



Nathalia Gonçalves Font

**RESÍDUO DO MINÉRIO DE MANGANÊS  
COMO MATERIAL DA CONSTRUÇÃO  
CIVIL: SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO  
GRAÚDO NATURAL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Dissertação Orientada pelo Professor Marcelo de Souza Picanço

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



**Nathalia Gonçalves Font**

**Resíduo do minério de manganês como material da construção civil:  
substituição do agregado graúdo natural**

**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 2023

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Nathalia Gonçalves Font

TÍTULO: Resíduo do minério de manganês como material da construção civil: substituição do agregado graúdo natural

GRAU: Mestre ANO: 2023

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.

---

**Nathalia Gonçalves Font.**

Rua dos Mundurucus, nº 984, apt 304. Jurunas.  
66.025-660 Belém – PA – Brasil.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**  
**Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

F677r Font, Nathalia Gonçalves.  
Resíduo de minério de manganês como material da construção civil: Substituição do agregado graúdo natural / Nathalia Gonçalves Font. — 2023.  
97 f.: il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, Belém, 2023.

1. Resíduo de Manganês, Caracterização, Cimento Portland. I. Título.

CDD - 624

---

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



## RESÍDUO DO MINÉRIO DE MANGANÊS COMO MATERIAL DA CONSTRUÇÃO CIVIL: SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO NATURAL

AUTOR:

**NATHALIA GONÇALVES FONT**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA  
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE  
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO  
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA  
ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 16 / 06 / 2023

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente  
**MARCELO DE SOUZA PICANÇO**  
Data: 14/06/2023 10:44:54-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

**Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço**  
*Orientador (UFPA)*

Documento assinado digitalmente  
**LUCIANA DE NAZARE PINHEIRO CORDEIRO**  
Data: 20/06/2023 09:35:23-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

**Profa. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro**  
**Membro Interno (UFPA)**

*Andrielli Moraes de Oliveira*

**Profa. Dra. Andrielli Moraes de Oliveira**  
**Membro Interno (UFG)**

Visto:

Documento assinado digitalmente  
**MARCELO DE SOUZA PICANÇO**  
Data: 14/06/2023 10:46:30-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

**Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço**  
**Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA**

*“Tudo é loucura ou sonho no começo. Nada do que o homem fez no mundo teve início de outra maneira – mas já tantos sonhos se realizaram que não temos o direito de duvidar de nenhum.”*  
*(Monteiro Lobato)*

## **Agradecimentos**

À minha mãe Maria Ilva que sempre incentivou a minha educação, evolução profissional e pessoal e nunca mediu esforços para me dar sempre o melhor além de me motivar a finalizar esta pesquisa.

Ao meu pai Francisco que me apoiou nos estudos em Engenharia.

Ao meu marido José Augusto pela paciência, apoio e incentivo nos momentos difíceis.

À minha filha Sofia que nasceu no período da pesquisa e que mesmo tão pequena me deu estímulo para continuar e terminar.

À minha irmã pela parceria e torcida desde sempre e que de alguma forma contribuiu para que chegasse até aqui.

À minha tia Marly por toda a preocupação comigo e apoio em todos os momentos.

Ao professor Dr. Marcelo Picanço pela orientação, paciência e ajuda durante toda a pesquisa que atravessou uma pandemia.

À Adriana, pela dedicação e auxílio nos ensaios de laboratório.

Aos bolsistas e laboratoristas da UFPA pela ajuda e disponibilidade no que fosse necessário.

À UNAMA pela concessão da utilização do laboratório para os ensaios finais.

À UFRGS - Geociências pelos ensaios de difração e fluorescência.

A todos que direta ou indiretamente me ajudaram a finalizar o presente estudo.

## RESUMO

FONT, N. G. **Resíduo do Minério de Manganês como material da construção civil: Substituição do agregado graúdo natural**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2023.

A demanda mundial crescente por recursos naturais para uso na construção já acarretou prejuízos ambientais significativos, como a própria escassez destes materiais, além da emissão de gases de efeito estufa. Concomitante a isso, o acúmulo de resíduos de minério em alta e a busca por alternativas para a sua diminuição de impactos têm incentivado estudos para seu aproveitamento em várias áreas de pesquisa. Com o intuito de contribuir na melhoria destes passivos ambientais da indústria da construção e da mineração, este trabalho teve como objetivo principal estudar o aproveitamento de resíduo de manganês como material da construção civil para substituição do agregado graúdo natural por compensação de volume. Com isso, foram feitas análises preliminares de caracterização física, química, mineralógica, ambiental e sua reatividade. Em seguida realizada a confecção dos concretos de referência (CREF) e com substituições de 10%, 20%, 50% e 100%, em volume, de agregado graúdo natural. Como resultado, houve ganho de resistência a compressão no teor de 50% de substituição de 24% aos 28 dias comparados ao CREF. Quanto à resistência à tração e módulo de elasticidade, as amostras com 50% de substituição alcançaram resultados satisfatórios, com 13,94% superior ao CREF aos 7 dias e pouco abaixo, com decréscimo de 1,63%, aos 28 dias. Para o concreto de 50%, além do comportamento positivo, é importante notar que diferentemente das outras substituições também houve adições de água combinada ao aditivo superplastificante. Quanto à absorção de água por imersão o concreto de 20% se destacou absorvendo menos água e o de 50% também apresentou valor de absorção abaixo do concreto de referência. O comportamento mecânico demonstra que resíduo tem viabilidade de uso como material de construção civil trazendo uma solução viável e sustentável para ambas as indústrias, tanto da construção quanto de mineração do ponto de vista técnico e ambiental.

### **Palavras-chave:**

Resíduo de manganês; Resíduos de minas; Agregados; Agregado graúdo; Concreto.

## ABSTRACT

FONT, N. G. **Manganese ore tailings as material for civil construction: Replacement of natural coarse aggregate.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2023.

The growing global demand for natural resources for use in construction has already caused significant environmental damage, such as the scarcity of these materials in addition to the emission of greenhouse gases. Concomitant to this, the accumulation of ore tailings is also on the rise and the search for alternatives for its reduction and impacts have encouraged studies to be used in several areas of research. In order to solve these environmental liabilities of the construction and mining industry, this work had as its main objective to study the use of manganese ore tailings as a civil construction material to replace natural coarse aggregate by volume compensation. Therefore, preliminary analyzes were made as its physical, chemical, mineralogical, environmental characterization and its reactivity. Then, the reference concrete (CREF) was made and with substitutions of 10%, 20%, 50% and 100%, to the natural coarse aggregate. As a result, there was a gain in compressive strength at 50% replacement of 24% at 28 days compared to CREF. As for tensile strength and modulus of elasticity, samples with 50% replacement achieved satisfactory results, with 13,94% higher than CREF at 7 days and slightly below, with a decrease of 1,63% at 28 days. For the 50% concrete, in addition to the positive behavior, it is important to note that unlike the other replacements, there are also additions of water combined with the superplasticizer additive. As for water absorption by immersion, the 20% concrete stood out absorbing less water and the 50% concrete were below the water absorption values for the reference concrete. The mechanical behavior demonstrates that tailings is viable for use as a civil construction material, bringing a viable and sustainable solution for both construction and mining industries from a technical and environmental point of view.

**Key-words:**

Manganese ore tailings; mine waste; aggregates; coarse aggregate; concrete.



## Lista de Figuras

Figura	Página
Figura 2.1.1 – Mina de Serra do Navio, AP. ....	6
Figura 2.1.2 – Distribuição temporal dos depósitos de manganês (curvas em azul claro) e principais depósitos do mundo. ....	9
Figura 2.1.3 – Minerais com maior importância econômica: A) Pirolusita ( $\text{MnO}_2$ ); B) Psilomelano ( $\text{MnO} \cdot \text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ); C) Criptomelano ( $\text{KMn}_8\text{O}_{16}$ ); D) Rodonita ( $(\text{Mn}, \text{Ca}, \text{Fe}, \text{Zn})\text{SiO}_3$ ).....	10
Figura 2.1.5.1 – Fluxograma de beneficiamento do minério de manganês na Mina Buritirama, PA.....	16
Figura 2.1.5.2 – Localização de Serra do Navio no estado do Amapá.....	17
Figura 2.1.5.3 – Beneficiamento do minério. ....	17
Figura 2.1.6 – Depósito à superfície no interior da área industrial. ....	20
Figura 2.1.7 – Relação água/ligante em função do aumento de substituição da areia natural por resíduo de manganês no concreto. ....	25
Figura 3.1 - Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa .....	27
Figura 3.2 - Fluxograma da caracterização do resíduo manganês.....	27
Figura 3.3 - Curva granulométrica do agregado miúdo e limites da NBR 7211 (ABNT, 2009a) .....	29
Figura 3.4 - Curva granulométrica do Agregado Graúdo Natural.....	31
Figura 3.5 – Pilha de Resíduos em Serra do Navio (a) (b).....	32
Figura 3.6 – Variação de tamanho do resíduo de manganês a ser utilizado como agregado graúdo. ....	33
Figura 3.7 – Britador de Mandíbula. ....	34
Figura 4.1 – Composição granulométrica resíduo de Mn 100% .....	41
Figura 4.2 – Composição granulométrica resíduo de Mn (10%) com AGN (90%).....	42
Figura 4.3 – Composição granulométrica resíduo de Mn (20%) com AGN (80%).....	43
Figura 4.4 – Composição granulométrica resíduo de Mn (50%) com AGN (50%).....	44
Figura 4.5 - Curva granulométrica com os teores de substituição de agregado graúdo por Manganês.....	45
Figura 4.6 - Curva Granulométrica do resíduo de Mn como agregado miúdo.....	46
Figura 4.7 - Reação álcali-agregado: evolução da expansão média das barras de argamassa com resíduo de Mn.....	49
Figura 4.8 – Difratoograma das amostras de resíduo de Mn.....	50
Figura 4.9 - Resultados do índice de atividade pozolânica (IAP) com cal.....	51
Figura 4.10 – Resultados do índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento.....	52
Figura 4.11 - Resultados das rupturas axiais aos 7 e 28 dias de cada substituição com curva de tendência. ....	56
Figura 4.12 - Resultados das rupturas axiais dos concretos com as misturas propostas aos 7 e 28 dias das variações de C50Mn com curva de tendência. ....	59
Figura 4.13 - Resultados das rupturas diametrais aos 7 e 28 dias em cada substituição com curva de tendência. ....	60
Figura 4.14 – Resultados das rupturas diametrais dos concretos com as misturas propostas aos 7 e 28 dias das variações de C50Mn com curva de tendência. ....	62
Figura 4.15 – Resultados das rupturas diametrais dos concretos C10Mn que ficaram expostos durante 1050 dias às intempéries.....	63
Figura 4.16 – Módulo de elasticidade estimados dos concretos com substituição parcial do AGN por resíduo de Mn segundo NBR 6118 (2014). Valores expressados a partir das médias.....	64

Figura 4.17 – Módulo de elasticidade dos concretos com substituição parcial do AGN por resíduo de Mn aos 28 dias segundo EN 1992-1-1 (EUROCODE 2, 2004). Valores expressados a partir das médias.....	65
Figura 4.18 – Resultados médios da absorção de água por imersão. ....	66
Figura 4.19 – Resultados médios do índice de vazios. ....	66
Figura 4.20 – Amostras após aspersão do indicador fenolftaleína. ....	68
Figura 4.21 – Medições com paquímetro. ....	69

## Lista de Tabelas

Tabela	Página
Tabela 2.1 - Propriedades do manganês. ....	8
Tabela 2.2 – Principais minerais de manganês, suas fórmulas e composições químicas. ....	11
Tabela 2.3 – Especificação das principais ligas de manganês (%) (adaptada).....	14
Tabela 2.4 - Dosagens .....	22
Tabela 2.5 – Composição Química do resíduo de Mn .....	22
Tabela 2.6 – Consumo dos materiais em Kg/m <sup>3</sup> para todas as argamassas.....	23
Tabela 2.7 – Consumo dos materiais para confecção dos concretos.....	24
Tabela 2.8 – Consumo dos materiais por m <sup>3</sup> .....	24
Tabela 3.1 – Métodos de caracterização do agregado miúdo.....	28
Tabela 3.2 – Caracterização do Agregado Miúdo Natural .....	29
Tabela 3.3 – Métodos de caracterização do agregado graúdo natural (seixo).....	30
Tabela 3.4 – Caracterização do Agregado Graúdo Natural .....	31
Tabela 3.5 – Métodos de caracterização do agregado graúdo de resíduo de manganês. ....	33
Tabela 3.6 - Quantidade de corpos de prova de concreto.....	37
Tabela 3.7 – Consumo dos materiais para a confecção dos concretos. ....	38
Tabela 4.1 – Caracterização do Resíduo de Mn 100% .....	40
Tabela 4.2 – Caracterização do Resíduo de Mn (10%) com AGN (90%).....	42
Tabela 4.3 – Caracterização do Resíduo de Mn (20%) com AGN (80%).....	43
Tabela 4.4 – Caracterização do Resíduo de Mn (50%) com AGN (50%).....	44
Tabela 4.5 - Caracterização do Resíduo de Mn como Agregado miúdo.....	45
Tabela 4.6 – Resultado Abrasão Los Angeles .....	48
Tabela 4.7 – Análise Química Resíduo de Mn por fluorescência de raios X.....	48
Tabela 4.8 – Adições necessárias durante confecção das misturas de concreto.....	53
Tabela 4.9 – Resultados das rupturas dos concretos com as misturas propostas aos 7 e 28 dias.....	56
Tabela 4.10 – Resultados das rupturas axiais dos concretos com as misturas propostas aos 7 e 28 dias das variações de C50Mn. ....	59
Tabela 4.11 – Resultados das rupturas dos concretos com as misturas propostas aos 7 e 28 dias.....	60
Tabela 4.12 – Resultados das rupturas diametraais dos concretos com as misturas propostas aos 7 e 28 dias C50Mn .....	62
Tabela 4.13 – Resultados dos módulos de elasticidade das misturas de concreto. ....	65
Tabela 4.14 – Resultados da leitura de profundidade de carbonatação do C10Mn.....	69

## Lista de Quadros

<b>Quadro</b>	<b>Página</b>
Quadro 2.1 - Classificação, em relação à origem, de algumas minas de manganês brasileiras.....	9
Quadro 2.2 – Principais minerais de manganês (adaptada).....	12

### Lista de Siglas e Abreviações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGN	Agregado graúdo natural
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CSI	Iniciativa de Sustentabilidade do cimento
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	difração de raios X
FRX	fluorescência de raios X
GPa	Gigapascal
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICOMI	Indústria e Comércio de Minérios S.A.
ICMM	Internacional de Mineração e Metais
IEA	Agência Internacional de Energia
IMnI	<i>International Manganese Institute</i>
IPT/EPUSP	Instituto de Pesquisas Tecnológicas Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
ISO	International Organization for Standardization
LACER	Laboratório de Materiais Cerâmicos
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
MMA	Ministério de Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PIB	Produto Interno Bruto
PLANASA	Plano Nacional de Saneamento
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Programa
RAA	Reação álcali-agregado
UFPA	Universidade Federal do Pará
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNAMA	Universidade da Amazônia
WBSCD	Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável

## SUMÁRIO

Capítulo	Página
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 OBJETIVOS .....</b>	<b>5</b>
1.3.1 Objetivo Geral .....	5
1.3.2 Objetivos Específicos .....	5
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 MANGANÊS .....</b>	<b>6</b>
2.1.1 Manganês na Amazônia Brasileira .....	6
2.1.2 Minérios de Manganês – Aspectos Gerais .....	7
2.1.3 Mineralogia.....	10
2.1.4 Aplicabilidade dos Minérios de Manganês .....	12
2.1.5 Beneficiamento dos Minérios de Manganês.....	15
2.1.6 Passivos ambientais .....	18
<b>2.2 APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS .....</b>	<b>21</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2 ETAPA1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS .....</b>	<b>28</b>
3.2.1 Cimento Portland.....	28
3.2.2 Agregado Miúdo.....	28
3.2.3 Água.....	30
3.2.4 Agregado Graúdo .....	30
3.2.5 Resíduo de Manganês.....	32
<b>3.3 ETAPA 2: RESÍDUO DE MANGANÊS COMO AGREGADO GRAÚDO NO CONCRETO .....</b>	<b>36</b>
3.3.1 Desenvolvimento dos concretos .....	36
3.3.2 Propriedades do concreto.....	38

<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>40</b>
<b>4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MANGANÊS .....</b>	<b>40</b>
4.1.1 Caracterização Física.....	40
4.1.2 Caracterização Química.....	48
4.1.3 Caracterização Mineralógica .....	49
4.1.4 Caracterização Reatividade .....	50
<b>4.2 RESÍDUO DE MN COMO AGREGADO GRAÚDO NO CONCRETO .....</b>	<b>52</b>
4.2.1 Estado fresco.....	52
4.2.2 Estado endurecido.....	56
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>70</b>
<b>5.1 CONCLUSÕES.....</b>	<b>70</b>
<b>5.2 SUGESTÕES .....</b>	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>74</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A influência humana e seus impactos no meio ambiente ao longo dos anos tornam evidentes as mudanças climáticas presenciadas atualmente. A ciência afirma com 95% de certeza que a causa dominante do aquecimento global desde meados do século 20 é a atividade humana, destacando que cada uma das últimas três décadas foram mais quentes de modo crescente em toda a superfície da terra do que qualquer outra década anterior desde 1850, ou seja, “As evidências climáticas são agora “inequívocas” (IPCC, 2013).

O aumento na frequência de eventos climáticos extremos são consequência principalmente da extração e queima de combustíveis fósseis, assim como mudanças no uso da terra que correspondem a alterações significativas de três quartos dos habitats terrestres do mundo com a extração de 60 bilhões de toneladas de matéria-prima a cada ano (KRAUSMANN et al., 2009). E em decorrência do crescimento da população e das riquezas, segundo Allwood et al. (2013), a previsão é que a demanda por extração e processamento de materiais dobrará nos próximos 40 anos, sendo que tal processamento é um dos principais impulsionadores de emissões de carbono e, consequentemente, das mudanças climáticas.

Atribuem-se as emissões de dióxido de carbono quase igualmente a três setores: indústria, edifícios e transporte (ALLWOOD, 2012). No que diz respeito a indústria mineral, segundo o Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2013), sua participação nos danos ambientais está relacionada ao seu espaço de atividade (ecossistemas), assim como nas comunidades por um longo período trazendo riscos relacionados principalmente a barragens e pilhas de estéril.

Entretanto, atividade extrativa de minério têm seu papel de importância na economia brasileira por gerar superávits com exportações de mais de 409 milhões de toneladas de bens minerais em 2018 de acordo com o IBRAM (2018), além de possuir participação fundamental no Produto Interno Bruto (PIB) com 1,4% de todo o país, gerando novas oportunidades econômicas, de empregos diretos e fornecimento de matéria-prima para todos os tipos de indústrias existentes no país entre elas a da construção civil (IBRAM, 2018; SOUZA; SOUSA; KATO, 2015).



Após a ruptura das barragens de Mariana e Brumadinho em Minas Gerais a preocupação por parte da sociedade, comunidades, municípios mineradores e autoridades quanto à gestão de risco relacionadas às barragens de rejeitos mudou no que tange à exigência do Conselho Internacional de Mineração e Metais (ICMM) de uma revisão de alto nível dos padrões globais aplicados à gestão de segurança de barragens, obtendo-se como resultados do 1º Ciclo soluções em várias áreas dentre elas a gestão de resíduos e rejeitos (IBRAM, 2018).

Junto a essas ações, a parceria entre IBRAM e o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) na implantação da Agenda 2030, inclui a indústria mineral como atividade prioritária para conquista de metas, envolvendo um plano de ação mundial como inclusão social, sustentabilidade ambiental e desenvolvimento econômico (IBRAM, 2018).

Enquanto isso, o setor construtivo cresce de acordo com a necessidade de infraestrutura combinado ao aumento da população urbana, ou seja, além de consumir minérios, sobretudo em obras públicas de infraestrutura, como pontes, viadutos e estradas, há um crescimento contínuo no consumo de cimento e concreto (MEHTA, 2010), já que não há material substituto pronto para esses grandes projetos de infraestrutura (LIFSET; ECKELMAN, 2013).

Em publicação sobre o último relatório desenvolvido pela Agência Internacional de Energia (IEA) junto à Iniciativa de Sustentabilidade do cimento (CSI), o Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável - WBSCD (2018), expõe que o setor cimenteiro é o terceiro maior consumidor de energia industrial do mundo com cerca de 7% e o segundo emissor industrial de CO<sub>2</sub> também responsável por 7% das emissões globais de CO<sub>2</sub>.

Esses dados estão diretamente ligados à produção do concreto por ser o material de construção mais consumido no mundo (MEHTA; MONTEIRO, 2006; MILLER et al., 2016), exigindo, portanto, atenção especial não somente ao cimento em si, mas aos seus outros constituintes, já que segundo Kraussmann et al. (2009 apud GIESEKAM et al., 2014), o setor da construção é o maior consumidor da matéria prima extraída dos habitats naturais do mundo.

Em virtude disso o WBSCD e IEA recomendaram análises mais aprofundadas nas propriedades dos materiais associadas à alteração dos constituintes do concreto (MILLER et al., 2016 apud WBSCD and IEA, 2009), concomitante à comunidade

acadêmica que está em contínua busca de tecnologia de novos materiais e soluções visando a minimização do uso de materiais naturais e das emissões de CO<sub>2</sub> no setor da construção (GIESEKAM et al., 2014).

Dessa forma, tendo em vista tais necessidades em observância a sustentabilidade ambiental, a indústria mineradora como grande geradora de resíduos e a construção civil como potencial consumidora representam o cenário ideal para a reciclagem e reutilização dos resíduos, no que corresponde a adequação técnica, econômica e ambiental na criação de novos produtos e metodologias construtivas (TOFFOLO et al., 2014).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo o Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas -IPCC até 2050 será necessária a redução estimada de 50 a 85% de emissões de gases de efeito estufa (GEE) para evitar o agravamento das mudanças climáticas (ALLWOOD, 2012). Concomitante a isso há uma crescente demanda na economia de recursos naturais, redução de energia, entretanto buscando aumento da produtividade associada à responsabilidade social que impulsionam a indústria construção na pesquisa de processos mais eficientes e sustentáveis (MILLER et al., 2016).

Allwood et al. (2013) afirmam que para a melhoria na eficiência no processamento de materiais existem limites e, dessa forma, a alternativa mais interessante como intensão da humanidade na contribuição à diminuição do aquecimento global é a produção de menos material novo. A reciclagem de alguns materiais seria possível, porém para outros haveria a limitação da disponibilidade do material em fim de vida, além de outras dificuldades práticas relacionadas a coleta, classificação e separação. Para isso os autores sugerem que além da reciclagem em busca da ideia de “eficiência de materiais” onde os serviços que demandam materiais continuariam a ser feitos, porém com a redução na produção total de novos materiais.

Na construção para promover a redução dos impactos, a substituição do clínquer é apontada como a mais eficaz. Entretanto, há potencial na combinação de substituição de cimentos e agregados que é incentivada por Franco de Carvalho et al. (2019) e Crossin (2015) para melhorar a sustentabilidade dos concretos, sendo uma delas a

utilização de resíduos industriais e minerais que possuam disposições inadequadas, presente em variados estudos.

Há também por parte da mineração o incentivo do IBRAM (2018) em projetos voltados para a utilização do resíduo das mineradoras para gerar novos produtos, já que nas atividades de mineração, seu processamento está associado a liberações tóxicas, assim como a produção de grandes quantidades de resíduos, que por vezes, podem ser perigosos (KRAUSMANN et al., 2009). Em 2020, uma das principais mineradoras do país inaugurou a primeira planta piloto de produtos para a construção civil em que a principal matéria-prima é o rejeito da atividade de mineração com previsão de utilização de cerca de 30 mil toneladas de rejeito por ano.

Contudo, no século passado esta realidade em busca na melhoria de processos para o menor impacto na indústria da mineração não era a mesma. Em seu auge de produção, atividade extrativa e exportação, a mina de manganês em Serra do Navio localizada no estado Amapá foi uma das maiores do mundo durante 40 anos, segundo Drummond e Pereira (2007). Isso que levou o Brasil ao status de potência siderúrgica de primeira classe como o quarto maior produtor de minério, sendo superado apenas pela União Soviética, África do Sul e Índia (MONTEIRO, 2002).

Entre os anos de 1957 a 1997, a mina esteve ativa e foram extraídos em Serra do Navio cerca de 60 milhões de toneladas de manganês, seis vezes mais do que o originalmente previsto (10 milhões de toneladas) (DRUMMOND; PEREIRA, 2007). Com os investimentos realizados na mina para máxima produtividade também cresceu a quantidade de resíduos. A ICOMI (Indústria e Comércio de Minérios S.A.) empresa responsável pela mina na época, desenvolveu algumas soluções para reaproveitamento do resíduo em busca de maior lucratividade, porém ainda sim, pilhas de resíduos permaneceram tanto em Serra do Navio quanto na área industrial de Santana no Amapá (1987 apud MONTEIRO, 2003). De acordo com Monteiro (2003), estima-se que em 41 anos de operação mais de 26 milhões de toneladas de resíduo foram geradas.

Diante deste contexto, esta pesquisa propõe o estudo do reaproveitamento do resíduo de manganês como material de construção civil por meio da substituição do agregado gráudo avaliando sua caracterização química, física e mineralógica com o intuito de apresentar alternativa viável para o passivo ambiental da mina de Serra do Navio no Amapá, bem como o menor consumo de matéria prima para a produção do concreto.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em verificar o comportamento do concreto com substituições parciais de agregado graúdo utilizando o resíduo de manganês com a finalidade para a produção de concreto alternativo para fins estruturais na construção civil.

- Verificar a aplicabilidade do resíduo de manganês como agregado graúdo na confecção de concretos com substituição em volume de 10, 20, 50 e 100% do agregado graúdo natural e avaliar suas propriedades mecânicas.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o resíduo proveniente da exploração de manganês de Serra do Navio/AP do ponto de vista químico, físico, mineralógico e ambiental;
- Investigar preliminarmente a atividade pozolânica do resíduo de manganês em argamassas com cal e com cimento;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MANGANÊS

#### 2.1.1 Manganês na Amazônia Brasileira

No Brasil, os primeiros relatos de descoberta do minério de manganês ocorreram em 1821 (BORGES, 1985 apud CARIOCA; ANDRADE; BRANDÃO, 2011) e sua valorização a nível industrial como recurso natural na Amazônia brasileira iniciou-se na década de 40, com a exploração das reservas de minério de manganês em Serra do Navio (Figura 2.1.1), na época localizado no Território Federal do Amapá (MONTEIRO, 2005).

A atividade de mineração tem seu perímetro na extremidade leste do Planalto das Guianas, onde há pequenos morros formados pela dissecação das bordas do planalto. Está localizada a 200 quilômetros aproximadamente, a noroeste de Macapá/AP, perto do centro geográfico do estado (SOUZA JUNIOR, 2020).



Figura 2.1.1 – Mina de Serra do Navio, AP.

Fonte: <https://www12.senado.leg.br/noticias/noticias/materias/2016/09/28/jazidas-de-manganes-do-amapa-poderao-ter-novas-regras-de-exploracao>.

Com investimentos maciços na região e a valorização do minério de manganês, a mina de Serra do Navio se manteve com o única extração mineral industrial significativa na Amazônia Oriental brasileira por duas décadas, até a criação de Programas de Polos Agropecuários e Agrominerais da Amazônia (Polamazônia), por parte do Governo Federal na década de 70, para incentivo na exploração do manganês e caulim no Pólo Amapá, de bauxita no Pólo Trombetas e o minério de ferro no Pólo

Carajás por meio do Projeto Grande Carajás criado em 1980. Neste último os investimentos direcionados à região em diferentes obras de infraestrutura facilitaram para que em 1985 iniciasse a exploração de manganês no Igarapé do Azul (MONTEIRO, 2005).

Em 1997 a mina de Serra do Navio estava encerrando suas atividades devido ao esgotamento do minério e que resultou na extração de 65 milhões de toneladas de minério para a mercantilização de 34 milhões de toneladas de *commodities* minerais (ARAUJO et al., 2017; MONTEIRO, 2002) porém segundo Araújo et al. (2017 apud ANDRADE, SERRÃO, GOMES & PINHEIRO, 2011) restando ainda uma reserva de manganês de 5,71 milhões de toneladas.

Em 2008, de acordo o DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral, as reservas brasileiras de manganês estavam concentradas nos estados de Minas Gerais com valor estimado em mais de 511 milhões de toneladas, em seguida Mato Grosso do Sul com quase 38 milhões de toneladas (Mt) e Pará com 25 milhões de toneladas. As minas de maior relevância são Morro da Mina em Minas Gerais, mina do Urucum no Mato Grosso do Sul e mina do Azul no Pará (CASTRO, 2011).

Em 2016 o estado do Pará foi responsável por 3,2 Mt da produção de 4,3 Mt nacional, e o teor médio do manganês nas reservas nacionais atingiu 35,94%, sendo que o maior teor foi de 42,01% no Mato Grosso do Sul. (BRASIL, 2018) Na produção brasileira, somente empresas do grupo VALE e da Mineração Buritirama são responsáveis por 95% da exploração do manganês nacional sendo que o manganês representa apenas uma parte do faturamento da VALE enquanto a segunda explora exclusivamente este mineral (BRASIL, 2009 apud CASTRO, 2011).

### **2.1.2 Minérios de Manganês – Aspectos Gerais**

O manganês é encontrado na natureza em vários minerais de diferentes composições químicas e propriedades físicas, porém nunca em seu estado elementar. (BRASIL, 2008) Sampaio et al. (2008) cita que existem mais de cem tipos de minerais de manganês, todavia somente um pouco mais de uma dezena constituem minerais de manganês.

Em 1774 o dióxido de manganês foi considerado um composto de ferro, por isso a sua nomenclatura que deriva do latim “magnes” que possui o significado de magnético, por assemelhar-se ao cromo e ferro, até que Carl Wilhelm Scheele o

reconheceu como elemento químico, sendo isolado como Mn logo depois por Johan Gottlieb Gahn.

O manganês é um metal que faz parte da classe dos metais de transição e no seu estado puro possui coloração metal cinza brilhante e é relativamente frágil, porém apresenta alto grau de dureza (BRASIL, 2008). Segundo Almeida (2010) é um elemento refratário que oxida facilmente por ter afinidade com oxigênio e com o enxofre, podendo se apresentar na forma ferromagnética, entretanto somente quando passa por tratamento especial.

Seus dados relacionados às suas propriedades estão na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Propriedades do manganês.

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Número atômico	25
Massa molar	54.938045(5) g.mol <sup>-1</sup>
Massa específica (varia de acordo com a forma alotrópica)	7,21 a 7,44 g.cm <sup>-3</sup>
Ponto de fusão	1245°C
Ponto de ebulição	2061°C
Distribuição eletrônica	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup> 3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup>
Valência	1,2,3,4,5,6 ou 7

Fonte: Almeida (2010)

No Brasil é possível encontrar depósitos de minerais dos tipos: sedimentares, metamórficos e intempéricos (ou de enriquecimento supergênico) sendo os mais típicos os minérios intempéricos com jazidas de tamanho médio e pequeno (ALMEIDA, 2010; CARIOCA; ANDRADE; BRANDÃO, 2011).

Segundo Almeida (2010) o protominério é uma rocha metassedimentar formada por quartzo e pela granada espessartita – Mn<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. Quando ocorre o processo intempérico, a espessartita é decomposta em óxido de manganês e sílica mais alumina. Dessa forma, o óxido de manganês gera a pirolusita e outros óxidos, hidróxidos e hidratos de manganês enquanto a sílica é cristalizada como quartzo e o restante reage com a alumina formando o argilomineral caulinita. Dessa forma as tipologias de

minério com menor alteração assemelham-se à composição do protominério (espessartita e quartzo) e as mais intemperizadas são compostas por óxidos/hidróxidos de manganês mais algumas quantidades diferentes de quartzo e caulinita. O autor também afirma que quanto maior os teores de manganês, maior seu grau de intemperização. No quadro 2.1 estão classificadas algumas minas brasileiras de manganês em relação à sua origem e na Figura 2.1.2 a distribuição temporal dos depósitos de manganês no mundo. Segundo Dias e Caxito (2018) os depósitos de origem sedimentar ou supergênica são os mais viáveis economicamente na maioria dos casos.

Quadro 2.1 - Classificação, em relação à origem, de algumas minas de manganês brasileiras

Mina	Localização	Características
Urucum	Corumbá-MS	Sedimentar
Quadrilátero Ferrífero	Belo Horizonte/Itabira/Novaelima/Ouro Preto- MG	Metamórfico
Azul	Parauapebas – PA	Sedimentar
Serra do Navio	Serra do Navio – AP	Enriquecimento Supergênico
Morro da Mina	Conselheiro Lafaiete – MG	Metassedimentar com enriquecimento Supergênico

Fonte: Almeida (2010)

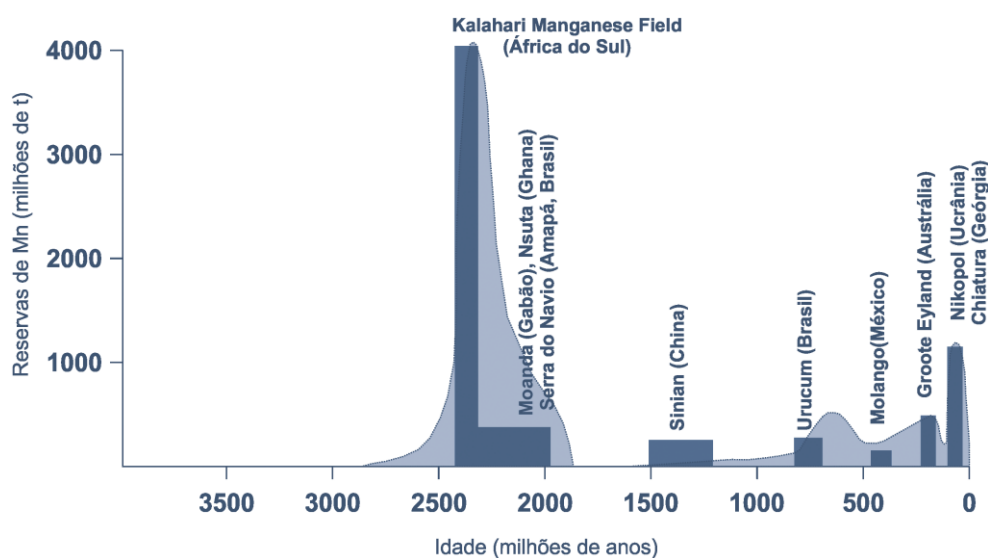


Figura 2.1.2 – Distribuição temporal dos depósitos de manganês (curvas em azul claro) e principais depósitos do mundo.

Fonte: Dias e Caxito (2018)



### 2.1.3 Mineralogia

O minério de manganês está combinado a outros elementos formando minerais distribuídos pelo ambiente geológico e disperso em rochas. Sua maioria são óxidos onde se destacam: dióxidos, hidróxidos, silicatos e carbonatos. Dentre os dióxidos os mais importantes comercialmente são a pirolusita ( $\text{MnO}_2$ ), a psilomelana, a manganita ( $\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), romanechita e criptomelana (ALMEIDA, 2010; CARIOCA; ANDRADE; BRANDÃO, 2011; SAMPAIO et al., 2008), como podem ser vistos na figura 2.1.3 e tabela 2.2.

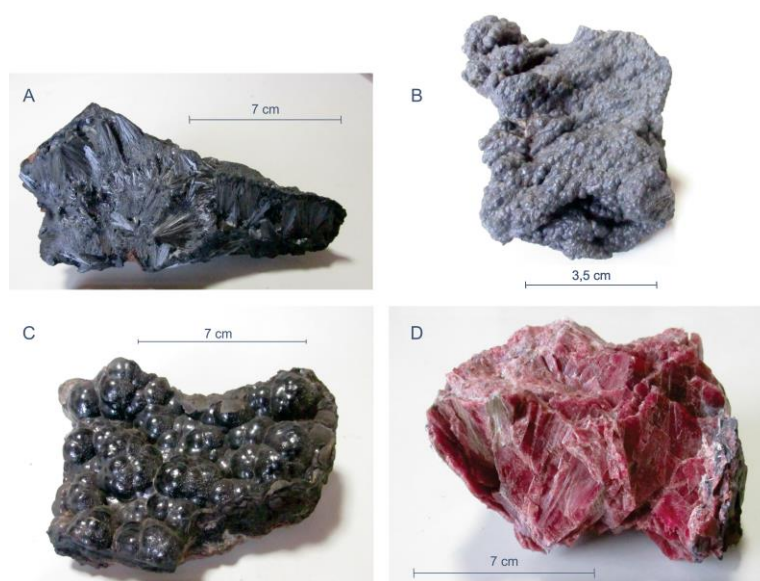


Figura 2.1.3 – Minerais com maior importância econômica: A) Pirolusita ( $\text{MnO}_2$ ); B) Psilomelano ( $\text{MnO} \cdot \text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ); C) Criptomelano ( $\text{KMn}_8\text{O}_{16}$ ); D) Rodonita ( $(\text{Mn}, \text{Ca}, \text{Fe}, \text{Zn})\text{SiO}_3$ )

Fonte: Dias e Caxito (2018)

Santos (2013) classificou os minerais por tipo de ocorrência como pode ser visto no Quadro 2.2 adaptado e que incluem novos minerais como Bimessita, Groutita, Tefroíta e Espessartita devido à grande variedade dos minerais de manganês, como cita (SAMPALIO et al., 2008).

Tabela 2.2 – Principais minerais de manganês, suas fórmulas e composições químicas.

Minerais	Fórmula química	Composição Química (%)				
		Mn	MnO	MnO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Braunita	2Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .MnSiO <sub>3</sub>	66,6	44,8	55,2	-	-
Criptomelana	KMn <sub>8</sub> O <sub>16</sub>	59,8	-	-	-	-
Hausmannita	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	72	62,0	32	-	-
Jacobsita	MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	24	-	-	-	-
Manganita	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .H <sub>2</sub> O	62,5	40,4	49,4	-	10,2
Nsutita	MnO <sub>2</sub> - $\gamma$	-	-	-	-	-
Psilomelana	mMnO.MnO <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O	45-60	-	-	-	-
Pirolusita	MnO <sub>2</sub> - $\beta$	62-63	-	-	-	-
Rodocrosita	MnCO <sub>3</sub>	47,8	61,7	-	38,3	-
Rodonita	(Mn,Ca,Fe,Zn)SiO <sub>3</sub>	47,8	-	-	-	-
Todorokita	(Na,Ca,KMn <sup>2+</sup> )(Mn <sup>4+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Mg).3H <sub>2</sub> O	-	-	-	-	-

Fonte: Sampaio e Penna, 2002; Harben, 1996 apud SAMPAIO et al., 2008)

A partir da identificação do teor de manganês junto aos minérios no qual está relacionado pode ser classificado como: minério de manganês de alto e médio teor (Mn>35%), minério ferruginoso (ferromanganês) (15%<Mn<35%), Minério de ferro manganesífero (5%<Mn<10%), ferro com manganês e protominério, sendo este último o minério de teor mais baixo (ALMEIDA, 2010).

Quadro 2.2 – Principais minerais de manganês (adaptada)

<b>Mineral</b>	<b>Tipo de ocorrência</b>
Criptomelana	Óxidos
Pirolusita	
Nsutita	
Bimessita	
Jacobsita	
Hausmannita	
Psilomelana	
Todorokita	
Manganita	Hidróxidos
Groutita	
Rodonita	Silicatos
Tefroíta	
Espessartita	
Braunita	
Rodocrosita	Carbonatos

Fonte: Santos (2013)

No Brasil, o manganês ocorre principalmente na forma de óxidos/hidróxidos, que fazem parte dos depósitos com alto teor de Mn, hidratos, carbonatos e silicatos, na maioria das vezes acompanhados de mineralizações de ferro e sílica (SiO<sub>2</sub>) (ALMEIDA, 2010; BRASIL, 2008).

#### 2.1.4 Aplicabilidade dos Minérios de Manganês

Os primeiros registros da utilização de minerais de manganês remontam ao período paleolítico, por volta de 15.000 anos atrás, aplicado como pigmento. Os egípcios e romanos empregavam os compostos químicos para a coloração e

descoloração do vidro (DIAS; CAXITO, 2018) e no século XIX começaram a ser realizados testes para o seu uso em ligas, sendo comprovada em 1816 que sua utilização como liga auxiliava no endurecimento do aço (LUZ; LINS, 2008).

No mercado, o manganês é identificado em duas maneiras: no estado natural e o tratado. Quando beneficiado, é empregado em diversos produtos como: pilhas e baterias, na agricultura (fertilizantes, fungicidas, rações), agente de secagem de pintura, agentes oxidantes para corantes, aromatizantes e agentes de vedação, aplicações no meio ambiente (tratamento de água, controle da poluição do ar, aditivos de combustão), entre outros (DIAS; CAXITO, 2018; SAMPAIO et al., 2008).

Dentre estes a produção de baterias e pilhas se destaca com a utilização da pirolusita em seu mais alto teor de manganês ( $\text{MnO}_2$ ), entre 70 e 80%, mais alto que o utilizado na siderurgia, ou seja, quando aplicado para esta finalidade o minério não deve possuir impurezas como cobre, níquel, cobalto e arsênio, assim como deve possuir um teor de óxido de ferro de até 4% (CASTRO, 2011; SAMPAIO et al., 2008).

Na indústria de vidro o manganês é utilizado para combater o efeito dos íons de ferro, pois é comumente encontrado na matéria prima como impureza e que confere ao vidro uma cor esverdeada, e como corante para dar tons de roxo e preto (SANTOS, 2013). E, segundo Castro (2011), na indústria cerâmica é aplicado na produção de esmaltes marrons, roxos e pretos para telhas e tijolos com cor.

Atualmente, a principal demanda é da indústria siderúrgica para a confecção de aço carbono comum e em aço alto manganês correspondendo ao consumo entre 85% e 90% do total da produção do metal. Sua utilização está relacionada ao crescimento econômico do país, pois está presente no cotidiano por meio do aço empregado nas construções e nas confecções de carros (AFONSO, 2019; OLSEN; TANGSTAD, 2004; SILVA JUNIOR, 2019).

De acordo com Olsen e Tangstad (2004) tanto o manganês quanto o silício são componentes cruciais na produção de aço, onde ambos possuem as funções de desoxidantes, desulfurantes e elementos de liga. O silício é considerado o principal desoxidante, mas o manganês é mais suave que o silício e possui maior eficácia devido à formação de estáveis silicatos e aluminatos, além de ter a função de dessulfurizador.

Quando adicionado nos processos siderúrgicos, sua função é de reduzir a quantidade de enxofre presente no gusa e no aço, como apontam Gonçalves e Serfaty

(1976) apud Santos (2013). O enxofre nos aços é uma impureza que ocasiona a formação de FeS, que impede a laminação e forjaria dos produtos. Utilizando o manganês é formado o MnS, que melhora as propriedades do aço, por isso é utilizado como elemento de liga em quase todas as variedades de aço.

Como elemento de liga há o interesse por parte da indústria siderúrgica devido ao seu efeito sobre o sistema de modificação de ferro-carbono, aumentando a temperabilidade do aço (OLSEN; TANGSTAD, 2004).

São diversos os tipos de ligas de manganês adicionados em aço sendo divididas em 4 grupos, segundo Olsen et al (2007) a liga Ferro Manganês Alto, Médio e Baixo Carbono (AC, MC e BC, respectivamente) e variações de Silício-manganês que podem ser verificados na tabela 2.3 junto com outras principais ligas comerciais.

Tabela 2.3 – Especificação das principais ligas de manganês (%) (adaptada)

Liga	Mn	C	Si	P	S	B(ppm)
AC FeMn	78	7,50	0,30	0,20	--	--
MC FeMn	80-83	1,50	0,60	0,20	--	--
MC FeMn	80-83	1,00	0,60	0,20	--	--
BC FeMn	80-83	0,50	0,60	0,20	--	--
SiMn	67	1,70	17,50	0,10	0,02	200
SiMn	67	1,50	17,50	0,10	0,02	200
SiMn	68	2,00	17-20	0,15	0,02	200
BC SiMn	60-63	0,50	25-27	0,10	0,01	100
BC SiMn	59-63	0,10	26-30	0,10	0,01	100
UBC (Ultra Baixo Carbono) SiMn	58-62	0,05	27-31	0,05	0,01	100

Fonte: Olsen, Tangstad e Lindstad (2008) apud Castro (2011)

### 2.1.5 Beneficiamento dos Minérios de Manganês

De acordo DNPM (BRASIL, 2018) o beneficiamento consiste nas operações realizadas nos bens materiais visando modificar granulometria, concentração relativa dos minerais presentes ou modificações de ordem química, por meio de decomposição térmica ou de reações causadas pelo calor. No que diz respeito à aglomeração, que seriam sinterização e pelotização, de minérios finos, a ustulação e calcinação estão inseridas nos tratamentos de minérios.

Segundo o *International Manganese Institute* (IMnI) , em 2017 a produção mundial de minério manganês alcançou a marca de 19 milhões de toneladas (Mt), 25% maior que a produção no ano de 2016 (DIAS; CAXITO, 2018) liderada pela África do Sul correspondendo a 32,83% desse total e o Brasil ocupando o quinto lugar com 8,32% (COSTA; SILVA; SILVA, 2018).

Nos últimos dados divulgados no Sumário Mineral Brasileiro (COSTA; SILVA; SILVA, 2018) a produção estimada de concentrado no país chegou a 3,3 milhões de toneladas concentrando-se nos estados do Pará, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais responsáveis por mais de 90% (BRASIL, 2018).

Um dos principais parâmetros de avaliação para o estudo da viabilidade e aproveitamento dos depósitos de manganês são a análise das dimensões de tal depósito e quais as impurezas encontradas no minério. Pode haver impurezas metálicas (ferro, chumbo, zinco, cobre, cobalto, arsênio e minerais de prata); não metálicas (enxofre, fósforo, álcalis e minerais alcalino terrosos); material de ganga (sílica e alumina); e materiais voláteis (água, dióxido de carbono e material orgânico) (LUZ; LINS, 2008).

Dessa forma, para atender a demanda das indústrias de altos teores de Mn é necessário o beneficiamento do minério para reduzir, em contrapartida, a quantidade de impurezas. Tais exigências resultaram na prática de beneficiamento de minérios chamadas por Sampaio et. al (2008) de circuitos de concentração complexos, visto que os depósitos de manganês são distintos em vários aspectos, demandando um processo especial de beneficiamento para cada caso. O autor afirma que para os minérios de manganês não existe um único processo de concentração utilizado, como ocorre com os minérios de cobre processados por flotação.

De maneira geral, o fluxograma de beneficiamento do manganês das unidades de concentração para minérios é composto por uma grelha para remoção de material

orgânico, em seguida britagem em britador de mandíbulas ou rolos, para redução granulométrica até 80mm. Depois de britado segue para o estágio de atrição em troméis cegos ou em lavadores de cascalho (*log washer*), para retirada da fração argilosa existente no minério. Então a fração que é resistente ao processo de lavagem, chamada de nódulos de manganês, é removida por separação granulométrica por meio de peneiras rotativas ou vibratórias. O que estiver acima de 6mm, corresponde ao concentrado granulado (*lump*), preferido para processos metalúrgicos. Esta fração de manganês com faixa granulométrica entre 18 e 6mm, geralmente contém silicatos ou bauxita (SAMPAIO et al., 2008).

No Brasil, segundo Sampaio (2008) o beneficiamento de minério de manganês resume-se em duas etapas, via regra geral: britagem e classificação. A Figura 2.1.5.1 representa o fluxograma do beneficiamento aplicado na mina do Azul em Carajás/PA.

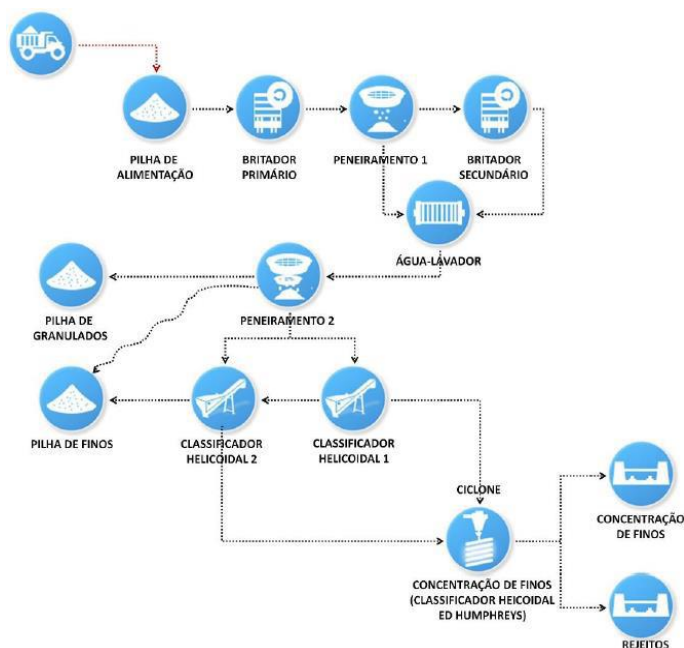


Figura 2.1.5.1 – Fluxograma de beneficiamento do minério de manganês na Mina Buritirama,PA.

Fonte: SILVA JUNIOR (2019)

Em Serra do Navio, localizado próximo ao rio Amapari representado na figura 2.1.5.2, grande quantidade de sua produção era constituída de blocos naturais de manganês em que o processamento do minério também seguia as etapas de moagem, lavagem com água, turbinamento e peneiramento para classificação granulométrica designado pelos autores Drummond e Pereira (2007) como processo primário.

Os corpos mineralizados estavam situados relativamente perto da superfície, portanto a sua lavra era realizada a céu aberto. O processamento do minério de manganês não exige calor nem adição de substâncias reagentes, mas sim energia para mover moedores, peneiras, centrífugas, esteiras e para bombear água para lavagem. Em 1982 a energia elétrica consumida em Serra do Navio era gerada por uma hidrelétrica.



Figura 2.1.5.2 – Localização de Serra do Navio no estado do Amapá.

Fonte: Blog Amapá, minha amada terra.

Os produtos da extração de Serra do Navio resultaram em quatro tipos de minérios de manganês. O grosso, bitolado e bitomiúdo depois do processamento primário seguiam para os vagões ferroviários e em seguida carregados nos navios. O quarto tipo era o minério fino que era depositado em pilhas pois até 1970 não tinha valor comercial (DRUMMOND; PEREIRA, 2007). Na figura 2.1.5.3 abaixo segue imagem do beneficiamento do minério.



Figura 2.1.5.3 – Beneficiamento do minério.

Fonte: Benjamin Adiron Ribeiro (1992) apud Souza Junior (2020)



Com os investimentos maciços destinados a mina para sua máxima produtividade e a diminuição dos minérios de alto teor junto ao acúmulo dessas pilhas de finos desde o início das operações da mina, outros processos como o de pelotização e sinterização foram inseridos em 1972, ambos denominados por Drummond e Pereira (2007) como processamento secundário. O primeiro consiste na transformação dos minérios concentrados em pelotas e o segundo em um processo que implica no derretimento dos finos com calor para a formação de aglomerado quebradiço que pode ser adicionado nos processos siderúrgicos em diferentes tamanhos. O teor do material fino concentrado aumenta de seus 36% para 51% depois de sinterizado sendo convertidos em produtos com valor de uso.

A usina de beneficiamento para concentração e pelotização operou de 1972 até 1983. Suas atividades foram encerradas devido ao aumento do preço do combustível e consequentemente à queda do mercado de pelotas, tanto em preço quanto em demanda (ICOMI, 1997 p.6 apud MONTEIRO, 2003).

Em 1988 o processo de sinterização foi adotado pela ICOMI (Indústria e Comércio de Minérios S.A.) para que os “finos” de minério que não teriam valor de uso, fossem aglomerados com o fim de receber valorização e mercantilização. Esses “finos” correspondiam a cerca de 30% do total processado, segundo a PLANASA (Plano Nacional de Saneamento) (1987 apud MONTEIRO, 2003).

### **2.1.6 Passivos ambientais**

Sabe-se que a atividade mineradora é causadora de diversos danos ambientais. Na Amazônia brasileira, o desmatamento ocasionado pela mineração vai além dos limites de locação operacional. Segundo (SONTER et al., 2017) no período de 2005 a 2015 o desmatamento atingiu 11.670 km<sup>2</sup>, extensão que representa 9% de toda a perda florestal da Amazônia brasileira.

Na Constituição de 1988 foram incorporadas mudanças na legislação ambiental que tornaram mais rigorosas as exigências a respeito da indústria mineral que envolvem a valorização dos recursos ambientais, por meio da obrigatoriedade da realização de estudos de impacto, licenciamento ambiental prévio e a recomposição do meio ambiente degradado pela mineração. A partir dessas diretrizes, em 1998 foi promulgada Lei de

Crimes ambientais alterando a questão dos danos ambientais da esfera administrativa para a esfera criminal (MONTEIRO, 2005).

Atualmente, segundo Ministério de Minas e Energia - MME (BRASIL, 2009) e o Ministério de Meio Ambiente – MMA (BRASIL, 2023), a legislação brasileira – por meio das exigências compartilhadas pelas resoluções do CONAMA exige que cada empresa obtenha as seguintes licenças ambientais:

- ❖ LP – Licença prévia, fase de pesquisa.
- ❖ LI – Licença Instalação fase de concessão da lavra exigida na outorga
- ❖ LO-Licença de operação na fase da lavra.

Em Serra do Navio, depois de paralisadas as atividades da mina em 1997 os resíduos estocados no local somam aproximadamente 9,7 milhões de toneladas em notícia de Figueiredo (2017) sem contar as pilhas localizadas em Santana/AP, município onde está localizado o porto no qual o minério era embarcado. O DNPM avaliou que destas pilhas de manganês estocadas 3,2 milhões de toneladas são de granulados e mais de 6,5 milhões de toneladas de minério fino.

Em nota publicada por meio de Figueiredo (2017), o DNPM declarou que em torno de 200 mil toneladas são viáveis para serem embarcadas e comercializadas imediatamente. O restante, por possuir baixa qualidade de material, deve ser submetido a processo de concentração para enriquecimento do teor de manganês. Fato que deve ser realizado localmente pela própria ICOMI em Serra do Navio, como já foi feito anteriormente, por meio da construção de uma usina de beneficiamento e concentração.

Além da grande quantidade de resíduo estocada e sem destinação, foi detectada a contaminação de manganês e arsênio nos lençóis freáticos e águas superficiais no bairro Elesbão, localizado ao lado da sede da ICOMI (SILVA JUNIOR, 2019).

O minério de manganês de Serra do Navio possui o arsênio em sua constituição desde sua formação e fica retido na estrutura cristalina dos óxidos e hidróxidos de ferro e manganês. De acordo com Scarpelli (2003), pelo fato de terem sido formados em condições ambientais, os minerais do minério óxido são bastante estáveis e, por isso, o arsênio não é liberado em condições normais.

Entretanto, quando realizada a pelletização e sinterização, a quantidade de compostos de resíduos finos, algumas pelotas mal-formadas, mal compactadas ou

pequenas foram depositadas inadequadamente em uma barragem ao lado da usina de pelotização (Figura 2.1.6) (MONTEIRO, 2005). O tipo de barragem era de escavação e alcançou o nível freático. Depois desse processo o arsênio se tornou solubilizável à superfície dos grãos e contaminou a água da barragem, assim como as águas de subsolo (SCARPELLI, 2003).



Figura 2.1.6 – Depósito à superfície no interior da área industrial.

Fonte: Scarpelli (2003)

Para Gomes (2018) apud Silva Junior (2019) o depósito de rejeitos em barragens de contenção possui grande potencial poluidor, pois estão sujeitas à rompimentos ou vazamentos por se tratar de alternativa muito comum utilizada pelas empresas mineradoras devido ao baixo custo financeiro para monitoração e por suportarem maiores volumes de rejeitos oriundos da larga escala de produção. Porém, em muitos casos como no ocorrido em Mariana e Brumadinho, a causa dos rompimentos das barragens de rejeito está ligada à falha humana em planejar, construir e monitorar estes locais (FREITAS et al., 2022 ; COELHO et al., 2017).

Como afirmam Araújo et al. (2017) em seu artigo que discutiram a importância do manganês de Serra do Navio para a indústria, quais seus usos e perspectivas futuras, de acordo com análise, os autores concluem que, por ainda existirem reservas do minério no Estado que estão inativas, já que nenhuma outra empresa além da ICOMI investiu na exploração do manganês na região após a paralisação das atividades em 1997, ainda seria possível que o Amapá retornasse ao ranking dos principais produtores

de manganês, visto que, esta retomada auxiliaria também na problemática ambiental enfrentada em Serra do Navio em relação ao minério estocado até hoje, além de que fomentaria o mercado de trabalho trazendo contribuições para o desenvolvimento econômico da região.

## 2.2 APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS

A busca por um meio ambiente mais preservado está incentivando a criação de alternativas que diminuam a sua degradação de forma que os impactos das atividades extrativistas sejam minimizadas.

Já é notória a gama de estudos relacionadas ao reaproveitamento de rejeitos tanto no meio acadêmico como em empresas e órgãos ambientais. A necessidade e conscientização da sustentabilidade contribui para o desenvolvimento científico. Junto às engenharias, além da aprimoração dos processos produtivos, é perceptível a intenção de reaproveitar os resíduos com o intuito de reduzir o impacto ambiental causados na natureza.

Grande parte dos relatos de aplicações de resíduo de manganês na literatura internacional são sobre aproveitamento do resíduo do manganês eletrolítico, um tipo de resíduo sólido desenvolvido em filtros após a lixiviação com ácido sulfúrico do minério de carbonato de manganês (HAGELSTEIN, 2009 apud PIMENTEL et al., 2020), como na pesquisa de Zhou et al. (2014) ao utilizar o manganês eletrolítico na produção de tijolos, na síntese de zeólitas (LI et al., 2015) e como fíler na produção de concreto para melhoria da resistência e durabilidade (YANG et al., 2014).

Como aproveitamento do resíduo de minério de manganês, Castro (2011) analisou as possibilidades de aplicação do resíduo como matéria prima de cerâmicas vermelhas utilizadas para blocos de vedação. O resíduo foi adicionado à argila, que é utilizada comercialmente, gerando massas cerâmicas com teores de 0; 2,5; 5 e 10% onde cada uma destas formulações foram sinterizadas em diferentes temperaturas, 850°C, 950°C e 1050°C. Como resultados a adição de 10% na queima a 1050°C foi a que apresentou melhores resultados como 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 diminuição da temperatura de queima para 850°C,

para que houvesse redução de energia dispendida para a produção da cerâmica, resultando em aumento da resistência a flexão para 36,6 MPa. Sendo assim, a adição do resíduo de manganês à massa cerâmica para produção de cerâmica trouxe resultados satisfatórios do ponto de vista técnico.

Salguero et al. (2014) pesquisaram a possibilidade da aplicação dos resíduos da exploração de minérios de manganês do Cinturão da Península Ibérica, na produção de concreto. Utilizaram o resíduo de manganês em forma de pó como substituição de 20% do agregado miúdo. Em seguida foram feitos estudos comparativos entre as amostras de referência e as amostras com a nova substituição.

Por fim, a pesquisa apontou a adequação do novo material para aplicação, principalmente quanto a resistência a compressão. A amostra com a substituição de 20% atingiu maior resistência à compressão (56,44 MPa) aos 28 dias, em relação à amostra de referência (41,03 MPa) aos 28 dias. Desta forma as conclusões foram que o resíduo de Mn contribuiu para as propriedades do concreto e sugeriram o reaproveitamento do resíduo no setor de construções rodoviária por ser um grande consumidor de concreto e pelas aplicações serem com baixas exigências estruturais. Assim, o resíduo de minério de manganês que estava até então estocado nas barragens do cinturão da península ibérica e sem destinação, será reaproveitado e amenizará a degradação ambiental.

A seguir as tabelas 2.4 e 2.5 apresentam respectivamente as dosagens das amostras de referência e de substituição e a composição química do resíduo de Mn.

Tabela 2.4 - Dosagens

Dosagem/ m <sup>3</sup>	Cimento (kg)	Água (L)	Água a/ liga nte	Agregado grauído	Agregado miúdo	Substituição Mn (kg)	Superplastificante (kg)
<b>Referência</b>	375	165	0,44	925,8	995,7	-	4,69
<b>Substituição de Mn</b>	375	165	0,44	925,8	796,6	199,1	4,69

Fonte: Salguero et al. (2014)

Tabela 2.5 – Composição Química do resíduo de Mn

Amostra	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)

Viveiros (2017) estudou a possibilidade de utilização do resíduo de manganês como material de construção. Na pesquisa duas alternativas para uso do minério foram investigadas. Primeiramente utilizando o minério como fíler no cimento Portland fabricando argamassas com substituições de 6, 8 e 10% ao cimento. E como agregado miúdo na confecção de concretos com substituições de 15,20,25 e 30% ao agregado miúdo natural.

Nas argamassas a utilização do resíduo como fíler incrementou a resistência a compressão para os percentuais de 6 e 8%, assim como para resultados de absorção total e índice de vazios. E na utilização como agregado miúdo os concretos com substituição de 15 e 20% obtiveram resultados positivos nos ensaios de resistência a compressão axial. Para todas as amostras, as análises de resistência a tração e módulo de elasticidade os resultados foram satisfatórios entre os quais se destacam os concretos com 20,25 e 30% de substituição. A autora concluiu então que o resíduo é uma proposta viável tanto na forma de adição como fíler como agregado miúdo.

Abaixo as tabelas 2.6 e 2.7 apresentam respectivamente as dosagens das argamassas e dos concretos com suas substituições de resíduo de Mn.

Tabela 2.6 – Consumo dos materiais em Kg/m<sup>3</sup> para todas as argamassas

<b>Argamassas</b>	<b>Cimento</b>	<b>Resíduo de Mn</b>	<b>Agregado miúdo</b>	<b>Água</b>	<b>Aditivo</b>
AREF	499,98	0	1499,93	249,99	0
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

Fonte: Viveiros (2017)

Tabela 2.7 – Consumo dos materiais para confecção dos concretos

Concreto	Cimento (kg)	Agregado graúdo (kg)	Agregado miúdo (kg)	Resíduo de Mn (kg)	Água (L)	Aditivo (ml)
CREF	8,046	21,790	14,634	0	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

Fonte: Viveiros (2017)

Silva Junior (2019) analisou as propriedades do concreto com substituição parcial do agregado miúdo natural por resíduo de manganês para fins estruturais sem a utilização de aditivos plastificantes com variações de relação água cimento. As substituições foram na mesma porcentagem que as de Viveiros (2017), pois o resíduo de minério é proveniente da mesma mina, entretanto a pesquisa anterior utilizou aditivos, como demonstra a tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Consumo dos materiais por m<sup>3</sup>

Concreto	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado miúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Resíduo de Mn (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )
CREF	373	1010	678	0	235
C15Mn	373	1010	577	45	257
C20Mn	373	1010	543	59	276
C25Mn	373	1010	509	74	313
C30Mn	373	1010	475	89	332

Fonte: Silva Junior (2019)

A substituição de 30% de areia natural pelo resíduo de manganês demandou acréscimo de 2,9kg de água para manter o abatimento de  $70 \pm 10$ mm pré-estabelecido na pesquisa. Na figura 2.1.7 está ilustrado o aumento da relação água/ligante ao longo das substituições dos concretos.

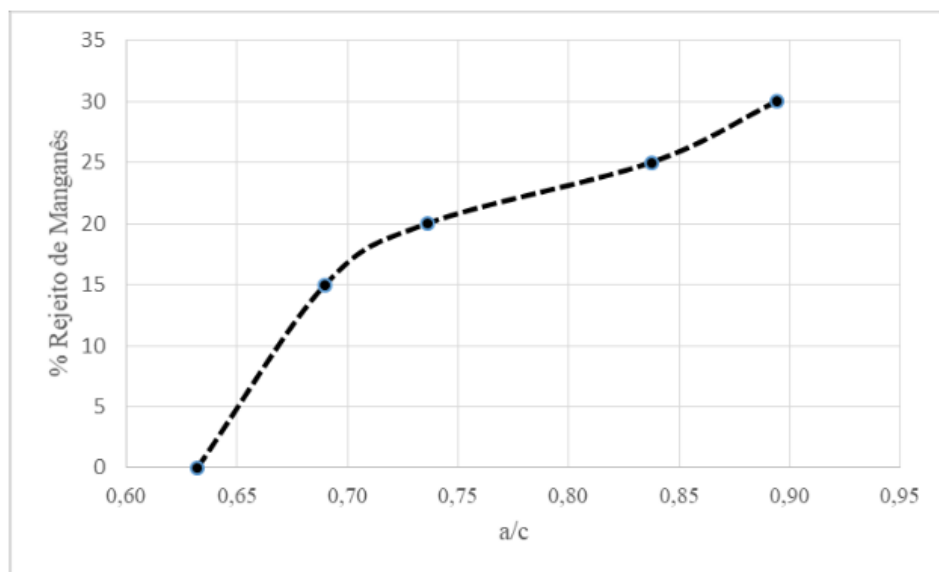


Figura 2.1.7 – Relação água/ligante em função do aumento de substituição da areia natural por resíduo de manganês no concreto.

Fonte: Silva Junior (2019)

Como resultados de resistência mecânica o concreto de referência apresentou a maior resistência à compressão axial quando comparado aos outros concretos na idade de 28 e 91 dias. As substituições de 15 e 20% atingiram 20MPa aos 91 dias, o restante ficou abaixo do valor mínimo de 20MPa estipulado pela NBR 6118 (ABNT,2014) para confecção de estruturas com armadura passiva. Quanto a compressão diametral o concreto de referência permaneceu com o maior resultado aos 28 dias.

O autor concluiu que os concretos analisados não atenderam requisitos para sua utilização para fins estruturais.

Ao estudar a substituição do agregado graúdo natural por escória industrial Ballari et al. (2023), encontraram resultados satisfatórios para o uso não estrutural.

As substituições que seguiram as proporções de 10, 20, 30 e 40% todas apresentaram resultados de resistência à compressão e tração aos 7 e 28 dias inferior ao concreto convencional.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para chegar ao objetivo desta pesquisa em encontrar alternativa adequada para inserir o resíduo de manganês na produção de concreto e como material da construção civil, o trabalho experimental tem como proposta a utilização do resíduo como agregado graúdo.

A caracterização física in natura do resíduo determinou a massa específica, massa unitária, módulo de finura, dimensão máxima, além de ensaios como o de abrasão Los Angeles, composição granulométrica, caracterização de reatividade: com cal e com o cimento Portland. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LEC), localizado na Universidade Federal do Pará (UFPA).

Também, a caracterização do resíduo de manganês foi realizada por fluorescência de raios X (FRX), junto ao ensaio reação álcali agregado, difração de raios X (DRX). O FRX e o DRX foram realizados no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) situado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Após a substituição do resíduo e a produção dos corpos de prova, o ensaio de absorção de água por imersão no concreto seguindo as diretrizes da NBR 9778 (ABNT, 2009) e absorção de água do agregado com as orientações da NBR NM 53 (ABNT, 2009) foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LEC), localizado na Universidade Federal do Pará (UFPA).

Os ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral foram avaliados aos 7 e 28 dias e realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade da Amazônia (UNAMA) e o módulo de elasticidade calculado a partir destes resultados.

Nas Figuras 3.1 e 3.2 estão esquematizados fluxogramas do planejamento da pesquisa para melhor compreensão do estudo.

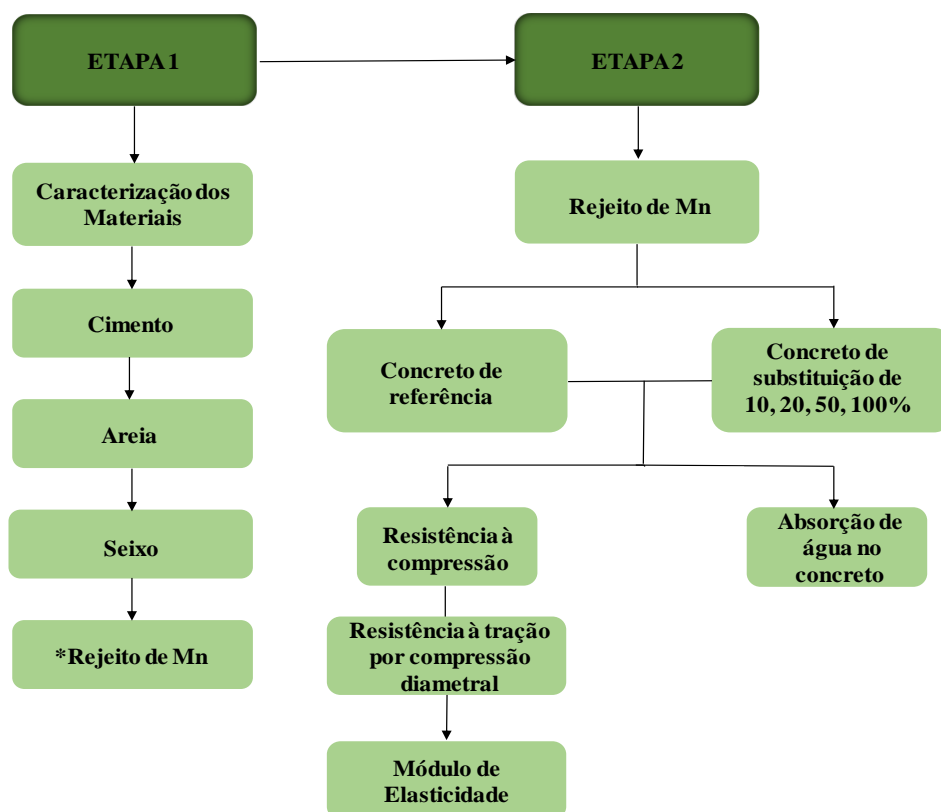


Figura 3.1 - Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa

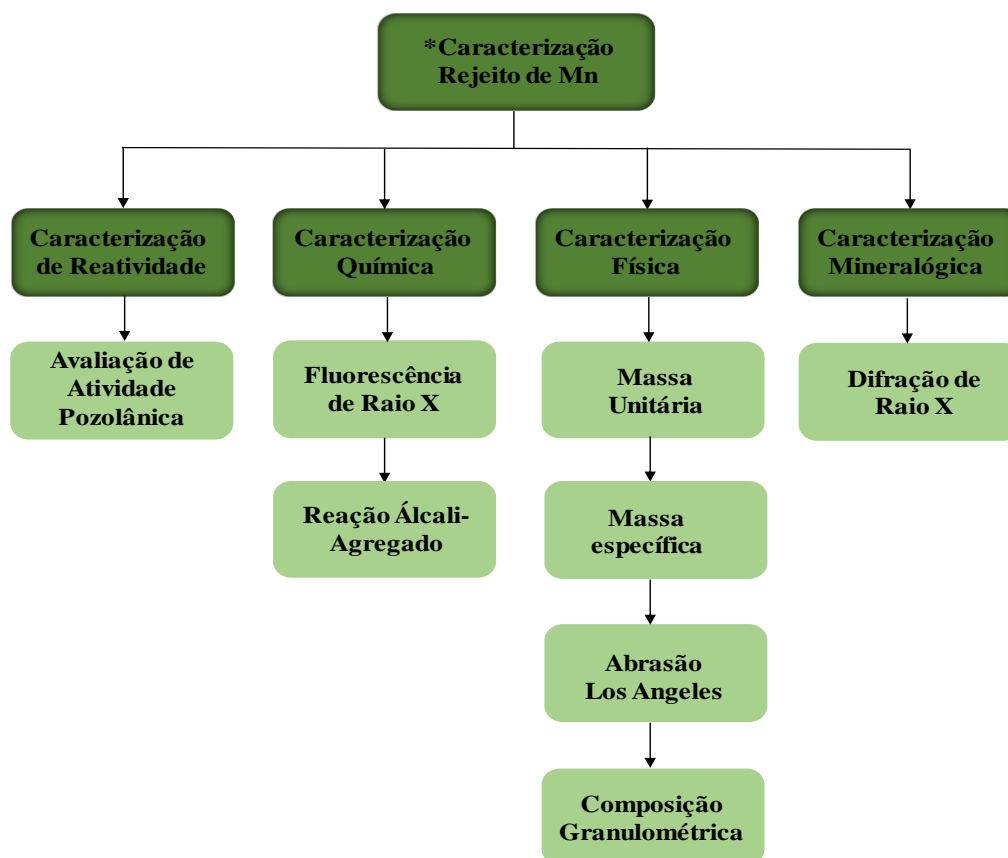


Figura 3.2 - Fluxograma da caracterização do resíduo manganês

## 3.2 ETAPA1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

### 3.2.1 Cimento Portland

O cimento adotado nesta pesquisa para a aplicação do resíduo de manganês como agregado graúdo para confecção de concreto estrutural foi o cimento Portland tipo CP-IV 32 (Cimento Portland Pozolânico), segundo as prescrições da NBR 16697 (ABNT, 2018a) e a determinação de sua massa específica, conforme NBR 16605 (ABNT, 2017).

### 3.2.2 Agregado Miúdo

A areia utilizada para a confecção do concreto foi de agregados comumente encontrados nos leitos dos rios próximos à região metropolitana de Belém do Pará, passou por secagem com o auxílio de estufa e foi armazenada em tonéis.

Quando caracterizado para obtenção de massa unitária e índice de vazios seguiu as condições exigidas pela NBR NM 45 (ABNT, 2006), para a composição granulométrica a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e massa específica a NBR NM 52 (ABNT, 2009a), representados nas Tabelas 3.1 e 3.2 e Figura 3.3.

Tabela 3.1 – Métodos de caracterização do agregado miúdo

<b>Ensaios realizados</b>	<b>Norma</b>
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009a)
Índice de vazios	NBR NM 45 (ABNT, 2006)

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	0,53	0,18	0,18	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
2,36	2,06	0,69	0,86	
1,18	9,07	3,03	3,89	
0,6	25,62	8,54	12,43	
0,3	131,40	43,83	56,26	
0,15	99,30	33,12	89,39	
Fundo	31,81	10,61	100,00	
	299,79	100		
Massa Específica		2,50 g/cm <sup>3</sup>	NBR NM 52 (ABNT,2009)	
Massa Unitária		1,47 g/cm <sup>3</sup>	NBR NM 45 (ABNT,2006)	
Módulo de Finura		1,63	NBR NM 248 (ABNT,2003)	
Dimensão Máxima		1,18 mm	NBR NM 248 (ABNT,2003)	
Índice de Vazios		41%	NBR NM 45 (ABNT,2006)	
Fator de empacotamento		59%	NBR NM 45 (ABNT,2006)	

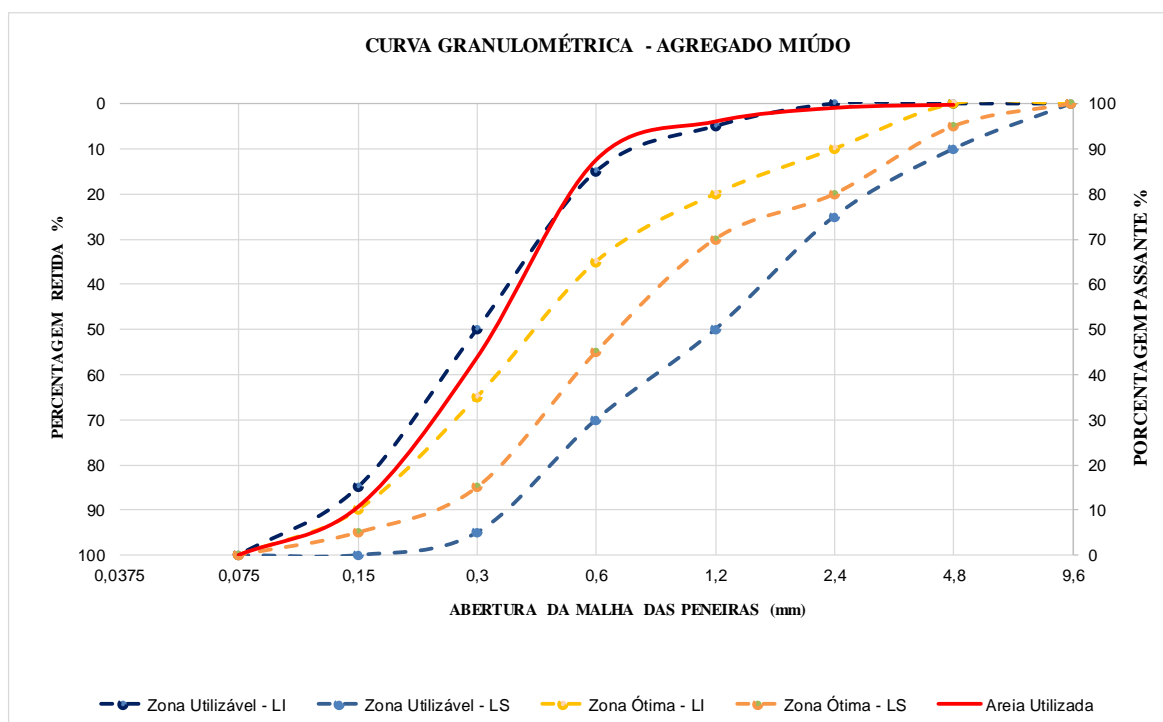


Figura 3.3 - Curva granulométrica do agregado miúdo e limites da NBR 7211 (ABNT, 2009a)

Observa-se que o agregado miúdo natural apresenta uma distribuição contínua, variando entre as zonas utilizáveis e ótimas, saindo um pouco da zona utilizável do

limite superior em apenas um trecho da curva. Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009a) o agregado miúdo para ser utilizado em concreto deve atender as curvas ótimas e utilizáveis dentro de seus limites inferiores e superiores.

### 3.2.3 Água

Foi utilizada água potável com temperatura de 28°C e pH 6,0 proveniente da Universidade Federal do Pará, possibilitando a viabilidade de sua utilização na produção dos concretos.

### 3.2.4 Agregado Graúdo

Utilizou-se na confecção dos concretos o agregado graúdo natural (seixo) proveniente da região metropolitana de Belém que atende às exigências da NBR 7211 (ABNT, 2009a) e caracterizado de acordo com as NBR NM 248 (ABNT, 2003), NM 53 (ABNT, 2009) e NM 45 (ABNT, 2006). Os métodos e suas normas correspondentes foram listados na tabela 3.3 abaixo.

Tabela 3.3 – Métodos de caracterização do agregado graúdo natural (seixo)

<b>Ensaio realizado</b>	<b>Norma</b>
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa específica	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Abrasão Los Angeles	NBR NM 51 (ABNT, 2001)

A Tabela 3.4 apresenta a distribuição granulométrica do agregado graúdo em uma amostra de 2 kg e a figura 3.4 a sua curva granulométrica gerada a partir da distribuição granulométrica.

Tabela 3.4 – Caracterização do Agregado Graúdo Natural

Agregado Graúdo Natural (seixo)				
Abertura das Peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Norma de Ensaio
75	0	0,00	0,00	
37,5	0	0,00	0,00	
19	13,31	0,67	0,67	
9,5	973,07	48,68	49,34	
4,75	717,74	35,90	85,24	
2,36	198,24	9,92	95,16	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
1,18	41,49	2,08	97,24	
0,6	24,75	1,24	98,47	
0,3	14,22	0,71	99,19	
0,15	6,97	0,35	99,53	
Fundo	9,30	0,47	100,00	
	1999,09	100		
Massa Específica		2,56 g/cm <sup>3</sup>	NBR NM 52 (ABNT,2009)	
Massa Unitária		1,52 g/cm <sup>3</sup>	NBR NM 45 (ABNT,2006)	
Módulo de Finura		6,25	NBR NM 248 (ABNT,2003)	
Dimensão Máxima		19 mm	NBR NM 248 (ABNT,2003)	

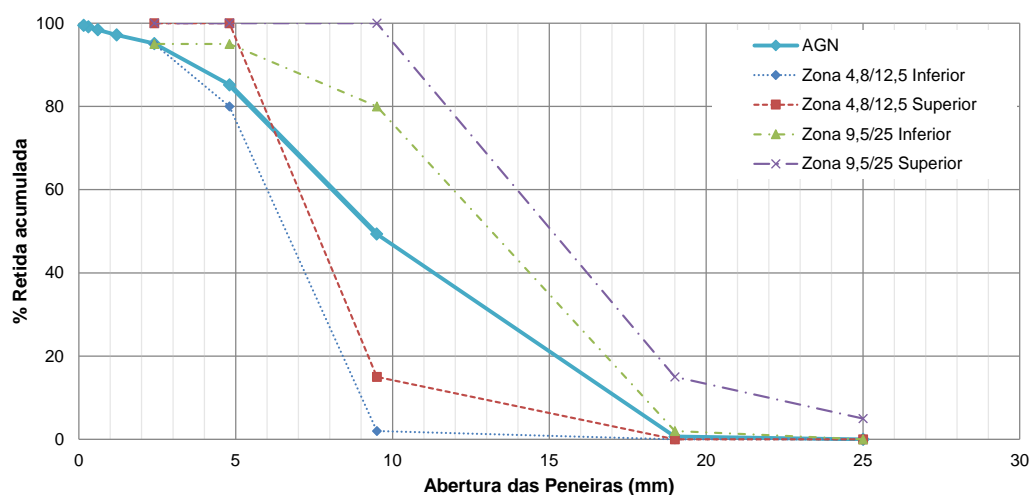


Figura 3.4 - Curva granulométrica do Agregado Graúdo Natural

A granulometria da amostra de agregado graúdo natural apresenta uma distribuição contínua, permanecendo entre os limites das zonas superiores e inferiores.

### 3.2.5 Resíduo de Manganês

#### 3.2.5.1 Amostragem

##### ❖ Procedência

O resíduo mineral adotado para esta pesquisa procede da exploração de manganês da região de Serra do Navio, mina que atualmente não está mais em atividade, entretanto ainda possui quantidade significativa de pilhas de resíduo no local como pode ser verificado na Figura 3.5 (a) (b).



Figura 3.5 – Pilha de Resíduos em Serra do Navio (a) (b)

Fonte: Autor

As minas de Serra do Navio estão localizadas nas margens do Rio Amapari na extremidade leste do Planalto das Guianas, onde há pequenos morros formados pela dissecação das bordas do planalto e a 200 quilômetros a noroeste de Macapá. (DRUMMOND; PEREIRA, 2007).

##### ❖ Coleta da Amostra

Inicialmente 10 kg aproximadamente da amostra foram enviadas para o Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA), de acordo com as exigências da NBR 10007 (ABNT, 2004) que correspondem a amostragem de resíduos sólidos. Posteriormente mais 213 kg foram recebidos e armazenados em recipientes plásticos para sua utilização ao longo da pesquisa.

#### 3.2.5.2 Caracterização Física

As características físicas analisadas para a utilização do resíduo de manganês da região de Serra do Navio como agregado graúdo foram a composição granulométrica

pelo método das peneiras seguindo prescrições da NBR NM 248 (ABNT, 2003), massa unitária segundo NM 45 (ABNT, 2006), a massa específica por meio da NBR NM 53 (2009) e Abrasão Los Angeles de acordo com NBR NM 51 (ABNT, 2001), estão listadas na tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Métodos de caracterização do agregado graúdo de resíduo de manganês.

<b>Ensaio realizado</b>	<b>Norma</b>
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa específica	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Abrasão Los Angeles	NBR NM 51 (ABNT, 2001)

Como o minério possui variação em sua granulometria, como pode ser visualizado na figura 3.6, antes de dar início à caracterização física, como forma de assemelhar-se ao agregado graúdo natural em seu diâmetro máximo, a amostra passou por um britador de mandíbula (Figura 3.7) com abertura de 19mm no Laboratório de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará e, em seguida, foi peneirado na malha de abertura de 4,75mm para separação da fração que corresponderia a um agregado miúdo.



Figura 3.6 – Variação de tamanho do resíduo de manganês a ser utilizado como agregado graúdo.

Fonte: Autor





Figura 3.7 – Britador de Mandíbula.

Fonte: Autor

#### 3.2.5.3 Caracterização Mineralógica

A difração por Raios X (DRX) consiste na análise do grau de cristalinidade e presença de minerais segundo Antoniassi (2010) por intermédio do fenômeno de relações entre um feixe incidente de raio x e os elétrons dos átomos existentes em um material com a detecção dos fótons difratados que correspondem ao feixe difratado. Caso haja predominância na forma cristalina, a indicação do resultado aponta para baixa atividade e, se for amorfo, terá maior potencial pozolânico (VIVEIROS, 2017).

A avaliação por difração de raios X é um método qualitativo e não quantitativo (CUCHIERATO, 2000). Foi feita pelo método do pó, no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) situado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Para a realização do ensaio de Difração de Raios X parte da amostra com granulometria menor foi pulverizada em almofariz no Laboratório de materiais da Universidade da Amazônia (UNAMA) para atingir a granulometria de material passante na peneira de malha número 200 de abertura 0,075mm exigida pelo LACER.

#### 3.2.5.4 Caracterização Química

A técnica do ensaio de fluorescência de raios X baseia-se na irradiação de um feixe de raios X primário por intermédio de um tubo e os elementos químicos que forem agitados emitirão raios X secundários que serão detectados e registrados em um espectro (KLOCKENKÄMPER; VON BOHLEN, 2015).

Quando os ângulos de reflexão já são definidos junto com a intensidade da irradiação junto a detectores e cristais analisadores é possível fazer análise qualitativa e quantitativa dos elementos pertencentes à amostra a partir da radiação fluorescente específica emitida pelo átomo e identificando as diferentes radiações pelas suas energias (ANTONIASSI, 2010).

A verificação da caracterização química foi realizada por Fluorescência de Raios X (FRX) nos laboratórios de Materiais Cerâmicos (LACER) situado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

#### 3.2.5.6 Ensaio de Potencial Reatividade

A fim de encontrar a solução mais adequada para a aplicação do resíduo de manganês como material de construção civil serão avaliados os índices de atividade pozolânica (IAP) com cal e cimento e a reação álcali-agregado.

A reação álcali-agregado é uma reação química deletéria que ocorre internamente nas estruturas de concreto e envolve os íons alcalinos (sódio e potássio) presentes na pasta de cimento hidratada junto a minerais existentes em certos tipos de agregados reativos (HASPARYK; KUPERMAN, 2021).

Segundo Fournier (2000 apud HELENE; CARVALHO; PACHECO, 2017), para que esta reação ocorra, três condições devem ser atendidas como: agregado potencialmente reativo, umidade suficiente e alta concentração de hidróxidos alcalinos no líquido poroso. O produto da reação é um gel higroscópico que expande pela absorção de água causando fissuração interna que afetará as propriedades mecânicas e o módulo de elasticidade do concreto, contribuindo para a redução da vida útil da estrutura (CARRAZEDO; LACERDA, 2008 apud POSTERLLI, 2017). Hasparyk (2005) diz que as manifestações comuns encontradas em estruturas de concreto que foram prejudicadas pela RAA são fissurações do tipo “mapa”, exsudação de gel na superfície do concreto, bordas ao redor dos agregados, preenchimento de poros com material branco ou vítreo e microfissuração e descoloração do concreto.

Já que a RAA é um dos fatores que reduzem a durabilidade da estrutura trazendo riscos às obras civis, a sua prevenção é a melhor alternativa para o controle da patologia, pois uma vez instalada torna-se tecnicamente complexa a sua interrupção juntamente com inviabilidade econômica (BAPTISTA, HÖEHR, DAL MOLIN, 2013 apud GOBI, 2017; BATTAGIN et al., 2009 apud FELIX et al., 2017).

### 3.3 ETAPA 2: RESÍDUO DE MANGANÊS COMO AGREGADO GRAÚDO NO CONCRETO

#### 3.3.1 Desenvolvimento dos concretos

Em busca da viabilidade de aplicação do resíduo do minério de manganês como material para a construção civil, foram confeccionados corpos de prova com substituições do agregado graúdo natural pelo resíduo de manganês in natura para a avaliação nas propriedades do concreto.

O método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992) foi o utilizado para a dosagem do concreto já que consiste em ajustar o teor ideal de argamassa ( $\alpha$ ) estabelecendo como parâmetro de controle, o valor de abatimento do tronco de cone, que foi fixado em  $100 \pm 20$ mm.

Para o traço de referência, denominado na pesquisa CREF, foi fixado 1:4,53, com  $F_{ck}$  de 30MPa e concretos confeccionados com substituição em volume de seixo, nos teores de 10% (C10Mn), 20%(C20Mn), 50% (C50Mn) e 100% (C100Mn), por resíduo de manganês.

Para a substituição de agregados naturais por agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil, a NBR 15116 (ABNT, 2004) recomenda a substituição de até 20%, desta forma as substituições de 10% e 20% foram definidas em função da NBR mencionada. Entretanto, pelo fato do resíduo de manganês ser um material com poucos estudos como material na construção civil, as substituições de 50% e 100% foram definidas de modo a analisar o comportamento do resíduo no concreto em outras proporções de forma mais ampla afim de verificar a viabilidade de seu uso da maior quantidade de minério possível.

O teor de argamassa definido foi de 51% e relação água/ligante 0,53. Quando necessário, foi utilizado aditivo superplastificante para manter a consistência do

concreto para alcançar abatimento sem alterar a relação água/ligante. Os corpos de prova com substituição do resíduo foram elaborados com traço unitário de 1:1,82:2,71 em massa. Sua dosagem e moldagem foram realizadas no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UFPa.

As quantidades de corpos de prova para a produção estão apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - 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	6	6	6	6
C10Mn	10%	6	6	6	6
C20Mn	20%	6	6	6	6
C50Mn	50%	6	6	6	6
C100Mn	100%	6	6	6	6
	Total Parcial	30	30	30	30
	Total Final				120

A substituição do agregado graúdo natural (AGN) pelo resíduo de manganês foi realizada por compensação de volume pois, quando um material possuir menor massa específica significa que haverá um maior volume de agregado. E no caso desta pesquisa, a substituição da massa do AGN pela massa do resíduo de Mn resultaria em traços com volumes menores de resíduo, uma vez que a massa específica do resíduo de Mn é maior que a massa específica do AGN, demandando assim menos água e cimento para produzir traços equivalentes ao traço de referência, gerando valores incoerentes (VIVEIROS, 2017; SILVA JUNIOR, 2019).

A partir da quantidade de corpos de prova foi calculado o consumo de materiais de cada família por meio da equação 3.3 onde seus resultados podem ser visualizados na Tabela 3.7.

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{a}{\rho_a} + \frac{p}{\rho_p} + a/c} \quad (3.3)$$

Onde:

C = Consumo de cimento por metro cúbico de argamassa;

$a$  = Quantidade de areia no traço em massa para 1kg de cimento;

$p$  = Quantidade de seixo no traço em massa para 1kg de cimento;

$\rho_c$  = Massa específica do cimento ( $\text{g/cm}^3$ );

$\rho_a$  = Massa específica da areia ( $\text{g/cm}^3$ );

$\rho_p$  = Massa específica do seixo ( $\text{g/cm}^3$ );

$a/c$  = Relação água/ligante.

Tabela 3.7 – Consumo dos materiais para a confecção dos concretos.

Materiais	Quantidade de Materiais				
	CRef	C10Mn	C20Mn	C50Mn	C100Mn
Cimento (kg)	16,245	16,245	16,245	16,245	16,245
Areia (kg)	29,545	29,545	29,545	29,545	29,545
Seixo (kg)	43,994	39,595	35,196	21,997	-
Resíduo Mn (kg)	-	5,140	10,280	25,701	51,402
Água (L)	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61

### 3.3.2 Propriedades do concreto

Os ensaios de resistência mecânica como os de resistência à compressão foram baseados na NBR 7215 (ABNT, 2019), os de tração por compressão diametral seguiram as recomendações da NBR 7222 (ABNT, 2011) e os de módulo de elasticidade segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014).

De acordo com Askeland e Phulé (2008) o módulo de elasticidade é a inclinação da parte linear da curva tensão deformação na região elástica onde define-se uma medida da dificuldade de se deformar um material. Em materiais homogêneos, o módulo de elasticidade é a medida das forças limitantes interatômicas e as alterações microestruturais não interferem em seus resultados, diferentemente do que ocorre com materiais compósitos como o concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Todos estes ensaios foram realizados com a ruptura dos corpos de prova aos 7 e 28 dias no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) na UFPA, com exceção do módulo de elasticidade que foi realizado aos 28 dias.

Além dos ensaios de resistência mecânica foi avaliada a durabilidade do concreto, pois a partir do ensaio de absorção de água do concreto por imersão com as substituições do agregado graúdo por resíduo de manganês é possível identificar o comportamento do concreto e sua vida útil. Para isso foi realizado a partir da norma NBR 9778 (ABNT, 2009).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MANGANÊS

#### 4.1.1 Caracterização Física

##### 4.1.1.1 Granulometria

Foram realizados 4 ensaios de granulometria com o resíduo sendo cada um correspondente à sua substituição junto ao agregado graúdo de 10%,20%,50% e 100%, conforme o objetivo deste trabalho.

Por se tratar do objeto de estudo desta pesquisa a granulometria de 100% da amostra de 5kg do minério foi realizada em peneiras da série intermediária para melhor visualização da curva granulométrica como pode ser visto na tabela 4.1 e figura 4.5.

Tabela 4.1 – Caracterização do resíduo de Mn 100%

Resíduo de Mn como Agregado Graúdo (100%)				
Abertura das Peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Norma de Ensaio
75	0	0,00	0,00	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
37,5	0	0,00	0,00	
25,00	0	0,00	0,00	
19	67,76	1,36	1,36	
12,5	1799,42	36,07	37,42	
9,5	1611,37	32,3	69,72	
6,3	1020,11	20,45	90,17	
4,75	431,72	8,65	98,82	
2,36	29,96	0,60	99,42	
1,18	1,40	0,03	99,45	
0,6	1,91	0,04	99,49	
0,3	2,92	0,06	99,54	
0,15	4,62	0,09	99,64	
Fundo	18,14	0,36	100,00	
TOTAL	4989,33	100		
Massa Específica		2,99 g/cm³	NBR NM 53 (ABNT,2009)	
Massa Unitária		1355,04 kg/cm³	NBR NM 45 (ABNT,2006)	
Módulo de Finura		6,81	NBR NM 248 (ABNT,2003)	
Dimensão Máxima		19 mm	NBR NM 248 (ABNT,2003)	

A figura 4.1 mostra a representação visual das frações do resíduo retidas em cada peneira durante a granulometria do resíduo.



Figura 4.1 – Composição granulométrica resíduo de Mn 100%

Fonte: Autor

Por meio da distribuição granulométrica são determinadas as dimensões máximas do agregado e sua graduação afim de serem aplicadas em casos específicos, como definição da espessura mínima da camada de um pavimento ou o espaçamento das barras de armadura do concreto (LENKE; ZAGOTO; FARIA, 2017).

Nas figuras 4.2,4.3,4.4 e tabelas 4.2,4.3,4.4 a seguir estão representadas as caracterizações de acordo com as substituições, ou seja 10% de resíduo com 90% de AGN, 20% de resíduo com 80% de AGN e 50% de resíduo com 50% de AGN.



Tabela 4.2 – Caracterização do resíduo de Mn (10%) com AGN (90%)

Resíduo de Mn como Agregado Graúdo (10%)				
Abertura das Peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Norma de Ensaio
75	0	0,00	0,00	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
37,5	0	0,00	0,00	
19	25,09	1,26	1,26	
9,5	1437,48	72,05	73,31	
4,75	432,46	21,68	94,98	
2,36	83,19	4,17	99,15	
1,18	9,40	0,47	99,62	
0,6	3,37	0,17	99,79	
0,3	1,45	0,07	99,86	
0,15	0,71	0,04	99,90	
Fundo	2,02	0,10	100,00	
	1995,17	100		
Módulo de Finura		6,68	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	
Dimensão Máxima		19 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	



Figura 4.2 – Composição granulométrica resíduo de Mn (10%) com AGN (90%)

Fonte: Autor

Tabela 4.3 – Caracterização do resíduo de Mn (20%) com AGN (80%)

Resíduo de Mn como Agregado Graúdo (20%)				
Abertura das Peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Norma de Ensaio
75	0	0,00	0,00	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
37,5	0	0,00	0,00	
19	101,53	5,08	5,08	
9,5	1340,3	67,13	72,21	
4,75	483,51	24,22	96,43	
2,36	65,04	3,26	99,69	
1,18	2,31	0,12	99,80	
0,6	0,49	0,02	99,83	
0,3	0,64	0,03	99,86	
0,15	0,74	0,04	99,89	
Fundo	2,1	0,11	100,00	
	1996,66	100		
Módulo de Finura		6,73	NBR NM 248 (ABNT,2003)	
Dimensão Máxima		19 mm	NBR NM 248 (ABNT,2003)	



Figura 4.3 – Composição granulométrica resíduo de Mn (20%) com AGN (80%)

Fonte: Autor

Tabela 4.4 – Caracterização do resíduo de Mn (50%) com AGN (50%)

Resíduo de Mn como Agregado Graúdo (50%)				
Abertura das Peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Norma de Ensaio
75	0	0,00	0,00	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
37,5	0	0,00	0,00	
19	11,93	0,60	0,60	
9,5	1269,13	63,48	64,07	
4,75	613,13	30,67	94,74	
2,36	79,49	3,98	98,72	
1,18	7,04	0,35	99,07	
0,6	4,31	0,22	99,28	
0,3	3,08	0,15	99,44	
0,15	2,67	0,13	99,57	
Fundo	8,57	0,43	100,00	
	1999,35	100		
Módulo de Finura		6,55	NBR NM 248 (ABNT,2003)	
Dimensão Máxima		19 mm	NBR NM 248 (ABNT,2003)	



Figura 4.4 – Composição granulométrica resíduo de Mn (50%) com AGN (50%)

Fonte: Autor

A figura 4.5 representa todas as curvas granulométricas desenvolvidas através dos ensaios da granulometria com cada teor de substituição demonstrado nas tabelas anteriores da caracterização física.

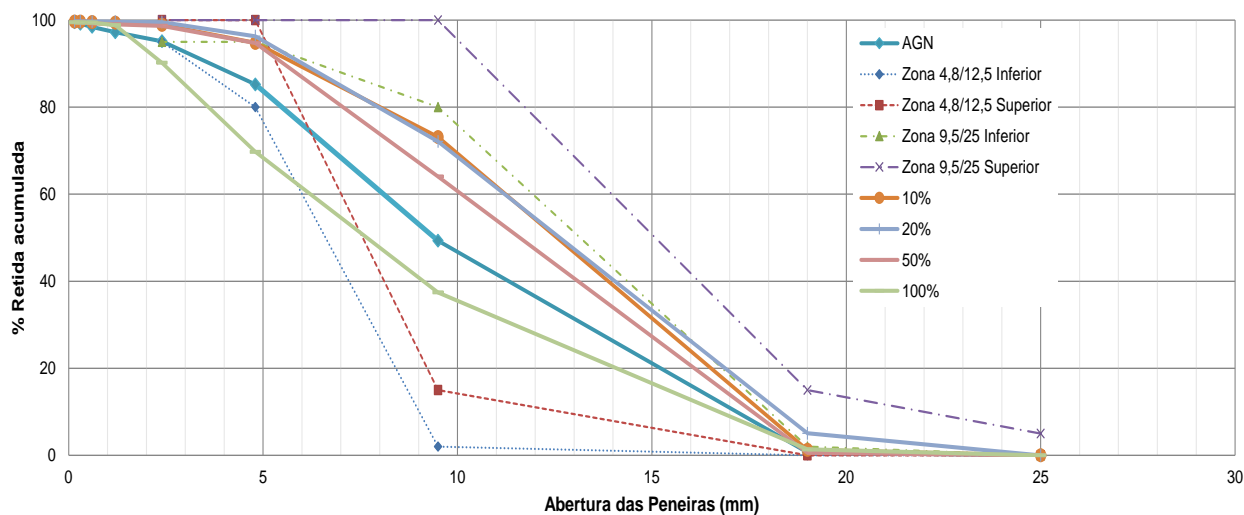


Figura 4.5 - Curva granulométrica com os teores de substituição de agregado graúdo por Manganês.

Para fins de conhecimento do material analisado e possíveis estudos futuros, foi realizada a composição granulométrica do resíduo para utilização como agregado miúdo como consta na Tabela 4.5 e Figura 4.6, respectivamente.

Tabela 4.5 - Caracterização do resíduo de Mn como Agregado miúdo.

Resíduo de Mn como Agregado Miúdo				
Abertura das Peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Norma de Ensaio
4,75	0,72	0,15	0,15	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
2,36	145,67	29,96	30,11	
1,18	114,36	23,52	53,63	
0,6	111,16	22,86	76,50	
0,3	66,60	13,70	90,20	
0,15	33,69	6,93	97,13	
Fundo	13,96	2,87	100,00	
	486,16	100		

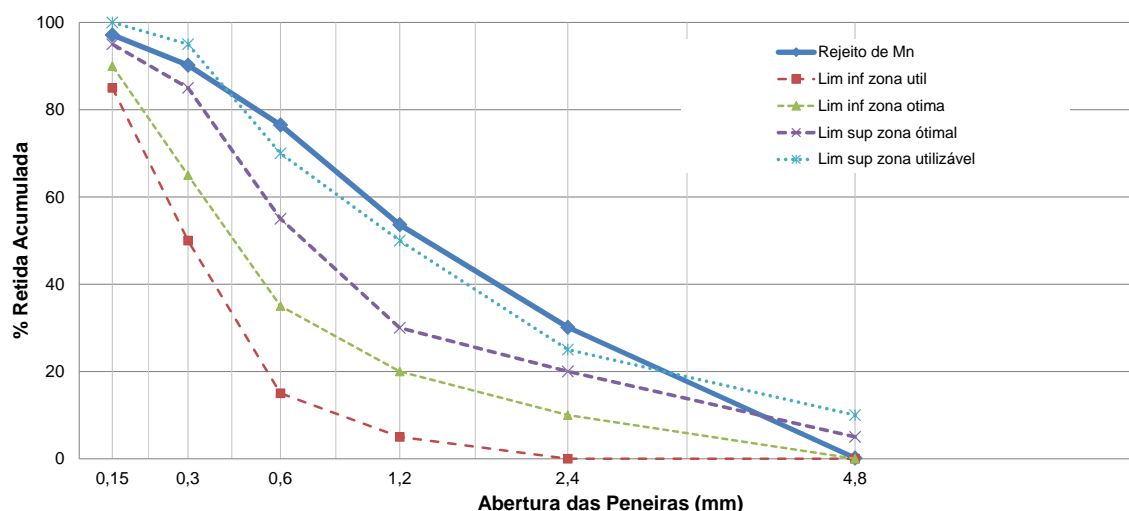


Figura 4.6 - Curva Granulométrica do resíduo de Mn como agregado miúdo.

O resíduo, quando distribuído como agregado graúdo do resíduo (100%), se encontra entre as zonas limitantes pela NBR 7211 (ABNT,2009) assim como nas distribuições com substituições de 10% e 50%. Na curva granulométrica da substituição de 20% o agregado foi classificado dentro da faixa especificada ficando fora dos limites na abertura da peneira de 19mm.

Quando analisado como agregado miúdo na curva granulométrica, se localiza predominantemente fora do limite superior da zona utilizável da distribuição granulométrica. No entanto parte da massa retida inicialmente se insere entre o limite inferior e superior da zona ótima e, no fim do ensaio, já apresentam dados em que o resíduo está entre o limite superior da zona ótima e o limite superior da zona utilizável (FONT et al., 2020).

#### 4.1.1.2 Abrasão Los Angeles

O índice de desgaste por abrasão resultou em 33,6% como demonstrado na tabela 4.6 atendendo às exigências da NBR 7211 (ABNT, 2009) para utilização como agregados graúdos em concreto onde os valores obtidos devem ser inferiores a 50% em massa do material.

#### 4.1.1.3 Avaliação a absorção de água no agregado

A absorção de água no resíduo de manganês como agregado graúdo foi realizada seguindo as recomendações da NBR NM 53 (ABNT, 2009) por meio da fórmula:

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100$$

Sendo:

A é a absorção de água, em porcentagem;

$m_s$  é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

m é a massa ao ar da amostra seca, em gramas.

O resultado da absorção foi de 6,77% o que justifica a dificuldade de trabalhabilidade no desenvolvimento dos concretos de acordo com o aumento das substituições.

Viveiros (2017) afirma que o resíduo de manganês da Serra de Buritirama possui elevada superfície específica, fator que contribuiu para que as suas misturas com esse material exigissem maior quantitativo de água.

Silva junior (2019) justifica que a elevada superfície específica do resíduo é causada pela forma áspera e irregular dos grãos e, por isso, parte da água de amassamento fica adsorvida à superfície do resíduo, o que compromete sua trabalhabilidade, fato corroborado por outras literaturas mencionadas.

Santos (2011) menciona a influência das formas do grão no concreto como por exemplo, quando as formas se afastam do tipo esférico e cúbico, pois estes exigem mais água para uma mesma consistência no concreto.

Pelissari et al. (2020) em sua pesquisa ao utilizar agregado graúdo reciclado quando comparado com o concreto de referência, mesmo tendo sido pré-saturado com água de emassamento da concretagem, o agregado, ainda sim, absorveu parte da água de emassamento durante seu estado fresco, diminuindo seu *Slump*.

Uma das soluções sugeridas pelos autores mencionados anteriormente para a correção da absorção excessiva da água pelo agregado e para o efeito de diminuição da trabalhabilidade do concreto seria a pré-saturação do resíduo como agregado antes de serem adicionados à mistura de concreto como é recomendada pela NBR 15116 (ABNT,2004) ou uma adequação do tempo preconizado pela norma de acordo com o que, no caso desta pesquisa, o manganês demanda.

Tabela 4.6 – Resultado Abrasão Los Angeles

Faixas Granulométricas (mm)	Massa amostra – “M” (g)	Massa Retida #1,7mm - “M <sub>1</sub> ” (g)	Perda por Abrasão – “P” (%)
19,00 – 12,50	2500	-	-
12,5 – 9,50	2500	-	-
TOTAL	5000	3320	33,6

### 4.1.2 Caracterização Química

#### 4.1.2.1 Fluorescência de raios X

São três óxidos os principais componentes das partículas minerais do resíduo de minério de manganês:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{MnO}$ , sendo seus dados apresentados na tabela 4.7, que segue abaixo.

Tabela 4.7 – Análise Química Resíduo de Mn por fluorescência de raios X.

Análise Química (%)												
Amostra	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	LOI	TOT
Mn	6,85	<b>22,20</b>	1,06	<b>29,22</b>	<b>24,00</b>	0,37	0,13	Não detec	0,49	0,12	15,28	99,73

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014) um dos requisitos químicos para que o material seja considerado pozolânico é que a soma das porcentagens de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  do material analisado sejam no mínimo maiores ou iguais a 50. Desta forma o resultado referente ao resíduo de Mn totaliza o valor de 58,27%. Atendendo a este primeiro requisito da norma e classificado como material Classe E: quaisquer pozolanas, que obedeçam a requisitos desta Norma.

#### 4.1.2.2 Reação Álcali-Agregado

Na figura 4.7 está representada a evolução da expansão média das três barras de argamassa moldadas com a dosagem e utilização de cimento CPI, considerado cimento-padrão, ambos recomendados pela NBR15577-4 (ABNT, 2018). Por meio desta evolução é possível classificar a potencialidade inócua ou reativa do agregado utilizado nesta pesquisa.

Considerando a imagem com os resultados, até o 16º dia a expansão aumentou gradativamente, porém no 30º dia houve uma pequena redução da expansão da

argamassa comparada a leitura anterior do 27º dia (0,144%), que pode ter ocorrido pela alta precisão do relógio comparador ou pela variação da temperatura ambiente e o termorregulador no momento da leitura.

Portanto ao longo de todo o ensaio até os seus 30 dias a expansão foi de 0,135%, expansão inferior ao valor limite de 0,19% preconizado pela NBR 15577-1 (ABNT, 2018b). Sendo assim o material analisado de resíduo de minério de manganês foi classificado como potencialmente inócuo para uso em concreto.

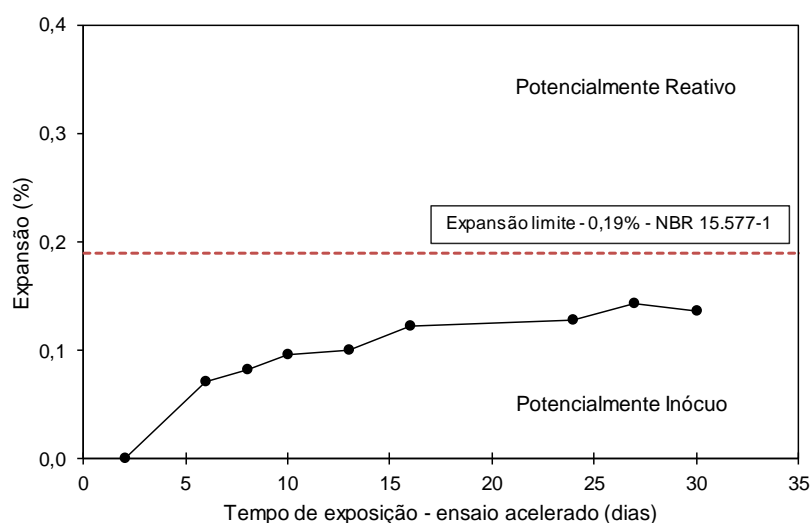


Figura 4.7 - Reação álcali-agregado: evolução da expansão média das barras de argamassa com resíduo de Mn.

Fonte: Font et al. (2020)

### 4.1.3 Caracterização Mineralógica

#### 4.1.3.1 Difração de raios X

Callister Jr. e Rethwisch (2020) definem como materiais cristalinos aqueles que apresentam difratogramas com intensa quantidade de picos, e os que possuem fases amorfas aqueles que apresentam curvas com formas abauladas e ausência de picos, ou seja, no material cristalino os átomos estão situados em um arranjo que se repete em grandes distâncias atômicas.

Na amostra foi indicada a presença dos minerais Penantita  $((\text{Mn}_{5+2}\text{Al})(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8)$ , Gibbsite  $(\text{Al}(\text{OH})_3)$ , Todorokita  $(\text{Mn}_6\text{O}_{12}(\text{H}_2\text{O})_2)$  e quartzo  $(\text{SiO}_2)$  ao realizar caracterização mineral do minério.



Conforme o difratograma apresentado na figura 4.8, o material da amostra de manganês possui picos característicos de Todorokita ( $\text{Mn}_6\text{O}_{12}(\text{H}_2\text{O})_2$ ), Penantita ( $(\text{Mn}_{5+2}\text{Al})(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ), Gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) e a identificação de halos amorfos, portanto passíveis de interação com o hidróxido de cálcio (FONT et al., 2020).

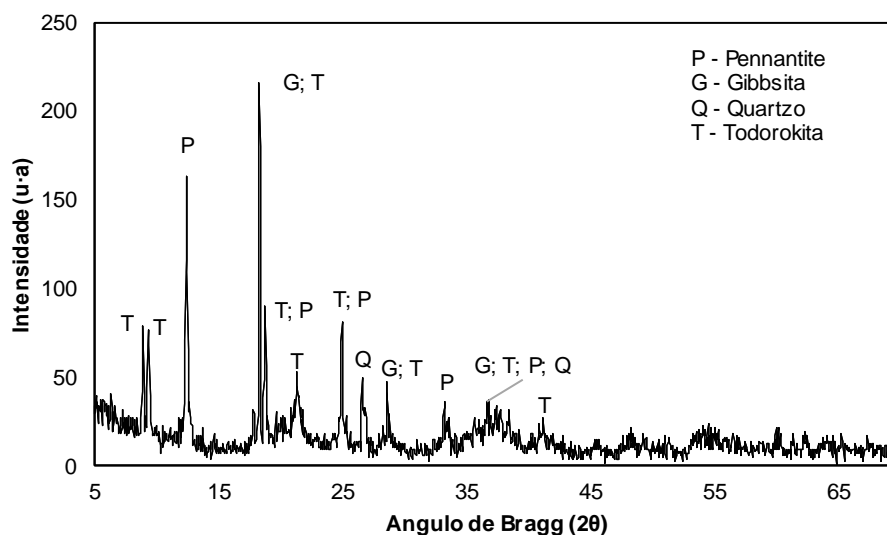


Figura 4.8 – Difratograma das amostras de resíduo de Mn.

Fonte: LACER- UFRGS

#### 4.1.4 Caracterização Reatividade

##### 4.1.4.1 Atividade Pozolânica com cal

Os três corpos de prova moldados atingiram a resistência à compressão mínima de 6,0 MPa, como mostra a figura 4.9, exigida pela NBR 12653 (ABNT, 2014) e, baseado na metodologia de análise do material pela avaliação da atividade pozolânica determinada pela NBR 5751 (ABNT, 2015), podem ser classificados como pozolana.

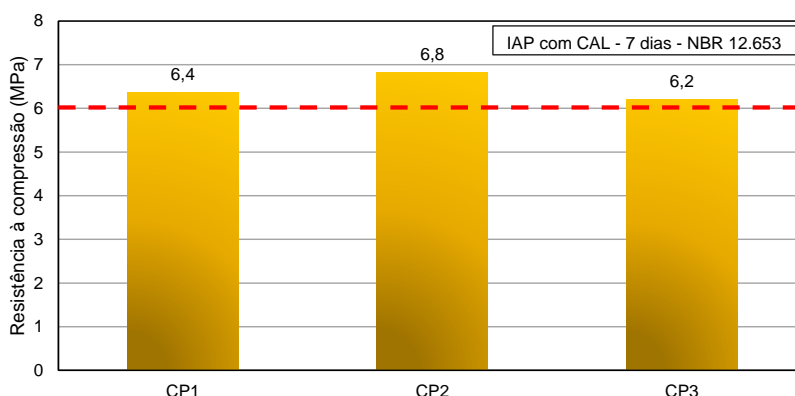


Figura 4.9 - Resultados do índice de atividade pozolânica (IAP) com cal.

Fonte: Font *et al.* (2020)

As amostras de Viveiros (2017) com resíduo de manganês da Serra de Buritirama não atingiram resistência igual ou superior a 6 MPa, caracterizando seu resíduo como não pozolânico.

#### 4.1.4.2 Atividade Pozolânica com cimento

Na figura 4.10 estão representados os resultados de resistência à compressão das duas argamassas confeccionadas como definido pela norma NBR 5752 (ABNT, 2014b). A argamassa de referência, identificada como Argamassa A atingiu 25,8 MPa enquanto a argamassa com substituição de resíduo de minério de manganês, identificada como Argamassa B, reduziu para a média de 15,6 MPa apresentando um índice de desempenho de 61%.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), para atender ao requisito físico de ser classificado como pozolânico, a amostra ensaiada com adição mineral deve possuir índice de desempenho maior ou igual a 90%. Com isso, a argamassa com adição mineral deveria atingir a resistência mínima de 23,2 MPa, o que não ocorreu. Portanto, por meio desta metodologia o material não é considerado pozolana.

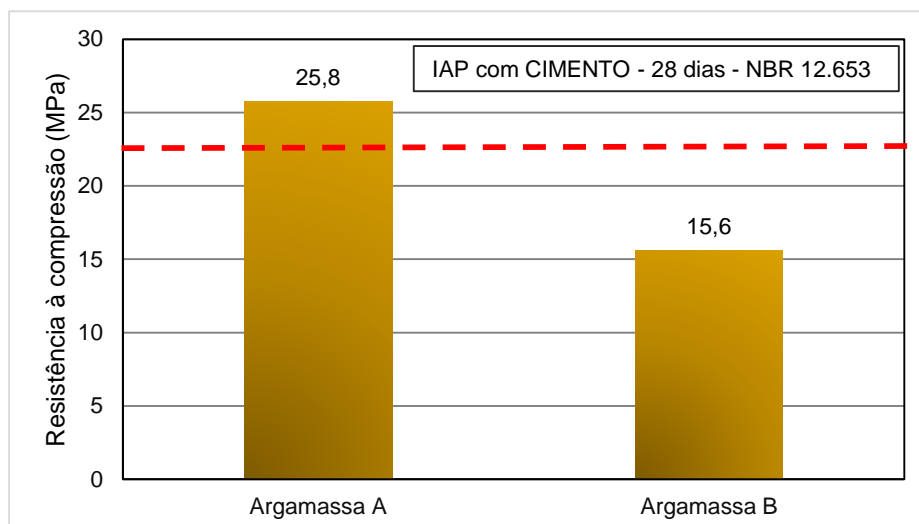


Figura 4.10 – Resultados do índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento.

Fonte: Font *et al.* (2020)

É possível que este comportamento tenha ocorrido pela incapacidade do material de suprir o decréscimo da resistência proveniente da substituição parcial do cimento como aponta Oliveira *et al.* (2012).

O resíduo de manganês da Serra de Buritirama caracterizado por Pimentel *et al.* (2022) tampouco atingiu a atividade pozolânica por meio dos ensaios preconizados pela norma com resultados aquém do mínimo estabelecido.

## 4.2 RESÍDUO DE MN COMO AGREGADO GRAÚDO NO CONCRETO

### 4.2.1 Estado fresco

Durante a confecção dos concretos, em cada substituição foram observados comportamentos diferentes como mudança na consistência do concreto em estado fresco por meio dos abatimentos e ocorreram algumas alterações como o uso do aditivo superplastificante - que já estava previsto na metodologia caso fosse necessário - e da adição de água em relação ao traço como pode ser visto na tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Adições necessárias durante confecção das misturas de concreto.

Amostras	Quantidades		
	Aditivo (ml)	Água (ml)	água/ligante final
CRef	-	-	0,53
C10Mn	13	-	0,53
C20Mn	34	-	0,53
C50Mn	34	1800	0,64
C100Mn	-	1650	0,63

Como um dos objetivos desta pesquisa é atingir o *Slump* de  $100\pm 10$  mm conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998), nas substituições de 10% e 20% foram adicionados apenas aditivos superplastificantes, na substituição de 50% aditivo e água e na mistura de 100% somente água modificando a relação água/ligante destes dois últimos.

Observou-se que quanto maior o percentual de substituição de AGN por resíduo de Mn, menor o abatimento, assim como ocorreu nas pesquisas de Santos (2011) ao utilizar cerâmica vermelha como substituição ao agregado gráudo natural e constatado por Zhao et al. (2021) ao estudarem as propriedades do concreto ao incorporar resíduos de minério de ferro.

Ao aumentar os teores de substituição, houve crescente demanda pelo uso do aditivo superplastificante, causando pouco efeito nas misturas, talvez pelo fato de ter sido adicionado em frações e diluído em água, por isso, optou-se também por aumentar o uso de água.

Segundo a pesquisa de Pelissari et al (2020), a água suplementar à quantidade prevista no traço, também pode ser uma opção válida a ser adotada de forma a compensar a absorção de água do concreto pelo agregado gráudo em estudo, que no caso de Pelissari et al (2020) foi o agregado gráudo reciclado, além da manutenção da trabalhabilidade.






Segue abaixo de modo detalhado todo o procedimento de concretagem das misturas:

1) CREF: Primeiramente foi colocado o agregado gráudo natural (AGN) na betoneira, em seguida areia, parte da água e o cimento, com pausas para retirar o material aderido nas paredes e pás da betoneira. Por fim, foi colocado o restante da água.

- 2) C10Mn: A confecção do concreto com 10% de resíduo de manganês iniciou com o AGN, acrescentando areia, parte da água, o resíduo e colocação do cimento e mais uma fração da água. Foram separados da água total prevista no traço 200ml (2,3%) para mistura do aditivo superplastificante e para serem colocados paulatinamente na mistura de acordo com as tentativas até alcançar o abatimento de  $100 \pm 10$  mm.
- 3) C20Mn: Mantendo os procedimentos do C10Mn de ordem de colocação dos materiais.
- 4) Concreto C50Mn: O resíduo de manganês como agregado graúdo foi homogeneizado com o seixo primeiramente na própria betoneira com parte da água, logo depois foi adicionada areia e em seguida o cimento com mais uma fração da água. Foram separados da água total 300ml (3,5%) para mistura do aditivo. Findada a quantidade de água prevista na dosagem e com utilização de quantidade considerável de aditivos sem atingir o abatimento, o concreto também se apresentava com aspecto seco e coeso. Adicionou-se água além da quantidade do traço (1800ml) até que o concreto apresentasse o abatimento dentro do intervalo especificado e melhor trabalhabilidade.
- 5) C100Mn: O seixo seguiu sendo o primeiro material a ser colocado na betoneira, porém nesta mistura o resíduo de manganês foi misturado à areia previamente e colocado na betoneira após o seixo. Parte da água foi adicionada e em seguida o cimento com o restante da água seguindo a relação água/ligante da dosagem. Não houve abatimento, então foram adicionadas mais três frações de água suplementares à mistura totalizando 1650ml ao atingir o *Slump* o que resultou no aumento da relação água/ligante de 0,53 para 0,63 e melhor envolvimento dos agregados graúdos pela argamassa.

Na tabela 4.9 estão demonstradas as substituições das misturas junto às imagens de cada amostra para visualização das tonalidades dos concretos.

Tabela 4.9 – Teores das substituições e imagens dos corpos de prova que correspondem aos concretos confeccionados.

Amostra	Imagem do CP
CREF	
C10Mn	
C20Mn	
C50Mn	
C100Mn	

## 4.2.2 Estado endurecido

### 4.2.2.1 Avaliação da resistência mecânica por compressão axial

A Tabela 4.10 mostra os resultados das rupturas axiais dos corpos de prova das misturas propostas aos 7 e 28 dias de idade.

Tabela 4.10 – Resultados das rupturas dos concretos com as misturas propostas aos 7 e 28 dias.

Amostra	Resistencia Média 7 dias (MPa)	D.P.	C.V. (%)	Resistencia Média 28 dias (MPa)	D.P.	C.V. (%)
CREF	18,48	1,24	7	26,32	3,28	12
C10Mn	15,28	0,65	4	21,18	0,95	4
C20Mn	12,77	0,71	6	19,23	1,08	6
C50Mn	26,93	0,21	1	34,64	0,31	1
C100Mn	14,98	3,09	21	18,52	1,97	11

D.P. – desvio padrão

C.V. – coeficiente de variação

A figura 4.11 apresenta as médias de rupturas axiais dos concretos de referência com os concretos confeccionados com as substituições parciais de agregado gráudo por resíduo de manganês.

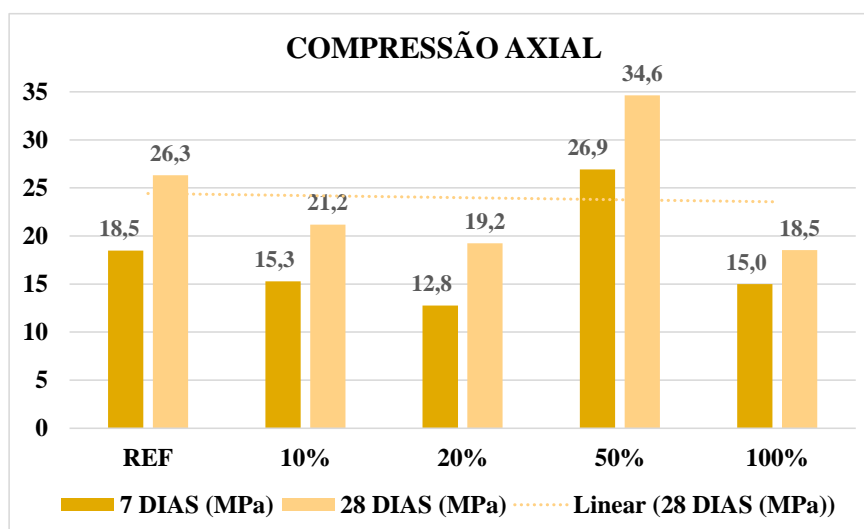


Figura 4.11 - Resultados das rupturas axiais aos 7 e 28 dias de cada substituição com curva de tendência.

O concreto C50Mn foi o que obteve melhor resultado entre todas as misturas propostas no ensaio de compressão axial para os 7 e 28 dias, seguida pelo concreto de

referência com diferença de 31% aos 7 dias e 24% na resistência aos 28 dias. Este comportamento pode estar relacionado ao aumento do resíduo com a presença de finos que envolvem os grãos do agregado graúdo, já que o material está in natura. Estas partículas finas, por serem em maior quantidade devido a substituição podem ter provocado um empacotamento granular na matriz, que reduziu a porosidade inicial da pasta e os vazios das amostras (CYR;LAWRENCE;RINGOT,2006 apud PIMENTEL *et al.*, 2020).

As misturas C20Mn e C100Mn apresentaram comportamento de resistência inferior às restantes. A substituição C20Mn apresentou o menor resultado para resistência por compressão axial aos 7 dias, 30% menor em relação ao CREF e a C100Mn o menor resultado para resistência por compressão axial aos 28 dias com 30% de redução em comparação ao CREF, aproximadamente. Os dados foram semelhantes entre si, com diferença de, aproximadamente, 15% aos 7 dias e 4% aos 28 dias, embora na primeira tenha sido adicionado somente aditivo superplastificante e na última somente água alterando sua relação água/ligante para 0,63, portanto considera-se que seus comportamentos também foram semelhantes.

O C100Mn teve uma redução significativa da resistência possivelmente pelo fato da presença de pequenos ouriços de agregados miúdos do resíduo, por estar em maior quantidade, como também pelo aumento da absorção de água e da relação água/ligante para obtenção de maior trabalhabilidade fator ligado diretamente à diminuição da resistência dos CP's, pois nesse caso pode-se dizer que o excedente de água não é totalmente consumido nas reações de hidratação, evaporando posteriormente e deixando vazios que permanecem no concreto depois de seu endurecimento.

Seu coeficiente de variação também foi o maior dentre as outras misturas, esse comportamento pode ter relação com a falta da homogeneização do resíduo como agregado graúdo, a sua forma que consequentemente influenciou o arranjo dentro da argamassa e a taxa de absorção de água (SANTOS, 2011), que dificultou seu adensamento e possivelmente causou zonas de fragilidade.

Nos concretos C10Mn e C20Mn pode haver vazios remanescentes decorrentes do ar presente por falhas no adensamento dos corpos de prova.

Observa-se que, aos 28 dias, somente o C100Mn não atingiu os 20MPa exigidos nos ensaios de compressão pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para confecção de



estruturas com armadura passiva. Aos 7 dias o C50Mn foi o único concreto que ultrapassou o valor mínimo.

Analisando os resultados as substituições que obtiveram adições sejam somente de água, ou somente de aditivo superplastificante com o intuito de alcançar o ensaio de consistência de  $100 \pm 10$  mm atingiram resultados menores ao CREF e com comportamentos similares, porém o C50Mn que utilizou de forma combinada a utilização de água mais aditivo, apresentou incremento nos resultados de compressão axial para as duas idades de 7 e 28 dias em comparação às outras substituições principalmente em relação aos dados obtidos pelo CREF.

Frotté et al. (2017) obtiveram resultados positivos com a taxa de substituição de 50% de agregado natural por agregado reciclado no concreto, foi a amostra que perdeu menos resistência à compressão axial, ou seja, entre as substituições analisadas foi a que obteve maior resistência, exceto em relação ao CREF. Tal fato é atribuído a disponibilidade da água antes absorvida pelos agregados reciclados que, com o passar do tempo de mistura, hidratou partículas remanescentes de cimento que não haviam sido hidratadas anteriormente.

Antes da combinação de adições de superplastificante e água no C50Mn foi confeccionado o C50Mn somente com aditivo seguindo a metodologia das misturas anteriores. Entretanto devido a percepção visível de que a mistura do concreto demandava por mais água além do superplastificante, optou-se por fazer a mistura com ambas as adições no qual foram apresentados os dados de resistência mecânica anteriormente.

Por outro lado, o manganês, por se tratar de um material ainda em estudo na construção civil, também foi avaliado em uma terceira mistura de substituição de 50% de resíduo somente com água para observar seus comportamentos e poder verificar em qual dessas seria atingido o ensaio de consistência *Slump test* de modo mais efetivo além dos resultados no estado de concreto endurecido.

Dessa forma, na Tabela 4.11 e na figura 4.12, estão apresentados estes resultados complementares ao lado dos dados do CREF para comparação. Ressalta-se que os dados adotados para a análise da pesquisa de modo geral foi o C50Mn com superplastificante e água devido aos seus resultados satisfatórios. Cada concreto com substituição de 50% de agregado graúdo (C50Mn) com sua respectiva adição está

identificado da seguinte maneira e com os seguintes sufixos: a) somente água (C50Mn (A)); e água e aditivo superplastificante (C50Mn (A+S)).

Tabela 4.11 – Resultados das rupturas axiais dos concretos com as misturas propostas aos 7 e 28 dias das variações de C50Mn.

Amostra	Resistencia Média 7 dias (MPa)	D.P.	C.V. (%)	Resistencia Média 28 dias (MPa)	D.P.	C.V. (%)
REF	18,48	1,24	7	26,32	3,28	12
C50Mn (A+S)	26,93	0,21	1	34,64	0,31	1
C50Mn (A)	20,82	2,60	13	22,73	8,30	37

D.P. – desvio padrão

C.V. – coeficiente de variação

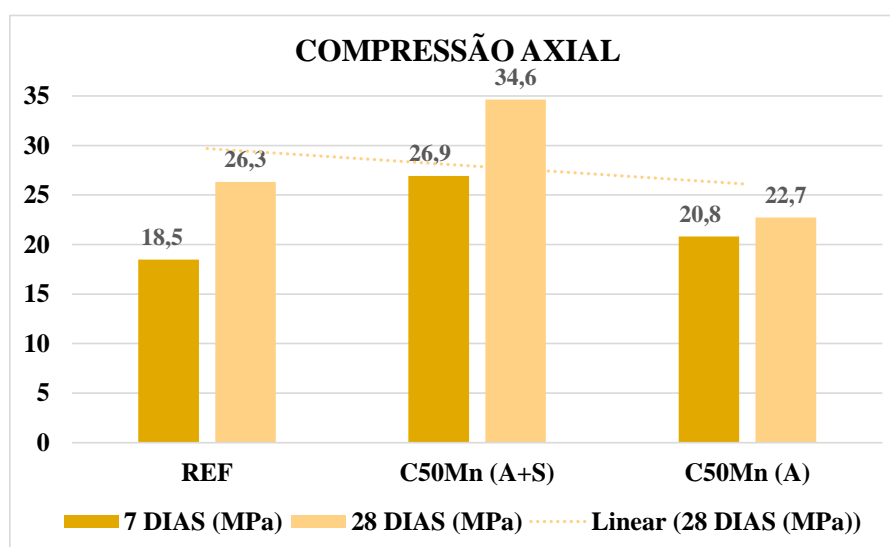


Figura 4.12 - Resultados das rupturas axiais dos concretos com as misturas propostas aos 7 e 28 dias das variações de C50Mn com curva de tendência.

O uso do aditivo superplastificante junto à água mostrou-se uma alternativa adequada para o emprego em concretos contendo resíduo de manganês, principalmente no caso do concreto C50Mn. Assim como na pesquisa de PELISSARI et al. (2020), com o uso do aditivo, houve melhoria na fluidez do concreto devido à formulação química do aditivo assim como ao seu mecanismo de ação dispersante que funcionaram em conjunto com a água no C50Mn, atuando na redução de vazios que permanecerão até o estado endurecido, ao adensar os corpos de prova para alcançar a consistência desejada.

#### 4.2.2.2 Avaliação da resistência mecânica por compressão diametral

A Tabela 4.12 mostra os resultados das rupturas diametraais dos corpos de prova das misturas propostas aos 7 e 28 dias de idade

Tabela 4.12 – Resultados das rupturas dos concretos com as misturas propostas aos 7 e 28 dias.

Amostra	Resistencia Média 7 dias (MPa)	D.P.	C.V.	Resistencia Média 28 dias (MPa)	D.P.	C.V.
CREF	9,26	0,85	9	12,84	1,56	12
C10Mn	6,97	1,19	17	10,35	0,73	7
C20Mn	6,67	0,98	15	8,23	1,81	22
C50Mn	10,76	2,10	19	12,63	0,33	3
C100Mn	9,46	2,78	29	10,99	1,43	13

D.P. – desvio padrão

C.V. – coeficiente de variação

A figura 4.13 apresenta as médias de rupturas diametraais dos concretos de referência com os concretos confeccionados com as substituições parciais de agregado graúdo por resíduo de manganês.

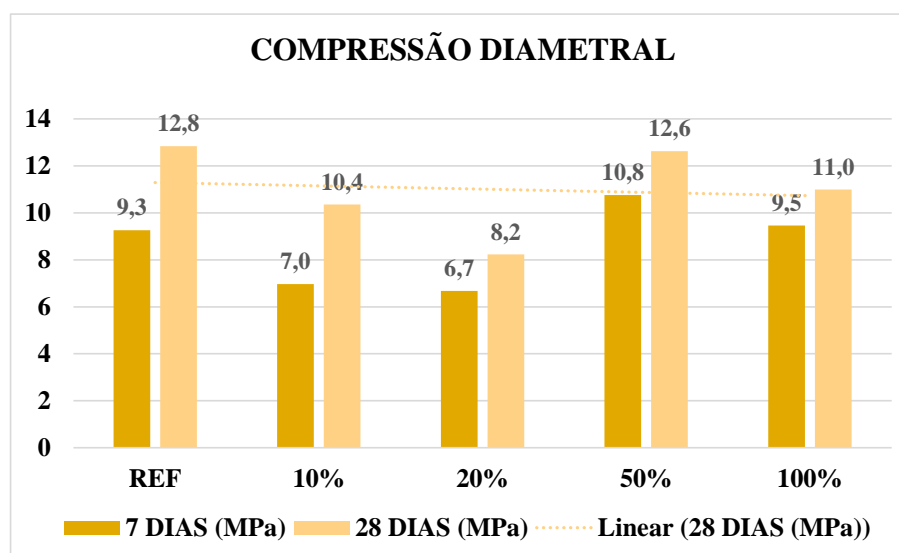


Figura 4.13 - Resultados das rupturas diametraais aos 7 e 28 dias em cada substituição com curva de tendência.

O concreto C50Mn apresentou comportamento mecânico aos 7 dias superior ao CREF e a todas as substituições. O CREF vem em seguida como melhor resultado aos 7 dias com decréscimo de 13,94% em relação ao C50Mn e obteve o melhor resultado de resistência mecânica diametral aos 28 dias em relação aos outros concretos, assemelhando-se ao resultado do C50Mn com diferença de apenas 1,63%.

O C100Mn obteve a terceira maior resistência a compressão diametral com seu resultado de 7 dias ultrapassando o valor do CREF em 2,11%. Seu resultado aos 28 dias assemelha-se ao C10Mn que apresentou decréscimo de 5,82%. E o C10Mn apresentou comportamento similar ao C20Mn na idade de 7 dias, sendo estes dois os menores resultados do ensaio de resistência mecânica diametral.

Observou-se que em relação a resistência diametral não houve variação significativa dos concretos quando comparados com o CREF e o C50Mn que foram os que apresentaram os melhores comportamentos.

Os coeficientes de variação em relação aos 7 dias aumentaram de acordo com quantidade de substituição sendo o C100Mn, assim como nos resultados de compressão axial, o que apresentou o maior coeficiente de variação. Aos 28 dias não foi identificado um padrão de coeficiente com a substituição de resíduo, o que pode ser resultado talvez do manuseio e preparo dos corpos de prova para a ruptura. Entretanto, aos 28 dias, o maior coeficiente de variação foi o do C20Mn com 22% e também foi o concreto que apresentou menor resultado nesta idade com resistência de 8,23MPa.

Contudo, mesmo com a diminuição dos dados de resistência mecânica das amostras com substituições, o peneiramento prévio realizado na preparação do resíduo contribuiu para a redução de fatores que poderiam ser responsáveis por resultados insatisfatórios, pois eliminou finos excedentes da amostra in natura do manganês. E, como afirma Pelissari et al. (2020), apesar da dificuldade na trabalhabilidade e para atingir o abatimento previsto, o peneiramento melhora a qualidade do agregado podendo trazer resultados satisfatórios quando utilizado em conjunto com outras técnicas como, por exemplo, o uso de aditivos químicos.

No que diz respeito ao C50Mn, como dito no item anterior, também foram realizados os ensaios de compressão diametral dos corpos de prova com as diferentes adições. Na tabela 4.13 e figura 4.14 seguem os resultados alternativos das duas variações realizadas com substituição de C50Mn: a) somente água (C50MN (A)); e água e aditivo superplastificante (C50MN (A+S)), sendo este último o resultado adotado para a pesquisa.

Tabela 4.13 – Resultados das rupturas diametrais dos concretos com as misturas propostas aos 7 e 28 dias das variações de C50Mn.

Amostra	Resistencia Média 7 dias (MPa)	D.P.	C.V. (%)	Resistencia Média 28 dias (MPa)	D.P.	C.V. (%)
REF	9,26	0,85	9	12,84	1,56	12
C50Mn (A+S)	10,76	2,10	19	12,63	0,33	3
C50Mn (A)	7,71	1,81	23	12,28	2,96	24

D.P. – desvio padrão

C.V. – coeficiente de variação

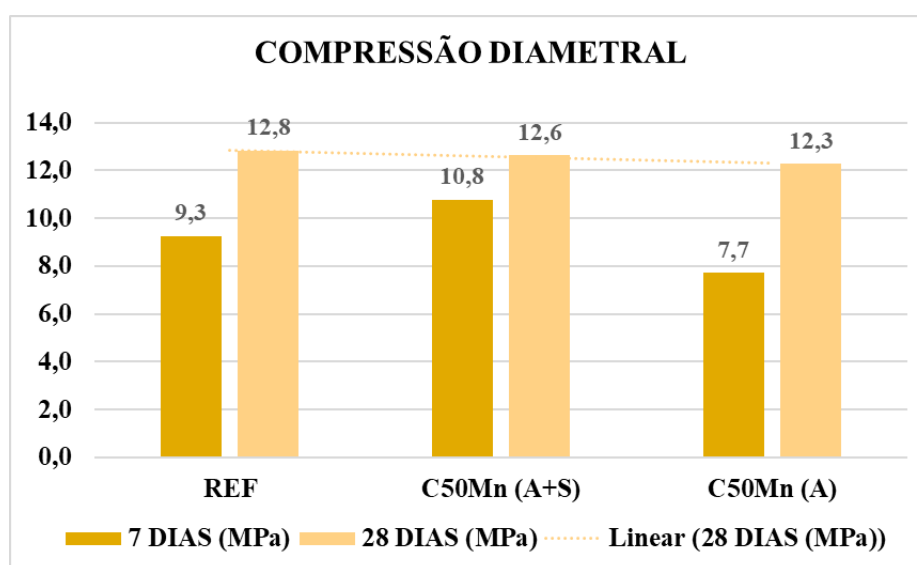


Figura 4.14 – Resultados das rupturas diametrais dos concretos com as misturas propostas aos 7 e 28 dias das variações de C50Mn com curva de tendência.

O C50Mn (A) apresentou resultados semelhantes ao CREF e ao C50Mn (A+S) para compressão diametral aos 28 dias, todavia aos 7 dias houve uma diminuição de sua resistência de aproximadamente 17% comparada ao CREF, apresentando menor resultado das misturas. Também, seu coeficiente de variação foi o maior em ambas as idades como apresentado na Tabela 4.13.

A partir da obtenção dos resultados de resistência mecânica dessas variações, o C50Mn (A+S) foi o que apresentou melhores resultados tanto para compressão diametral quanto para axial e demonstrado isso, foram os dados adotados para comparação com as outras misturas de concreto com substituição de resíduo de minério de manganês.

Durante a pesquisa duas amostras da substituição de C10Mn ficaram expostas às variações de condições climáticas pelo período de, aproximadamente, 35 meses (1050 dias) por conta da pandemia de COVID-19 em que as universidades e laboratórios de pesquisa suspenderam suas atividades. Estes dois CP's foram separados para continuação de ensaio de absorção de água por imersão fora do laboratório naquele período e em seguida foram colocados juntos em uma área externa.

Devido o tempo de exposição das amostras decidiu-se obter dados de durabilidade para enriquecer a quantidade de informações acerca do material em estudo. Entretanto, pelo fato do objetivo da pesquisa, em seu início, não ser analisar tais patologias, as substituições restantes não passaram pela mesma análise, assim como as amostras de 10% foram avaliadas pontualmente, em relação à sua resistência, apenas no dia 1050, e à sua durabilidade por meio da verificação de carbonatação que poderá ser visualizada mais a frente. Desta forma, os dois CP's primeiramente foram rompidos no sentido diametral com os resultados a seguir:

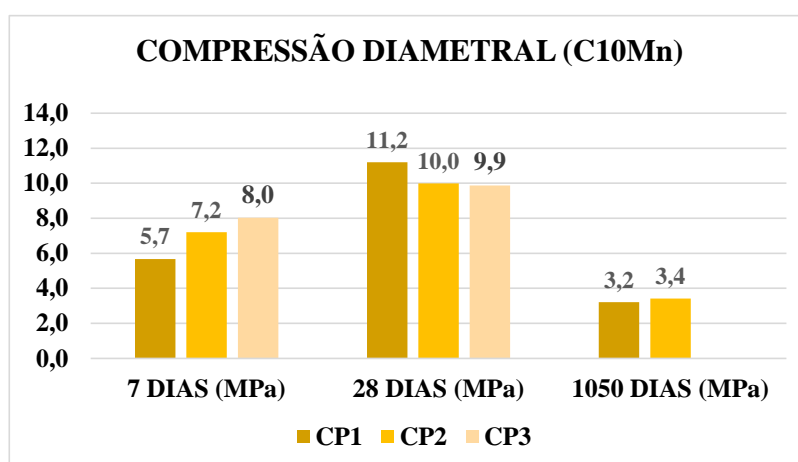


Figura 4.15 – Resultados das rupturas diametrais dos concretos C10Mn que ficaram expostos durante 1050 dias às intempéries.

Para efeitos de comparação na figura 4.15 juntou-se os resultados das amostras de C10Mn que foram rompidas nas idades de 7 e 28 dias. Foi identificada uma redução significativa de resistência dos CP's que foram rompidos posteriormente, aos 1050 dias. Fato que pode ser justificado talvez pela porosidade do concreto, pelo seu tempo de exposição ao sol e chuva, mas importante frisar que este último ensaio de resistência nas amostras de 10% foi realizado em laboratório diferente do que das outras substituições. Parte deste resultado pode ter ocorrido pelo manuseio do corpo de prova pelo

laboratorista para realização do ensaio, pelo fato do CP já ter sido utilizado para ensaio de absorção de água em outro momento e também pelo próprio tempo de exposição.

#### 4.2.2.3 Avaliação do módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade que reflete a relação tensão-deformação é vital na análise da estrutura de concreto. Os valores de módulo de elasticidade do concreto estimados foram obtidos a partir da expressão abaixo disponibilizada pela NBR 6118 (2014) e seus resultados podem ser verificados na Figura 4.16.

$$E_{ci} = 5600 \sqrt{f_{ck}}$$

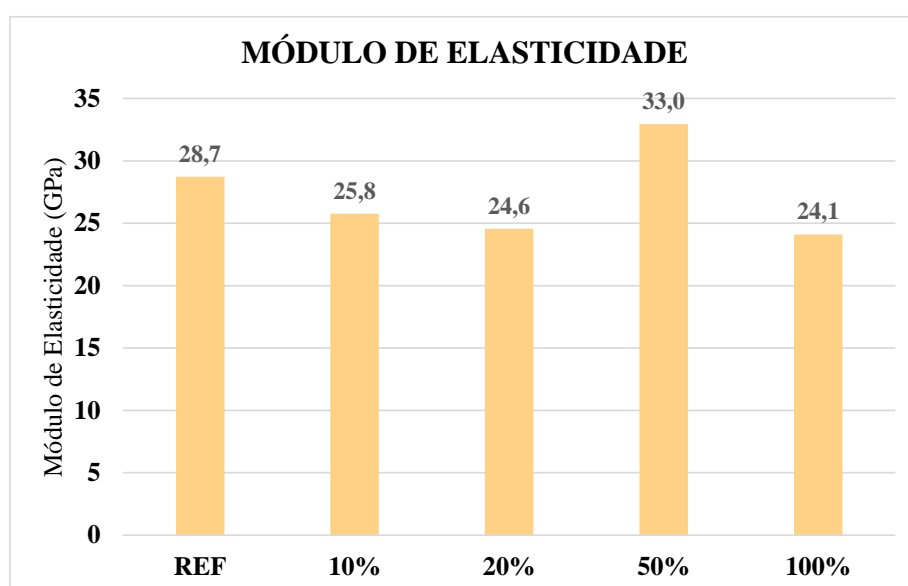


Figura 4.16 – Módulo de elasticidade estimados dos concretos com substituição parcial do AGN por resíduo de Mn segundo NBR 6118 (2014). Valores expressados a partir das médias.

Para os resultados de módulo de elasticidade obtidos em função da resistência à compressão de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), os comportamentos são semelhantes, destacando-se o C50Mn a mistura com maior resultado e CREF, sendo o restante das substituições apresentando resultados próximos, porém abaixo do CREF.

O módulo de elasticidade também foi calculado seguindo a fórmula da Eurocode 2: EN 1992-1-1 (2004) abaixo em que seus resultados podem ser observados na figura 4.17.

$$E_{cm} = 22 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$$

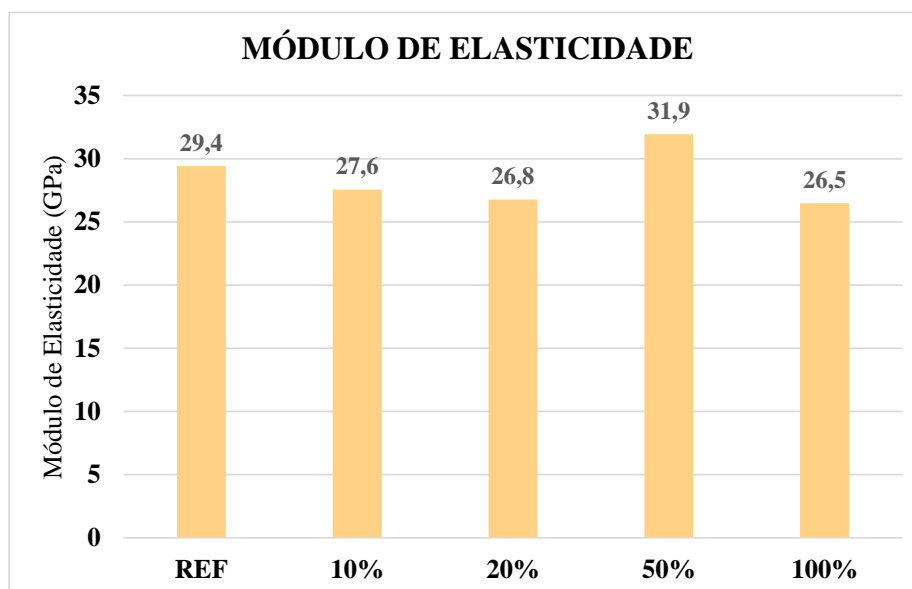


Figura 4.17 – Módulo de elasticidade dos concretos com substituição parcial do AGN por resíduo de Mn aos 28 dias segundo EN 1992-1-1 (EUROCODE 2, 2004). Valores expressados a partir das médias.

Para comparação, segue abaixo, na Tabela 4.14, os dados dos resultados das fórmulas em função da resistência para módulo de elasticidade das normas brasileira e europeia, respectivamente.

Tabela 4.14 – Resultados dos módulos de elasticidade das misturas de concreto.

Amostra	Módulo de Elasticidade	Módulo de Elasticidade
	NBR 6118:2014 (GPa)	EN 1992-1-1:2004 (GPa)
CREF	28,73	29,41
C10Mn	25,77	27,55
C20Mn	24,56	26,77
C50Mn	32,96	31,94
C100Mn	26,70	26,47

Ao realizar a comparação dos dados obtidos pela norma brasileira com os da norma Europeia, observa-se que os resultados desta última são um pouco maiores que os encontrados por meio da NBR 6118 (ABNT, 2014), variando entre 2,3% e 8,9% entre cada substituição.



Para complementar estes dados, mais testes laboratoriais devem ser feitos para explorar o efeito do resíduo de Mn no módulo de elasticidade do concreto.

#### 4.2.2.4 Avaliação a absorção de água no concreto

Para todas as substituições de agregado graúdo natural por resíduo de manganês foram realizados os ensaios de absorção de água por imersão como prescreve a NBR 9778 (ABNT, 2009).

As figuras 4.18 e 4.19 ilustram, os resultados médios do ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios, respectivamente:

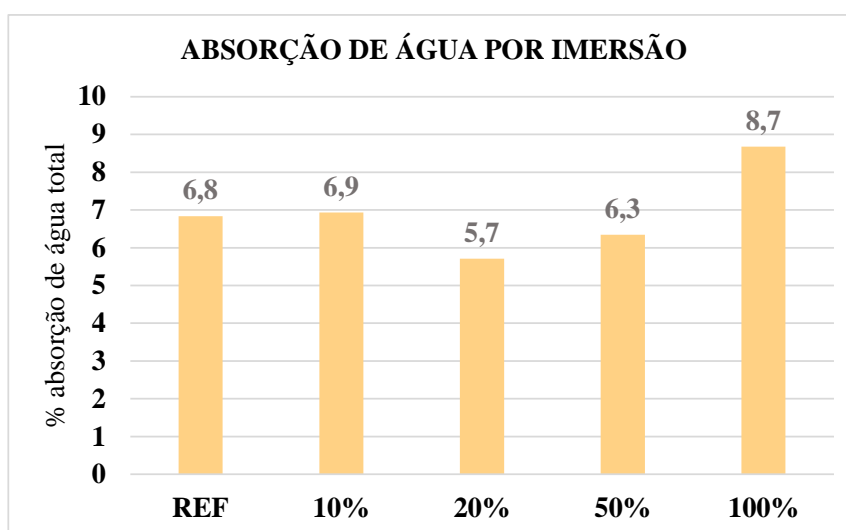


Figura 4.18 – Resultados médios da absorção de água por imersão.

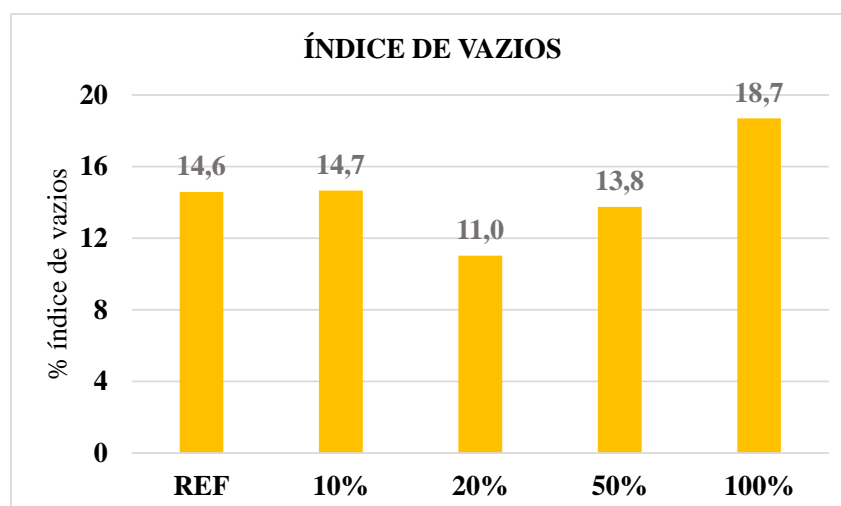


Figura 4.19 – Resultados médios do índice de vazios.

Ao analisar os resultados de absorção de água por imersão, verifica-se que os resultados do concreto de referência e o C10Mn são semelhantes, o que também ocorreu nos resultados de índice de vazios.

O concreto de 20% de substituição foi o que apresentou os melhores resultados para ambas as análises seguido do C50Mn com resultado próximo também ao CREF. Para os dados do concreto com a proporção de 20% de resíduo de manganês o melhor empacotamento dos materiais na pasta pode ter ocasionado este resultado positivo, por isso a menor absorção de água e índice de vazios.

Silva Junior (2019), ao avaliar a absorção por imersão do concreto e o índice de vazios com e sem resíduo de manganês, observou que os concretos apresentaram resultados iguais pelo possível preenchimento de parte dos vazios da pasta de cimento.

Viveiros (2017) e Pimentel et al. (2022) relataram, ao realizar o ensaio de absorção por capilaridade e por imersão, respectivamente, terem obtido valores de absorção do concreto com resíduo de manganês inferiores ao de referência, relacionadas aos finos do grão de manganês.

O concreto sem agregados naturais (C100Mn) e com 100% de resíduo de minério como agregado graúdo apresentou tanto a maior absorção de água como índice de vazios. Em relação ao C100Mn estes resultados obtidos podem se dar pela razão do aumento da relação água/ligante que o resíduo demandou no momento da confecção dos concretos, formando um concreto mais poroso.

Quando substituiu parte do agregado miúdo natural por resíduo de magnético, Mendes (2016) também verificou que quando a relação água/ligante permaneceu fixa, a absorção de água entre os concretos com resíduo de magnetita e o de referência se manteve igual. Entretanto, ao aumentar a relação água/ligante, a absorção de água também aumentou.

Dito isso, é possível que o manganês possa colmatar parte dos vazios da pasta de cimento, uma vez que ao aumentar a relação água/ligante esperava-se que os valores de absorção de água dos concretos com resíduo de manganês fossem superiores ao concreto de referência, já que o aumento da relação água/ligante influencia na formação de estruturas mais porosas, fato ocorrido de forma mais significativa no concreto C100Mn.

#### 4.2.2.5 Carbonatação

Como dito no item 4.2.2.2, por esta pesquisa ter atravessado a COVID-19, dois exemplares da substituição de 10% ficaram expostos às intempéries por aproximadamente 1050 dias (35 meses) após realização de ensaio de absorção de água por imersão. Optou-se por avaliar qual foi a carbonatação nestas duas amostras como dado complementar à pesquisa.

Os corpos de prova utilizados foram cilíndricos de dimensões 10x20cm (largura, altura), mesmo padrão adotado durante toda a pesquisa. Por se tratar de um ensaio não previsto no escopo deste trabalho e, também pela disponibilidade de apenas 2 amostras, a medição da espessura de carbonatação foi realizada somente na data de rompimento do corpo de prova (1050 dias). O ensaio não foi realizado em outras idades conforme recomenda a ISO 1920-12 (2015 *apud* MACHADO, 2022) e Ribeiro *et al.* (2021, *apud* MACHADO, 2022) e tampouco em outras substituições.

Nas quatro metades dos corpos de provas que foram submetidos anteriormente ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, foi pulverizada uma fina névoa, por borrifador manual, do indicador fenolftaleína. Após a aplicação e o contato da solução com a amostra, esperou-se sua secagem para firmar a coloração e poder identificar a área carbonatada (sem cor;  $\text{pH} < 8,5$ ) da área não carbonatada (rosa carmesim;  $\text{pH} > 8,5$ ) conforme figura 4.20.



Figura 4.20 – Amostras após aspersão do indicador fenolftaleína.

As leituras da profundidade de carbonatação foram realizadas após 24h de sua aspersão (HASPARYK, 2005) utilizando-se um paquímetro (figura 4.21) em cinco pontos equidistantes aproximadamente em cada lado da seção. O resultado é a média de 10 medições individuais (em milímetros) de cada metade analisada (MACHADO, 2022). Os resultados das medições estão registrados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Resultados da leitura de profundidade de carbonatação do C10Mn

Amostra	Metade	Medida lateral (mm)	Medida superior (mm)	Medida inferior (mm)
CP1 C10Mn	1ª metade	15,58	18,5	4
	2ª metade	15,88	16	4
CP2 C10Mn	1ª metade	16	14	8
	2ª metade	15	14	7

Não foram observadas grandes variações entre as amostras tanto na face externa lateral do corpo de prova cilíndrico quanto na face superior. Na base inferior houve maior diferença de medidas entre os dois CP's sendo 4mm no CP1 e média de 7,5mm no CP2.

Para Hasparyk (2005), valores de carbonatação inferiores a 20mm de profundidade são considerados baixos e como verificado na Tabela 4.14 nenhuma medida dos CP's ultrapassou esta marca.



Figura 4.21 – Medições com paquímetro.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 CONCLUSÕES

O objetivo geral desta pesquisa, corroborada pelo seu título, foi estudar o aproveitamento do resíduo de manganês como material de construção civil e, de acordo com os resultados, pode-se concluir que os concretos produzidos com resíduo de manganês obtiveram resultados satisfatórios, sendo possível sua aplicação na indústria da construção civil.

Em sua caracterização química a soma de seus teores médios de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  encontrados nas amostras de resíduo de Mn foi de 58,27%, valor em conformidade a um requisito químico da NBR 12653 (ABNT, 2014). Entretanto os outros requisitos não foram analisados nesta pesquisa. A reação álcali-agregado demonstrou que o manganês foi classificado como potencialmente inócuo, pois apresentou expansão de 0,135%, inferior ao limite de 0,19% determinado pela norma.

Por meio da avaliação de atividade pozolânica com cal aos sete dias o ensaio atendeu o mínimo de 6 MPa exigido pela norma para atender um dos requisitos físicos, com resultados que ultrapassaram cerca de 7,5%. Entretanto quando submetido ao ensaio de atividade pozolânica com cimento a argamassa com substituição do cimento por manganês atingiu somente 61% de índice de desempenho, não alcançando os 90% estipulados pela NBR. Desta forma, os dados obtidos indicam que esta questão precisa ser mais bem investigada para obter constatações mais efetivas, pois algumas exigências da norma brasileira são atendidas como as da NBR 5751 (ABNT, 2015) e NBR 12653 (ABNT, 2014a) enquanto para outras não, como ocorreu com a NBR 5752 (ABNT, 2014b).

Ao desenvolver os concretos pode-se concluir que juntamente aos resultados de absorção de água e da literatura apresentada, o resíduo demanda por maior utilização de água suplementar ao traço, fato que para atender a trabalhabilidade de  $100 \pm 10\text{mm}$  foi inevitável, alterando a relação à água/ligante quando o teor de substituição aumentou nos concretos C50Mn e C100Mn.

Quanto às suas resistências mecânicas, a redução dos valores de compressão de C10Mn, C20Mn e C100Mn pode ser justificada pela redução da trabalhabilidade dos

concretos devido à maior absorção de água de acordo com o aumento das substituições, entretanto o peneiramento prévio do resíduo, ao eliminar seus finos, melhorou a qualidade do resíduo de minério de manganês e pode ter contribuído na redução da possibilidade de resultados insatisfatórios.

Por haver a necessidade de adição de água além da quantidade prevista no traço, caracterizado pela elevada taxa de absorção de água do resíduo, este foi um dos fatores determinantes na redução do valor de resistência à compressão do C100Mn. Entretanto o concreto que apresentou menores valores de resistência à compressão diametral para ambas as idades foi o C20Mn.

Os concretos que foram utilizados aditivos químicos como o C10Mn e C20Mn obtiveram valores semelhantes ao C100Mn, que utilizou somente água suplementar ao traço. O resultado registrado para o C50Mn em que foi utilizado água e superplastificante obteve destaque na pesquisa ultrapassando valores de CREF.

O decréscimo dos valores de resistência dos concretos com substituição comparados ao CREF, exceto o C50Mn, pode ser atribuído às características inerentes ao resíduo de minério de manganês como agregado utilizado nas misturas, por se tratar de um material com maior porosidade, com a possível formação de espaços vazios na zona de transição. Contudo há ressalvas em afirmar que a queda de resistência se deu em função de uma ou outra variável pois houve falta de padronização na mistura dos materiais na confecção dos concretos, na homogeneização, assim como variações de relação água/ligante e teor de resíduo, sendo estes últimos fatores também identificados na pesquisa de Silva Junior (2019).

No ensaio de módulo de elasticidade, apesar do comportamento similar, houve redução dos resultados nos concretos onde houve substituição, com exceção do C50Mn que apresentou dados positivos e acima dos valores do CREF.

Na análise de absorção de água por imersão, a amostra de 20% foi a que menos absorveu água. As amostras de 10% e 50% apresentaram resultados muito próximos e a amostra com 100% a que mais absorveu água por imersão dentre as restantes, incluindo o CREF.

Ao avaliar a carbonatação em duas amostras de C10Mn aos seus 1050 dias, os valores de medição de profundidade das amostras foram abaixo de 20mm o que é considerado baixo. Assim o concreto com 10% de resíduo de manganês como agregado

gráudo demonstrou boa durabilidade à carbonatação, entretanto sem a comparação com um concreto convencional.

Face ao exposto, a utilização do manganês como material da construção em substituição ao agregado gráudo torna-se viável por ter apresentado valores que atendem o requisito da NBR 6118 (ABNT, 2014) de serem iguais ou superiores a 20MPa na compressão axial para serem classificados como concretos estruturais.

Ressalta-se que as conclusões anteriores se referem a uma metodologia específica para experimentação do material nesta dissertação e, pelo fato do manganês, principalmente de Serra do Navio, ainda ser um material em estudo para a aplicação na indústria da construção civil, existe a necessidade de pesquisas complementares como substituição ao agregado gráudo, para adição de dados e maior representatividade dos resultados.

## 5.2 SUGESTÕES

O resíduo é um produto variável, então sugere-se estudos de mais amostras para resultados mais consistentes e válidos para sua utilização em larga escala.

Por se tratar de um material relativamente novo nas pesquisas para aplicabilidade na construção, onde há estudos mais disseminados neste tema, mas com outros resíduos de minério, o comportamento do resíduo manganês como agregado gráudo ainda possui um amplo de espaço para futuros estudos e análises como forma de conhecer e entender melhor o próprio material, assim como, as propriedades específicas que também o diferenciam do local coletado.

Por serem necessárias as modificações de relação água/ligante e aditivos plastificantes pelas percepções de mudança de comportamento do resíduo junto ao concreto principalmente no estado fresco, sugere-se estudos em relação à diferença de comportamento com adições de água, aditivos assim como ambos utilizados concomitantemente a depender da substituição de agregado gráudo desejada.

Neste trabalho optou-se por utilizar o resíduo de manganês *in natura*, apenas secando de maneira natural, com a intenção de otimizar o processo de coleta do material até sua utilização no concreto, de forma a retirar e diminuir a quantidade de resíduos dispostas no meio ambiente e que estão sem utilização atualmente. Também, a pesquisa

obtendo resultados satisfatórios, caso futuramente fosse aplicada em grande escala, esta etapa otimizada contribuiria para a consideração de um maior número indústrias para a utilização do resíduo como material na construção civil.

Entretanto, de certa forma, percebe-se que o aprofundamento de estudos relacionados a preparação da amostra do resíduo de manganês, como a pré-saturação, sugerida por PELISSARI et al. (2020) para agregados reciclados e Santos (2011) para uso de resíduos da indústria de cerâmica vermelha, devam ser considerados para compensar o efeito da absorção de água e para um aumento dos resultados de resistência e durabilidade, mesmo obtendo resultados satisfatórios na pesquisa , principalmente com o concreto C50Mn.

Por haver divergências entre os ensaios de atividade pozolânica com cal e cimento, a dificuldade de manuseio dos corpos de prova de cada ensaio, devido a umidade retida nas amostras e se tornando um material pulverulento, além de terem sido analisados apenas alguns requisitos químicos e físicos referentes à norma NBR 12653 (ABNT, 2014), sugere-se para entendimento do material estudado, estudos futuros analisando os requisitos químicos e físicos preconizados pela norma em sua totalidade para análise de sua atividade pozolânica, como sua investigação no ensaio Chapelle modificado.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária**. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão “Los Ángeles”**. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica IAP com cal aos sete dias**. , 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, 2014b.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

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

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.** ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e Concreto Endurecido - Determinação de absorção de água, índices de vazios e massa específica.pdf.** Rio de Janeiro, 2009b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais pozolânicos — Requisitos.pdf.** Rio de Janeiro, 2014a.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland— Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577- 1: Agregados-Reatividade álcali-agregado Parte1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.** Rio de Janeiro, 2018c.

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, 2018b.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018a.

AFONSO, J. C. Manganês no Brasil: Descoberta, Extração, Consumo E Comercialização numa perspectiva histórica. **Quim. Nova**, v. 42, n. 10, p. 1172–1183, 2019.

ALLWOOD, J. M. **Sustainable Materials - with both eyes open.** The Future in Practice: The State of Sustainability Leadership. University of Cambridge Ltd, p. 3, 2012.

ALLWOOD, J. M. et al. Material efficiency: Providing material services with less material production. **Philosophical Transactions of the Royal Society A:**

**Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 371, n. 1986, 2013.

ALMEIDA, A. B. DE. **Caracterização químico-mineralógica de minérios de manganês**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

ANTONIASSI, J. L. **A Difração de Raios x com o Método de Rietveld aplicada a bauxitas de Porto Trombetas, PA**. [s.l.: s.n.].

ARAUJO, F. S. D. et al. **Levantamento Histórico de Processos Minerários de Manganês**. XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, n. Outubro, p. 1499–1506, 2017.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 1ª ed. São Paulo: Cengage, 2008.

BALLARI, S. O. et al. **Replacement of coarse aggregates by industrial slag**. Materials Today: Proceedings, 2023.

BRASIL. **Departamento Nacional de Produção Mineral: Manganês**. n. 91, p. 117–128, 2008.

BRASIL. **Produto 11: Minério de manganês**. In: Consultor. Luiz Felipe Quaresma. Projeto De Assistência Técnica Ao Setor De Energia. Relatório Técnico 19, P. Da Mineração De Manganês (Ed.). **Ministério de Minas e Energia**. [s.l.] Ministério de Minas e Energia., 2009. p. 40.

BRASIL. **Departamento Nacional de Produção Mineral. Anuário Mineral Brasileira: Principais Substâncias Metálicas**. Brasília: DNPM, 2018.

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente: Etapas do licenciamento - PNLA - Portal Nacional de Licenciamento Ambiental**. Disponível em: <<https://pnla.mma.gov.br/etapas-do-licenciamento>>. Acesso em: 18 abr. 2023.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS - UMA INTRODUÇÃO**. 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020. v. 135

CARIOCA, A. C.; ANDRADE, E. M.; BRANDÃO, P. G. R. **Caracterização físico-mineralógica de minérios de manganes**. XXIV ENTMME - Salvador/Bahia, p. 608–616, 2011.

CASTRO, C. **Estudo do aproveitamento de rejeitos do beneficiamento do manganês pela indústria cerâmica**. [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2011.

COELHO, M. C. N. et al. **Regiões Econômicas Mínero-Metalúrgicas E Os Riscos De Desastres Ambientais Das Barragens De Rejeito No Brasil**. Revista da Anpege, v. 13, n. 20, p. 83–108, 2017.

COSTA, M. DO R. M.; SILVA, J. P. A. DA; SILVA, R. D. **Sumário Mineral**

**Brasileiro 2018. Agência Nacional de Mineração (ANM), n. 1, p. 1–4, 2018.**

CROSSIN, E. **The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute.** Journal of Cleaner Production, v. 95, p. 101–108, 2015.

CUCHIERATO, G. **Caracterização Tecnológica de Resíduos da Mineração de Agregados da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), visando seu aproveitamento econômico.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2000.

DIAS, T. G.; CAXITO, F. **Recursos minerais de Minas Gerais – Manganês.** Ministério das Minas e Energia: Brasília, p. 16, 2018.

DRUMMOND, J. A.; PEREIRA, M. DE A. P. **O Amapá nos tempos do manganês: Um estudo sobre o desenvolvimento de um estado amazônico - 1943-2000.** Rio de Janeiro: Garamond, 2007.

EUROCODE 2. **EN 1992-1-1:Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.** v. 1, 2004.

FELIX, E. et al. **Avaliação da durabilidade de uma viga de concreto armado sujeita à reação álcali- agregado.** CONPAT Asunción, n. September, p. 1–10, 2017.

FIGUEIREDO, F. **Quase 200 mil toneladas de manganês estocados no AP serão recolhidas em janeiro | Amapá | G1.** Disponível em: <<https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/quase-200-mil-toneladas-de-manganes-estocados-no-ap-serao-recolhidos-em-janeiro.ghtml>>.

FONT, N. G. et al. **Caracterização de Rejeito de Minério de Manganês no Norte do Brasil.** Anais 62º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2020, n. 1, p. 1–10, 2020.

FRANCO DE CARVALHO, J. M. et al. **More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials.** Construction and Building Materials, v. 206, p. 397–409, 2019.

FREITAS, C. M. DE et al. **Desastres em barragens de mineração como riscos sistêmicos.** Revista Brasileira de Epidemiologia, v. 25, n. suppl 2, p. 1–7, 2022.

FROTTE, C. et al. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD.** Revista Materia, v. 22, n. 2, 2017.

GIESEKAM, J. et al. **The greenhouse gas emissions and mitigation options for materials used in UK construction.** Energy and Buildings, v. 78, p. 202–214, 2014.

GOBI, C. M. **Reatividade De Agregados Em Argamassas E Concretos De**

**Cimento Portland Curitiba.** [s.l.] Universidade Federal Do Paraná, 2017.

HASPARYK, N. P. **Investigação de Concretos Afetados Pela Reação Álcali-Agregado e Caracterização Avançada do Gel Exsudado.** [s.l.] UFRGS, Porto Alegre, 2005.

HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C. **Reações expansivas deletérias no concreto.** Concreto & Construções, n. 102, p. 49–55, 2021.

HELENE, P.; CARVALHO, M.; PACHECO, J. **Engineering field tests for alkali-aggregate reaction.** Structural Concrete, v. 18, n. 2, p. 349–355, 2017.

IBRAM. **Gestão para a sustentabilidade na mineração: 20 anos de história.** Instituto Brasileiro de Mineração, p. 170, 2013.

IBRAM. **Relatório Anual 2018-2019. Grupo De Trabalho De Apoio À Fiscalização Em Educação,** n. 48, p. 1–28, 2018.

IPCC. **Climate change 2013: The Physical Science Basis - Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,** v. 9781107057, n. AR5, p. 1–1535, 2013.

KLOCKENKÄMPER, R.; VON BOHLEN, A. **Total-Reflection X-Ray Fluorescence Analysis and Related Methods: Second Edition.** [s.l.: s.n.]. v. 9781118460

KRAUSMANN, F. et al. **Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century.** Ecological Economics, v. 68, n. 10, p. 2696–2705, 2009.

LI, C. et al. **A novel conversion process for waste residue: Synthesis of zeolite from electrolytic manganese residue and its application to the removal of heavy metals.** Physicochem. Eng. Aspects, v. 470, p. 258–267, 2015.

LIFSET, R.; ECKELMAN, M. **Material efficiency in a multi-material world.** Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 371, n. 1986, 2013.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas & Minerais Industriais Usos e Especificações.** [s.l.: s.n.]. v. 15

MACHADO, V. C. **Resíduo da bauxita na produção de agregados graúdos sintéticos para concreto estrutural: análise de durabilidade.** [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2022.

MEHTA, P. K. **Sustainable cements and concrete for the climate change era - A review.** 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, p. 1–10, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete – Microstructure, Properties, and Materials**, McGraw-Hill, New York, 2006. New York: [s.n.]. v. 7

MENDES, M. V. A. **Análise Técnica Da Substituição Parcial Do Agregado Miúdo Por Rejeito Magnético Na Produção De Concreto**. 2016.

MILLER, S. A. et al. **Comparison indices for design and proportioning of concrete mixtures taking environmental impacts into account**. Cement and Concrete Composites, v. 68, p. 131–143, 2016.

MONTEIRO, M. D. A. **A ICOMI no Amapá: meio século de exploração mineral**. Novos Cadernos NAEA, v. 6, n. 2, p. 113–168, 2003.

MONTEIRO, M. DE A. **Modernização, técnica moderna e risco ambiental: o caso da valorização do manganês da serra do navio \***. I Encontro Associação Nacional de Pós Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade, p. 1–14, 2002.

MONTEIRO, M. DE A. **Meio século de mineração industrial na Amazônia e suas implicações para o desenvolvimento regional**. Estudos Avançados, v. 19, n. 53, p. 187–207, abr. 2005.

OLIVEIRA, L. A. P. DE; GOMES, J. P. C.; SANTOS, P. M. S. **The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components**. Construction and Building Materials, v. 31, p. 197–203, 1 jun. 2012.

OLSEN, S. .; TANGSTAD, M.; LINDSTAD, T. **Production of ferromanganese alloys in the submerged arc furnace**. SINTEF and Tapir Academic Press, Trondheim, p. 247, 2007.

OLSEN, S. E.; TANGSTAD, M. **Silicomanganese Production – Process Understanding**. INFACON X: Transformation through Technology, v. Internatio, n. February, p. 231–238, 2004.

PELISSARI, V. et al. **Absorção de água de amassamento em concretos produzidos com agregados reciclados**. Brazilian Applied Science Review, v. 4, n. 1, p. 51–69, 2020.

PIMENTEL, M. G. et al. **Manganese Ore Residue from the Amazon Region and Its Potential Use as a Supplementary Material to Portland Cement**. XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC, 2020.

PIMENTEL, M. G. et al. **Manganese mining waste as a novel supplementary material in Portland cement**. Materials Letters, v. 309, p. 131459, 15 fev. 2022.

POSTERLLI, M. C. **Modelagem da expansão devido à reação álcali-agregado de concreto armado e reforçado com fibras**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2017.

SALGUERO, F. et al. **Recycling of manganese gangue materials from waste-dumps in the Iberian Pyrite Belt - Application as filler for concrete production.** Construction and Building Materials, v. 54, p. 363–368, 2014.

SAMPAIO, J. A. et al. Cap.28. Manganês. In: **Rochas e minerais industriais. Usos e especificações.** 2<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2008. p. 633–648.

SANTOS, J. A. V. DOS. **Concretos com agregado graúdo a partir dos resíduos de cerâmica vermelha.** p. 0–113, 2011.

SANTOS, O. DE S. H. **Reciclagem de um resíduo proveniente do Beneficiamento de minério de manganês.** [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2013.

SCARPELLI, W. **Arsênio do minério de manganês de Serra do Navio.** Novos Cadernos NAEA, p. 101–133, 2003.

SILVA JUNIOR, P. R. **Rejeito de Manganês, Proveniente da Amazônia Oriental em substituição Parcial do agregado miúdo natural em concreto.** [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2019.

SONTER, L. J. et al. **Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon.** Nature Communications, p. 7, 2017.

SOUZA, J. A.; SOUSA, J. M.; KATO, R. B. **Análise do Desempenho de Concreto Betuminoso Usinado à Quente com Adição de Rejeito da Mineração do Cobre Segundo os Parâmetros Marshall.** E&S - Engineering and Science, v. 2, n. 4, p. 3–12, 2015.

SOUZA JUNIOR, J. Q. DE. **Utilização do Rejeito de Manganês da Serra do Navio-Amapá como Agregado no Concreto: Aplicação como Material de Construção.** [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2020.

TOFFOLO, R. V. M. et al. **Viabilidade técnica de elementos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito de barragem de minério de ferro.** 56<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto CBC2014, n. 1, p. 1–14, 2014.

VIVEIROS, D. DE C. S. DE. **Rejeito do Minério de Manganês como Material de Construção Civil.** [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2017.

WBSCD. **Technology roadmap low-carbon transition in the cement industry.** World Business Council for Sustainable Development and International Energy Agency, p. 4, 2018.

YANG, C. et al. **An investigation on the use of electrolytic manganese residue as filler in sulfur concrete.** 2014.

ZHAO, J. et al. **An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete properties.** Construction and Building Materials, v. 286, p. 122968, 7 jun. 2021.

ZHOU, C. et al. **Preparation and strength property of autoclaved bricks from electrolytic manganese residue.** 2014.