |
| P-valor                     | 0,0103       |

| <b>Comparações Múltiplas</b> |                            |                          |                  |
|------------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------|
| <b>Fatores comparados</b>    | <b>Diferença Observada</b> | <b>Diferença Crítica</b> | <b>Diferença</b> |
| 0 - 10                       | 3,5                        | 7,8473                   | Não              |
| 0 - 6                        | 9,5                        | 7,8473                   | Sim              |
| 0 - 8                        | 6,5                        | 7,8473                   | Não              |
| 6 - 10                       | 6                          | 8,3891                   | Não              |
| 8 - 10                       | 3                          | 8,3891                   | Não              |
| 8 - 6                        | 3                          | 8,3891                   | Não              |

- **Resultado do ensaio de índice de vazios**

Tabela B.9 – Resultados individuais de índice de vazios para as argamassas

| <b>% Mn</b>                         | <b>Aref</b> | <b>A6Mn</b> | <b>A8Mn</b> | <b>A10Mn</b> |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>CP1</b>                          | 18,22       | 16,07       | 16,18       | 17,35        |
| <b>CP2</b>                          | 18,58       | 15,78       | 16,21       | 16,94        |
| <b>CP3</b>                          | 17,64       | 16,09       | 16,25       | 17,40        |
| <b>CP4</b>                          | 17,35       | -           | -           | -            |
| <b>Média</b>                        | 17,95       | 15,98       | 16,21       | 17,23        |
| <b>Desvio padrão</b>                | 0,48        | 0,14        | 0,03        | 0,21         |
| <b>Coefficiente de variação (%)</b> | 2,68        | 0,89        | 0,17        | 1,20         |

- ❖ **Análise estatística**

- Teste de normalidade

Tabela B.10 - Teste de normalidade para todos os grupos de dados para análise de comparação no ensaio de índice de vazios

| <b>Normalidade p&lt;0,05</b> |                     |                |                |
|------------------------------|---------------------|----------------|----------------|
| <b>%Mn</b>                   | <b>Shapiro-Wilk</b> |                |                |
|                              | <b>Estatística</b>  | <b>P-valor</b> | <b>Parecer</b> |
| <b>Aref</b>                  | 0,960               | 0,780          | OK             |
| <b>A6Mn</b>                  | 0,798               | 0,111          | OK             |
| <b>A8Mn</b>                  | 0,990               | 0,811          | OK             |
| <b>A10Mn</b>                 | 0,823               | 0,171          | OK             |

- Teste de homogeneidade

Tabela B.11 - Teste de Levene para homogeneidade dos dados no ensaio de índice de vazios

| <b>Homocedasticidade</b> |                |                |
|--------------------------|----------------|----------------|
| <b>Levene</b>            |                |                |
| <b>Estatística</b>       | <b>P-valor</b> | <b>Parecer</b> |
| 3,825                    | 0,051          | OK             |

- ANOVA de uma via

Tabela B.12 - Anova de uma via para comparação entre grupos maiores que dois e independentes para ensaio de índice de vazios

| ANOVA           |      |                   |                |             |             |
|-----------------|------|-------------------|----------------|-------------|-------------|
|                 | G.L. | Soma de Quadrados | Quadrado Médio | Estat. F    | P-valor     |
| <b>Fator</b>    | 3    | 0,005648571       | 0,001882857    | 25,32559661 | 0,000101233 |
| <b>Resíduos</b> | 9    | 0,000669114       | 7,4346E-05     |             |             |

- Comparações múltiplas

Tabela B.13 - Teste de Tukey para comparação dos dados para o ensaio de índice de vazios (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa;  $P < 0,05$ )

|             | Níveis       |              |              | P-valor       |
|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| <b>6-0</b>  | -0,05018076  | -0,070739294 | -0,029622226 | 0,00015548 *  |
| <b>8-0</b>  | -0,044035397 | -0,064593931 | -0,023476863 | 0,000424269 * |
| <b>10-0</b> | -0,01753038  | -0,038088914 | 0,003028154  | 0,099636658   |
| <b>8-6</b>  | 0,006145363  | -0,015832634 | 0,02812336   | 0,818651441   |
| <b>10-6</b> | 0,03265038   | 0,010672383  | 0,054628378  | 0,005500476*  |
| <b>10-8</b> | 0,026505017  | 0,00452702   | 0,048483014  | 0,019140668 * |

Tabela B. 14 – Variação entre grupos (Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre argamassas para a mesma variável;  $P < 0,05$ ).

| Fator | Médias | Grupos |
|-------|--------|--------|
| 0     | 1,2538 | a      |
| 10    | 1,2363 | a      |
| 8     | 1,2098 | b      |
| 6     | 1,2036 | b      |

APÊNDICE C – Etapa 3: Resultados dos ensaios para os concretos

• **Resultado dos ensaios mecânicos para o concreto**

Tabela C.1 – Resultados individuais de resistência à compressão para os concretos

| <b>% Mn</b>  | <b>Resistência à compressão (MPa)</b> | <b>Média</b> | <b>Desvio padrão</b> | <b>Coefficiente de Variação (%)</b> |
|--------------|---------------------------------------|--------------|----------------------|-------------------------------------|
| <b>REF</b>   | 34,58                                 | 31,34        | 3,15                 | 10,06                               |
|              | 32,36                                 |              |                      |                                     |
|              | 27,07                                 |              |                      |                                     |
| <b>C15Mn</b> | 34,46                                 | 30,41        | 3,03                 | 9,97                                |
|              | 29,61                                 |              |                      |                                     |
|              | 27,16                                 |              |                      |                                     |
| <b>C20Mn</b> | 27,23                                 | 28,11        | 2,40                 | 8,53                                |
|              | 25,71                                 |              |                      |                                     |
|              | 31,38                                 |              |                      |                                     |
| <b>C25Mn</b> | 28,41                                 | 27,02        | 0,99                 | 3,66                                |
|              | 26,49                                 |              |                      |                                     |
|              | 26,17                                 |              |                      |                                     |
| <b>C30Mn</b> | 23,81                                 | 26,11        | 1,72                 | 6,58                                |
|              | 26,59                                 |              |                      |                                     |
|              | 27,94                                 |              |                      |                                     |

Tabela C.2 – Resultados individuais de resistência à tração para os concretos

| <b>%Mn</b>   | <b>Resistência à Tração (MPa)</b> | <b>Média</b> | <b>Desvio padrão</b> | <b>Coefficiente de variação (%)</b> |
|--------------|-----------------------------------|--------------|----------------------|-------------------------------------|
| <b>REF</b>   | 2,82                              | 2,28         | 0,54                 | 23,68                               |
|              | 1,74                              |              |                      |                                     |
| <b>C15Mn</b> | 2,61                              | 2,57         | 0,04                 | 1,56                                |
|              | 2,53                              |              |                      |                                     |
| <b>C20Mn</b> | 1,80                              | 2,00         | 0,20                 | 10,00                               |
|              | 2,20                              |              |                      |                                     |
| <b>C25Mn</b> | 2,67                              | 2,65         | 0,02                 | 0,75                                |
|              | 2,63                              |              |                      |                                     |
| <b>C30Mn</b> | 3,87                              | 3,35         | 0,52                 | 15,52                               |
|              | 2,83                              |              |                      |                                     |

Tabela C.3 – Resultados individuais do módulo de elasticidade para os concretos

| %Mn          | Módulo de elasticidade (GPa) | Média | Desvio padrão | Coefficiente de variação (%) |
|--------------|------------------------------|-------|---------------|------------------------------|
| <b>CRef</b>  | 30,94                        | 29,38 | 3,02          | 10,29                        |
|              | 32,04                        |       |               |                              |
|              | 25,15                        |       |               |                              |
| <b>C15Mn</b> | 26,27                        | 27,01 | 1,01          | 3,74                         |
|              | 26,33                        |       |               |                              |
|              | 28,44                        |       |               |                              |
| <b>C20Mn</b> | 28,88                        | 29,41 | 0,81          | 2,74                         |
|              | 28,80                        |       |               |                              |
|              | 30,55                        |       |               |                              |
| <b>C25Mn</b> | 29,34                        | 30,09 | 3,29          | 10,94                        |
|              | 34,44                        |       |               |                              |
|              | 26,48                        |       |               |                              |
| <b>C30Mn</b> | 31,30                        | 31,71 | 1,25          | 3,93                         |
|              | 30,43                        |       |               |                              |
|              | 33,40                        |       |               |                              |

#### ❖ Análise estatística

- Análise entre grupos (ANOVA de uma via)

Os dados dos ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, foram comparados entre grupos e não houve variação significativa;  $P > 0,05$ .

Tabela C.4 - Anova de uma via para comparação entre grupos maiores que dois e independentes (Resultados do ensaio de resistência à compressão)

| Fonte da variação | G.L. | Soma dos quadrados | Quadrado Médio | F    | Valor-P | F crítico |
|-------------------|------|--------------------|----------------|------|---------|-----------|
| Teor              | 4    | 59,05              | 14,76          | 1,71 | 0,22    | 3,48      |
| Resíduos          | 10   | 86,47              | 8,65           |      |         |           |

Tabela C.5 - Anova de uma via para comparação entre grupos maiores que dois e independentes (Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral)

| Fonte da variação | G.L. | Soma dos quadrados | Quadrado Médio | F    | Valor-P | F crítico |
|-------------------|------|--------------------|----------------|------|---------|-----------|
| Teor              | 4    | 2,05               | 0,51           | 2,12 | 0,22    | 5,19      |
| Resíduos          | 5    | 1,21               | 0,24           |      |         |           |

Tabela C.6 - Anova de uma via para comparação entre grupos maiores que dois e independentes (Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral)

| Fonte da variação | G.L. | Soma dos quadrados | Quadrado Médio | F    | Valor-P | F crítico |
|-------------------|------|--------------------|----------------|------|---------|-----------|
| Teor              | 4    | 34,30              | 8,57           | 1,23 | 0,36    | 3,48      |
| Resíduos          | 10   | 69,59              | 6,96           |      |         |           |

- **Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade**

Tabela C.7 – resultados individuais de absorção de água por capilaridade

| Tempo (h) | Absorção (Kg/m <sup>2</sup> ) |       |       |       |       |
|-----------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|           | Cref                          | C15Mn | C20Mn | C25Mn | C30Mn |
| 3         | 0,78                          | 0,32  | 0,32  | 0,32  | 0,32  |
|           | 0,89                          | 0,16  | 0,32  | 0,48  | 0,16  |
|           | 1,00                          | 0,32  | 0,32  | 0,48  | 0,32  |
| 6         | 1,16                          | 0,32  | 0,48  | 0,48  | 0,32  |
|           | 1,31                          | 0,32  | 0,48  | 0,64  | 0,32  |
|           | 1,44                          | 0,48  | 0,64  | 0,80  | 0,48  |
| 24        | 2,21                          | 0,80  | 0,95  | 1,11  | 0,80  |
|           | 2,51                          | 0,64  | 0,95  | 1,27  | 0,64  |
|           | 2,71                          | 0,80  | 1,11  | 1,91  | 0,95  |
| 48        | 3,07                          | 0,80  | 1,27  | 1,27  | 0,95  |
|           | 3,36                          | 0,95  | 1,11  | 1,59  | 0,80  |
|           | 3,32                          | 0,95  | 1,27  | 2,39  | 0,95  |
| 72        | 3,21                          | 0,95  | 1,27  | 1,43  | 0,95  |
|           | 3,52                          | 0,95  | 1,27  | 1,75  | 0,80  |
|           | 3,51                          | 0,95  | 1,43  | 2,55  | 1,11  |

Tabela C.8 – Resultados da média, desvio padrão e coeficiente de variação de absorção de água por capilaridade

| <b>Absorção Média Kg/m<sup>2</sup></b>         |             |              |              |              |              |
|--|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Tempo (h)</b>                               | <b>Cref</b> | <b>C15Mn</b> | <b>C20Mn</b> | <b>C25Mn</b> | <b>C30Mn</b> |
| 3  | 0,89        | 0,27         | 0,32         | 0,42         | 0,27         |
| 6  | 1,31        | 0,37         | 0,53         | 0,64         | 0,37         |
| 24   | 2,48        | 0,74         | 1,01         | 1,43         | 0,80         |
| 48   | 3,25        | 0,90         | 1,22         | 1,75         | 0,90         |
| 72   | 3,41        | 0,95         | 1,33         | 1,91         | 0,95         |
| <b>Absorção Desvio Padrão Kg/m<sup>2</sup></b> |             |              |              |              |              |
| <b>Tempo (h)</b>                               | <b>Cref</b> | <b>C15Mn</b> | <b>C20Mn</b> | <b>C25Mn</b> | <b>C30Mn</b> |
| 3  | 0,09        | 0,08         | 0,00         | 0,08         | 0,08         |
| 6  | 0,11        | 0,08         | 0,08         | 0,13         | 0,08         |
| 24   | 0,21        | 0,08         | 0,08         | 0,34         | 0,13         |
| 48   | 0,13        | 0,08         | 0,08         | 0,47         | 0,08         |
| 72   | 0,14        | 0,00         | 0,08         | 0,47         | 0,13         |
| <b>Coeficiente de Variação (%)</b>             |             |              |              |              |              |
| <b>Tempo (h)</b>                               | <b>Cref</b> | <b>C15Mn</b> | <b>C20Mn</b> | <b>C25Mn</b> | <b>C30Mn</b> |
| 3  | 10,16       | 28,28        | 0,00         | 17,68        | 28,28        |
| 6  | 8,55        | 20,20        | 14,14        | 20,41        | 20,20        |
| 24   | 8,34        | 10,10        | 7,44         | 24,00        | 16,33        |
| 48   | 3,92        | 8,32         | 6,15         | 26,76        | 8,32         |
| 72   | 4,24        | 0,00         | 5,66         | 24,53        | 13,61        |

- Teste de Kruskal-Wallis

Tabela C.9 – Comparação entre grupos de 3 horas

| <b>Informação</b>            | <b>Valor</b>               |  |                  |
|------------------------------|----------------------------|--|------------------|
| Kruskal-Wallis qui-quadrado  | 11,21223471                | <b>3 horas (comparação entre grupos)</b> |                  |
| Graus de Liberdade           | 4                          |  |                  |
| P-valor                      | 0,02427954                 |  |                  |
| <b>Comparações Múltiplas</b> |                            |  |                  |
| <b>Fatores comparados</b>    | <b>Diferença Observada</b> | <b>Diferença Crítica</b>                 | <b>Diferença</b> |
| 0 - 15                       | 8,17                       | 10,25                                    | Não              |
| 0 - 20                       | 7,33                       | 10,25                                    | Não              |
| 0 - 25                       | 3,67                       | 10,25                                    | Não              |
| 0 - 30                       | 10,83                      | 10,25                                    | Sim              |
| 15 - 20                      | 0,83                       | 10,25                                    | Não              |
| 15 - 25                      | 4,50                       | 10,25                                    | Não              |
| 15 - 30                      | 2,67                       | 10,25                                    | Não              |
| 20 - 25                      | 3,67                       | 10,25                                    | Não              |
| 20 - 30                      | 3,50                       | 10,25                                    | Não              |
| 25 - 30                      | 7,17                       | 10,25                                    | Não              |

Tabela C.10 – Comparação entre grupos de 6 horas

| <b>Informação</b>            | <b>Valor</b>               |                                     |                  |
|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|------------------|
| Kruskal-Wallis qui-quadrado  | 11,48                      | <b>6h (comparação entre grupos)</b> |                  |
| Graus de Liberdade           | 4                          |                                     |                  |
| P-valor                      | 0,021667538                |                                     |                  |
| <b>Comparações Múltiplas</b> |                            |                                     |                  |
| <b>Fatores comparados</b>    | <b>Diferença Observada</b> | <b>Diferença Crítica</b>            | <b>Diferença</b> |
| 0 - 15                       | 9,33                       | 10,25                               | Não              |
| 0 - 20                       | 6,00                       | 10,25                               | Não              |
| 0 - 25                       | 3,83                       | 10,25                               | Não              |
| 0 - 30                       | 10,83                      | 10,25                               | Sim              |
| 15 - 20                      | 3,33                       | 10,25                               | Não              |
| 15 - 25                      | 5,50                       | 10,25                               | Não              |
| 15 - 30                      | 1,50                       | 10,25                               | Não              |
| 20 - 25                      | 2,17                       | 10,25                               | Não              |
| 20 - 30                      | 4,83                       | 10,25                               | Não              |
| 25 - 30                      | 7,00                       | 10,25                               | Não              |

Tabela C.11 – Comparação entre grupos de 24 horas

| <b>Informação</b>            | <b>Valor</b>               |                                      |                  |
|------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|------------------|
| Kruskal-Wallis qui-quadrado  | 12,47549909                | <b>24h (comparação entre grupos)</b> |                  |
| Graus de Liberdade           | 4                          |                                      |                  |
| P-valor                      | 0,014144361                |                                      |                  |
| <b>Comparações Múltiplas</b> |                            |                                      |                  |
| <b>Fatores comparados</b>    | <b>Diferença Observada</b> | <b>Diferença Crítica</b>             | <b>Diferença</b> |
| 0 - 15                       | 10,67                      | 10,25                                | Sim              |
| 0 - 20                       | 6,17                       | 10,25                                | Não              |
| 0 - 25                       | 3,17                       | 10,25                                | Não              |
| 0 - 30                       | 10,00                      | 10,25                                | Sim              |
| 15 - 20                      | 4,50                       | 10,25                                | Não              |
| 15 - 25                      | 7,50                       | 10,25                                | Não              |
| 15 - 30                      | 0,67                       | 10,25                                | Não              |
| 20 - 25                      | 3,00                       | 10,25                                | Não              |
| 20 - 30                      | 3,83                       | 10,25                                | Não              |
| 25 - 30                      | 6,83                       | 10,25                                | Não              |

Tabela C.12 – Comparação entre grupos de 48 horas

| <b>Informação</b>            | <b>Valor</b>               |                                      |                  |
|------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|------------------|
| Kruskal-Wallis qui-quadrado  | 12,79733817                | <b>48h (comparação entre grupos)</b> |                  |
| Graus de Liberdade           | 4                          |                                      |                  |
| P-valor                      | 0,012309685                |                                      |                  |
| <b>Comparações Múltiplas</b> |                            |                                      |                  |
| <b>Fatores comparados</b>    | <b>Diferença Observada</b> | <b>Diferença Crítica</b>             | <b>Diferença</b> |
| 0 - 15                       | 10,17                      | 10,25                                | Sim              |
| 0 - 20                       | 5,67                       | 10,25                                | Não              |
| 0 - 25                       | 3,33                       | 10,25                                | Não              |
| 0 - 30                       | 10,83                      | 10,25                                | Sim              |
| 15 - 20                      | 4,50                       | 10,25                                | Não              |
| 15 - 25                      | 6,83                       | 10,25                                | Não              |
| 15 - 30                      | 0,67                       | 10,25                                | Não              |
| 20 - 25                      | 2,33                       | 10,25                                | Não              |
| 20 - 30                      | 5,17                       | 10,25                                | Não              |
| 25 - 30                      | 7,50                       | 10,25                                | Não              |

Tabela C.13 – Comparação entre grupos de 72 horas

| <b>Informação</b>            | <b>Valor</b>               |                                      |                  |
|------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|------------------|
| Kruskal-Wallis qui-quadrado  | 12,92758827                | <b>72h (comparação entre grupos)</b> |                  |
| Graus de Liberdade           | 4                          |                                      |                  |
| P-valor                      | 0,011635084                |                                      |                  |
| <b>Comparações Múltiplas</b> |                            |                                      |                  |
| <b>Fatores comparados</b>    | <b>Diferença Observada</b> | <b>Diferença Crítica</b>             | <b>Diferença</b> |
| 0 - 15                       | 10,17                      | 10,25                                | Sim              |
| 0 - 20                       | 6,00                       | 10,25                                | Não              |
| 0 - 25                       | 3,00                       | 10,25                                | Não              |
| 0 - 30                       | 10,83                      | 10,25                                | Sim              |
| 15 - 20                      | 4,17                       | 10,25                                | Não              |
| 15 - 25                      | 7,17                       | 10,25                                | Não              |
| 15 - 30                      | 0,67                       | 10,25                                | Não              |
| 20 - 25                      | 3,00                       | 10,25                                | Não              |
| 20 - 30                      | 4,83                       | 10,25                                | Não              |
| 25 - 30                      | 7,83                       | 10,25                                | Não              |