



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**OTONIEL CAJUÍ BONFIM**

**USO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE COBRE PARA PRODUÇÃO**  
**DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**



**JUAZEIRO/BA**

**2024**

**OTONIEL CAJUÍ BONFIM**

**USO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE COBRE PARA PRODUÇÃO  
DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, Campus Juazeiro-BA, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Prof. Orientador: Dr.<sup>a</sup> Silvia Helena Nogueira Turco

Prof. Coorientador: Dr. José Getúlio Gomes de Sousa

**JUAZEIRO/BA**

**2024**

B713u	<p>Bonfim, Otoniel Cajú</p> <p>Uso de rejeitos de mineração de cobre para produção de argamassas de revestimento / Otoniel Cajú Bonfim. – Juazeiro-BA, 2024. xiv, 110 f.: il.; 29 cm.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro, Juazeiro-BA, 2024.</p> <p>Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sílvia Helena Nogueira Turco.</p> <p>Inclui referências.</p> <p>1. Beneficiamento de minérios. 2. Resíduos sólidos. 3. Agregados miúdos. 4. Argamassa. I. Título. II. Turco, Sílvia Helena Nogueira. III. Universidade Federal do Vale do São Francisco.</p> <p>CDD 622.7</p>
-------	---

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UNIVASF.  
Bibliotecária: Andressa Laís Machado de Matos CRB – 4/2240.


**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**AGRÍCOLA**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

Otoniel Cajuí Bonfim


**“USO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE COBRE PARA PRODUÇÃO  
DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO”**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação *Strito Sensu* em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, como requisito parcial para obtenção do título de mestre.

Documento assinado digitalmente  
 SILVIA HELENA NOGUEIRA TURCO  
Data: 29/11/2024 15:47:02-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Profa. Silvia Helena Nogueira Turco (Doutora) - Orientadora  
(PPGEA/UNIVASF)

Documento assinado digitalmente  
 JOSE GETULIO GOMES DE SOUSA  
Data: 29/11/2024 12:54:10-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Prof. José Getúlio Gomes de Sousa (Doutor) - Coorientador  
(CCIVIL/UNIVASF)

Documento assinado digitalmente  
 DIAN LOURENCONI  
Data: 29/11/2024 11:53:05-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Prof. Dian Lourençoni (Doutor) - Examinador  
(PPGEA/UNIVASF)

Documento assinado digitalmente  
 JARDENIA RODRIGUES FEITOSA  
Data: 29/11/2024 11:33:58-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Prof. Jardênia Rodrigues Feitosa (Doutora) - Examinador  
(CENAMB/UNIVASF)

Juazeiro-BA, 26 de novembro de 2024

À DEUS

Ao meu pai, José de Souza Bonfim Sobrinho (*in memoriam*), pelo amor incondicional e o desejo de que eu me tornasse uma pessoa de referência, dedico...

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e por todas as noites que a ti entreguei todas as minhas angústias, feridas, fracassos, sofrimentos e por tudo de bom que nela fez quando em tuas mãos eu entreguei.

À minha família, em especial as minhas mães Angelita Cajuí, Judite Cajuí, Izabel Cajuí e Angélica Cajuí, quatro mulheres guerreiras e com histórias a serem referenciadas, que sempre se abdicaram e se sacrificaram para que eu me tornasse quem eu sou hoje, saibam que vocês são e sempre serão minhas maiores fontes de inspiração.

À Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – PPGEA por ter me fornecido à oportunidade e todas as ferramentas necessárias que me permitiram chegar ao final dessa trajetória com êxito.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão da bolsa de incentivo a pesquisa.

À EroBrasil – Caraíba (Mineração Caraíba S/A) pela doação do material objeto de estudo e por ser minha primeira casa de atuação profissional, além de me fazer enxergar as oportunidades de crescimento além dos meus olhos.

À minha orientadora Sílvia Helena Nogueira Turco por se fazer tão presente na orientação, ensinamentos, paciência e compressão mesmo diante de um momento adverso de sua vida pessoal nunca exitou em me orientar da melhor maneira possível.

Ao meu coorientador José Getúlio Gomes de Sousa pela coorientação, parceria, disponibilidade e acompanhamento das atividades desenvolvidas em laboratório.

Aos professores Dian Lourençoni, Pablo Teixeira Leal de Oliveira e Jardênia Rodrigues Feitosa pela contribuição nesse trabalho, conhecimentos transmitidos e exemplo de vida e profissionalismo.

Ao povo brasileiro pela oportunidade de receber de forma gratuita o conhecimento necessário à minha trajetória de formação acadêmica.

A todos os colaboradores diretos e indiretos da UNIVASF pelo companheirismo e ajuda durante esses dois anos, sobretudo a Hideo Nagahama, Ricardo Luíz, Rogério, Johniê dos Anjos, Zezé, Robéria e Vanusia.

A todos os meus amigos, principalmente àqueles da minha turma do colegial, graduação, ramo profissional e aos que fiz durante o mestrado, em especial Larissa Guimarães, Claudiane Araújo, Luana Figueiredo, Amanda Mirele e Anne Thaís.

“Enfatize que temos valor pelo simples fato de ser e existir, e que pelo simples fato de existir você merece. Você tem que se lembrar de que é uma pessoa igualmente importante, não importa o trabalho que faça.” Autor Desconhecido

## RESUMO

Nos últimos anos, o Brasil e o mundo têm demonstrado crescente preocupação com as atividades da indústria de mineração, especialmente após grandes acidentes envolvendo o rompimento de barragens de rejeitos, como os ocorridos em Mariana e Brumadinho no estado de Minas Gerais. Este mercado é responsável por gerar grandes volumes de rejeitos na etapa do beneficiamento mineral, apesar dos avanços da tecnologia, ainda enfrentam desafios quanto a manuseio e destinação adequada deste resíduo. Desse modo, o presente estudo teve como objetivo produzir argamassas de revestimento com a utilização de rejeito do beneficiamento de minério de cobre. A produção de argamassa deu-se em seis tratamentos, sendo: sem adição de rejeito (T0), e outros cinco com 10% (T1), 20% (T2), 30% (T3), 40% (T4) e 50% (T5) em substituição ao agregado miúdo. Foram realizados ensaios no estado fresco com intuito de avaliar a ação do rejeito nos parâmetros de trabalhabilidade, índice de consistência e densidade de massa. No estado endurecido, foram avaliadas as determinações das resistências à tração na flexão, à compressão axial simples e de aderência à tração em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com idade de 14 e 28 dias. Os ensaios de avaliação térmica foram conduzidos em delineamento em blocos casualizados (DBC) aos 28 dias. Os resultados evidenciaram que os tratamentos T1, T2 e T3 apresentam bons desempenhos para os três parâmetros de resistência avaliados e para avaliação térmica todos os percentuais de substituição apresentaram bons desempenhos.

**Palavras-chave:** Beneficiamento de minérios. Resíduos sólidos. Agregados miúdos. Argamassa.



## ABSTRACT

In recent years, Brazil and the world have shown growing concern about the activities of the mining industry, especially after major accidents involving the collapse of tailings dams, such as those in Mariana and Brumadinho in the state of Minas Gerais. This market is responsible for generating large volumes of tailings at the mineral processing stage and, despite advances in technology, still faces challenges in terms of handling and properly disposing of this waste. The aim of this study was to produce coating mortars using copper ore processing tailings. The mortar was produced in six treatments: without the addition of tailings (T0), and five with 10% (T1), 20% (T2), 30% (T3), 40% (T4) and 50% (T5) as a substitute for the fine aggregate. Tests were carried out in the fresh state in order to assess the action of the tailings on the parameters of workability, consistency index and bulk density. In the hardened state, the flexural tensile strength, simple axial compressive strength and tensile adhesion strength were evaluated in a completely randomized design (DIC), at 14 and 28 days of age. The thermal evaluation tests were carried out in a randomized block design at 28 days. The results showed that treatments T1, T2 and T3 performed well for the three strength parameters evaluated and for the thermal evaluation all the substitution percentages performed well.

**Key-words:** Mineral processing; Solides wastes. Small aggregates. Mortar.

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Percentual da produção mineral comercializada tendo como base o ano de 2021.	16
Figura 2 - Zoneamento bioclimático do Brasil.	30
Figura 3 - Fluxograma do procedimento experimental.	33
Figura 4 – Extensão da área da barragem de rejeitos e pontos de coleta do material.	40
Figura 5 - Colaborador da empresa realizando a coleta do material.	41
Figura 6 – Curvas granulométricas do agregado miúdo (areia e rejeito) em comparação aos limites estabelecidos pela NBR7211/2005.	43
Figura 7- Espectro gerado na análise de fluorescência por raios X para amostra de cobre analisada.	45
Figura 8 – Difratoograma de Raios X da amostra de rejeito de cobre.	46
Figura 9 – A morfologia das partículas que compõem o rejeito de cobre.	47
Figura 10 – Microanálise qualitativa de elementos químicos presentes na amostra de rejeito da mineração de cobre.	48
Figura 11 – Ensaio para obtenção do Índice de Consistência.	53
Figura 12 – Modelagem dos corpos de prova para realização do ensaio na tração na flexão.	56
Figura 13 – Realização do ensaio de resistência à tração na flexão.	56
Figura 14 – Realização do ensaio de resistência à compressão axial simples.	58
Figura 15 – Ensaio de resistência de aderência à tração: (A) paredes de blocos cerâmicos; (B) argamassa de revestimento aplicada na parede; (C) perfuração dos corpos de prova e (D) arrancamento dos corpos de prova com auxílio do equipamento dinamômetro.	60
Figura 16 – Corpos de prova para análise de avaliação de térmica.	61
Figura 17 – Protótipo de avaliação térmica de materiais.	62
Figura 18 – Gráfico para os valores determinados da massa de água utilizada para cada tratamento adotado.	64
Figura 19 – Gráfico para valores determinados do diâmetro de espalhamento (consistência) das argamassas.	66
Figura 20 – Gráfico para valores determinados da densidade de massa no estado fresco.	68
Figura 21 – Resistência à tração na flexão das argamassas em função da porcentagem de rejeito, nas duas idades de ruptura.	71
Figura 22 – Resistência à compressão axial simples em função da porcentagem de rejeitos, aos 14 e 28 dias.	74

Figura 23 – Gráfico para os valores determinados para capacidade de amortecimento (°C)...	81
Figura 24 – Gráfico para os valores determinados de atraso térmico (h).....	82

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Principais minerais com presença de cobre na sua composição.....	18
Tabela 2 - Classificação das argamassas em função da densidade de massa no estado fresco.	25
Tabela 3 - Classificação das argamassas em função da resistência à compressão axial simples no estado endurecido. ....	27
Tabela 4 - Classificação das argamassas em função da resistência à tração na flexão no estado endurecido. ....	28
Tabela 5 – Valores de atraso térmico definido e permitido por norma para as zonas bioclimáticas.....	31
Tabela 6 – Composição percentual de substituição para os tratamentos avaliados.....	34
Tabela 7 – Relação entre as variáveis de controle, resposta e corpos de prova. ....	35
Tabela 8 - Características químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado conforme a fabricante APODI.....	36
Tabela 9 – Valores determinados para todos os parâmetros físicos do agregado miúdo. ....	38
Tabela 10 – Valores determinados para todos os parâmetros físicos do rejeito de cobre. ....	42
Tabela 11 – Caracterização química por FRX do rejeito de cobre.....	44
Tabela 12 – Percentual dos elementos com predominância no espectro da amostra de rejeito da mineração de cobre.....	48
Tabela 13 – Resultados do parâmetro pH para o ensaio de corrosividade. ....	49
Tabela 14 – Resultados dos parâmetros para o ensaio de lixiviação.....	49
Tabela 15 – Resultados dos parâmetros para o ensaio de solubilização. ....	50
Tabela 16 – Proporção dos materiais utilizados na produção da argamassa. ....	51
Tabela 17 – Resultados médios para variável de resistência à compressão axial simples (MPa). ....	69
Tabela 18 – Resultados médios para variável de resistência à compressão axial simples (MPa). ....	72
Tabela 19 – Resultados médios para variável de resistência de aderência à tração (MPa). ....	76
Tabela 20 – Resultados de resistência de aderência à tração para os doze corpos de prova para todos os tratamentos estudados.....	78
Tabela 21 – Resultados médios para variável capacidade de amortecimento (°C) e atraso térmico (h). ....	80

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	12
2 OBJETIVOS .....	13
2.1 OBJETIVO GERAL .....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
3 REVISÃO DE LITERATURA .....	14
3.1 MINERAÇÃO NO SEMIÁRIDO .....	14
3.1.1 Importância da exploração mineral de cobre no Brasil e na Região Semiárida .....	15
3.1.2 Materiais obtidos da extração de minério.....	17
3.2 RESÍDUOS .....	18
3.3 RESÍDUOS DE MINERADORA.....	19
3.4 REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE MINERADORAS.....	20
3.5 MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....	22
3.6 ARGAMASSA .....	23
3.6.1 Componentes .....	23
3.6.1.1 Propriedades da argamassa .....	24
3.6.1.1.1 <i>Densidade de massa no estado fresco</i> .....	24
3.6.1.1.2 <i>Trabalhabilidade e índice de consistência da argamassa no estado fresco</i> .....	25
3.6.1.1.3 <i>Resistência à compressão da argamassa</i> .....	26
3.6.1.1.4 <i>Resistência à tração na flexão da argamassa</i> .....	27
3.6.1.1.5 <i>Resistência de aderência à tração da argamassa</i> .....	28
3.7 PROPRIEDADES DE AVALIAÇÃO TÉRMICA E ISOLAMENTO TÉRMICO EM ARGAMASSA.....	29
3.7.1 Capacidade de amortecimento e atraso térmico .....	29
4 MATERIAL E MÉTODOS .....	32
4.1 LOCAL DO EXPERIMENTO .....	32

4.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DO ESTUDO .....	32
4.2.1 Variáveis de controle .....	33
4.2.1.1 Idade de ruptura .....	33
4.2.1.2 Traço adotado .....	34
4.2.1.3 Relação água/cimento (a/c).....	34
4.2.1.4 Proporção de substituição parcial de rejeito (%).....	34
4.2.2 Variáveis de resposta .....	35
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO E DOS MATERIAIS .....	36
4.3.1 Cimento portland .....	36
4.3.2 Agregado miúdo .....	37
4.3.3 Água .....	39
4.3.4 Rejeito de cobre.....	39
4.3.4.1 Coleta das amostras de rejeito .....	39
4.3.4.2 Métodos de caracterização utilizados .....	41
4.3.4.2.1 Caracterização física.....	41
4.3.4.2.2 Caracterização química .....	43
4.3.4.2.3 Caracterização ambiental .....	48
4.4 PRODUÇÃO DA ARGAMSSA .....	51
4.4.1 Ensaio e normas utilizadas .....	51
4.4.1.1 Ensaio no estado fresco.....	51
4.4.1.1.1 Trabalhabilidade e Índice de Consistência.....	52
4.4.1.1.2 Densidade de massa .....	54
4.4.1.2 Ensaio no estado endurecido .....	54
4.4.1.2.1 Resistência à tração na flexão .....	55
4.4.1.2.2 Resistência à compressão axial simples .....	57
4.4.1.2.3 Resistência de aderência à tração .....	58
4.4.1.2.4 Avaliação térmica .....	60

4.5 TRATAMENTOS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS.....	63
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	64
5.1 COMPORTAMENTO DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO .....	64
5.1.1 Trabalhabilidade e índice de consistência .....	64
5.1.2 Densidade de massa .....	67
5.2 COMPORTAMENTO DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO .....	69
5.2.1 Resistência à tração na flexão.....	69
5.2.2 Resistência à compressão axial simples .....	72
5.2.3 Resistência de aderência à tração.....	76
5.2.4 Avaliação térmica .....	80
6 CONCLUSÕES .....	84
REFERÊNCIAS .....	85
ANEXO A - ARGAMASSA CONFECCIONADA A PARTIR DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE COBRE .....	98

## 1 INTRODUÇÃO

Hoje, a população mundial tem se preocupado com os resíduos das ações das mineradoras, principalmente após grandes acidentes ambientais ocorridos nas últimas décadas. Segundo Ottoboni (2018), apesar dos avanços tecnológicos nas áreas de engenharia, os resíduos industriais provenientes dos diferentes setores da mineração ainda enfrentam desafios na sua destinação adequada. Para as empresas deste setor, lidar com a grande quantidade de resíduos e a falta de opções adequadas de destinação continua sendo um desafio não resolvido.

A geração de rejeitos pelas mineradoras tem resultado em um aumento significativo na construção de estruturas de armazenamento, fazendo com que as pilhas e barragens de rejeitos se tornem projetos de extrema importância e objetos de estudo intensivo no que diz respeito a acidentes ambientais (SOARES; BOSCOV, 2018).

Um exemplo de geração de resíduos é a exploração do cobre que tem impulsionado a necessidade de pesquisas sobre a geração de subprodutos a partir dos resíduos da flotação, visando beneficiar a sociedade, garantir a sustentabilidade das operações industriais e potencialmente gerar receita operacional para as empresas. A recuperação e o processamento dos rejeitos surgem como uma oportunidade de negócio interessante, permitindo a agregação de valor financeiro às operações existentes, ao mesmo tempo em que reduz as pressões dos órgãos ambientais por novas áreas de disposição de rejeitos (SILVA, 2017; SILVA *et al.*, 2021b; SILVA *et al.*, 2021c).

Diante desse fato, tornou-se frequente a busca por soluções para mitigar ou reduzir a formação de barragens contendo rejeitos de minério de cobre. Uma alternativa que os pesquisadores têm considerado é a realização de pesquisas sobre a utilização de resíduos como materiais alternativos em outros setores.

Assim, a temática classificada como Produção de Argamassas a Base de Rejeitos de Cobre possui uma abordagem representada pela ausência de pesquisas/estudos que investiguem as principais alterações no comportamento dos parâmetros do estado fresco (trabalhabilidade, índice de consistência e densidade massa) e do estado endurecido (resistência à tração na flexão, à compressão axial simples e de aderência à tração e avaliação térmica). Portanto, essa pesquisa pode ser considerada inovadora na área, tendo em vista a inexistência de trabalhos científicos que abordem os seus principais aspectos.



Sendo assim, a utilização de rejeitos de minas de cobre como substituto de agregados naturais e adições minerais na produção de argamassas e poderá permitir poupar os recursos naturais não renováveis.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Produzir de argamassas de revestimento com a utilização de rejeito do beneficiamento de minério de cobre.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Formular argamassas com diferentes proporções de rejeito de minério de cobre em substituição ao agregado miúdo;
- Avaliar o efeito das diferentes proporções de rejeito nas propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido;
- Avaliar o efeito das diferentes proporções de rejeito nas propriedades térmicas das argamassas no estado endurecido.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 MINERAÇÃO NO SEMIÁRIDO

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2022), a indústria de mineração no semiárido nordestino tem desempenhado um papel significativo na economia da região, gerando empregos e contribuindo para o desenvolvimento local. Essas empresas estão envolvidas na extração de minerais como cobre, cromo, calcário, ferro, ouro e outros encontrados nessa região. No entanto, a exploração mineral também apresenta preocupações ambientais e sociais, devido aos impactos causados pelas atividades minerárias, como o desmatamento, contaminação dos recursos hídricos e a migração das comunidades agrícolas locais.

Nos últimos anos, o aumento da demanda global por essas fontes minerais tem impulsionado a expansão das operações da indústria mineral na região semiárida. Essas empresas têm investido em infraestruturas e tecnologias para melhorar a eficiência da extração e processamento de minérios. Além disso, programas de responsabilidade social corporativa têm sido implementados para mitigar os impactos negativos das atividades de mineração, promovendo o desenvolvimento sustentável e a inclusão das comunidades agrícolas direta e indiretamente afetadas (ANM, 2023).

O Greenpeace Brasil (2023), publicou que apesar dos esforços das mineradoras em adotar práticas mais sustentáveis, os impactos ambientais da mineração na região semiárida ainda são motivo de preocupação. A degradação do solo, a poluição do ar e a escassez de água são desafios significativos enfrentados pelas comunidades agrícolas locais e pelos órgãos reguladores. A pressão da sociedade civil tem levado a um maior escrutínio público e a demandas por regulamentações mais rígidas para proteger o meio ambiente e as populações agrícolas locais.

É sabido que a região do semiárido nordestino é caracterizada por condições climáticas adversas, como a escassez de chuva e a aridez do solo. Em função disso, as atividades de exploração mineral, quando não realizada de forma responsável, podem agravar ainda mais esses problemas e dificultar a recuperação ambiental (IBRAM, 2022).

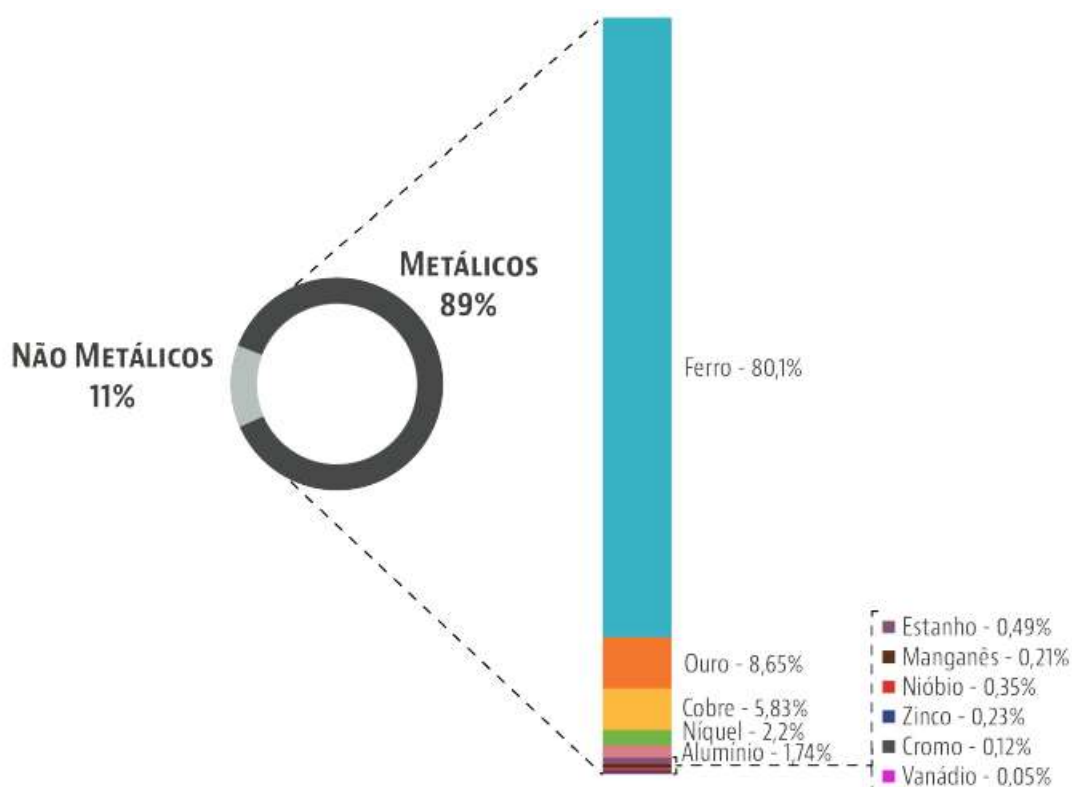
### **3.1.1 Importância da exploração mineral de cobre no Brasil e na Região Semiárida**

De acordo com Carvalho (2018), a intensa exploração mineral das riquezas minerais marcou a história do Brasil ao longo do tempo. Assim, a indústria de mineração assumiu um papel significativo em sua economia, desempenhando um papel relevante na produção de bens e serviços, no progresso e no avanço do bem-estar e da qualidade de vida da população.

Segundo Fernandes (2014), o Brasil é amplamente reconhecido como uma potência na produção e exportação mineral. O país abriga a extração de 72 (setenta e duas) diferentes substâncias minerais, das quais incluem 23 metálicas, 45 não metálicas e 4 energéticas. Conforme o Anuário Mineral Brasileiro da Agência Nacional de Mineração – ANM (2022), dentre as substâncias metálicas, destaca-se o minério de cobre, a terceira substância mais relevante em termos econômicos, sendo responsável por 5,83% da produção nacional mineral comercializada.

Ainda de acordo com o Anuário Mineral Brasileiro de 2022, divulgado pela ANM, para o ano de 2021, as substâncias da classe dos metálicos representam cerca de 89% do valor total da produção mineral do Brasil, como pode ser observado no gráfico da Figura 1. Entre essas substâncias, 11 (onze) se destacam, correspondendo a 99,7% do valor total da produção nessa categoria, tais como: alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco.

**Figura 1** – Percentual da produção mineral comercializada tendo como base o ano de 2021.



Fonte: ANM, 2022.

Conforme as informações divulgadas pelo Ministério de Minas e Energia (2022), a indústria de mineração na região nordestina, especificamente no Semiárido, desempenha um papel significativo na economia da região, gerando empregos e contribuindo para o desenvolvimento local e regional.

Nessa região, existem grandes reservas minerais, com destaque para minerais, metálicos, não metálicos, pedras preciosas, entre outros recursos. A mineração tem sido uma atividade econômica tradicional na região nordeste do Brasil, e muitas instalações de beneficiamento de minérios localizam-se em cidades de pequeno-médio porte (SANTOS, *et al.*, 2017).

É sabido que existem, de fato, minas de grande porte no nordeste brasileiro, muitas delas em plena operação e localizadas em diversas cidades e áreas do Semiárido, a distribuição dessas minas ocorre de acordo com o tipo de mineral encontrado na região (SANTOS, *et al.*, 2017).

No Nordeste, há 27 (vinte e sete) minas de grande porte, as quais estão entre as 200 (duzentas) maiores do Brasil, com uma vasta diversidade de exploração mineral. Na Região Semiárida nordestina, localizam-se as minas de cobre em Jaguarari (BA) e Craíbas (AL), as

quais se encontram em operação (BRASIL MINERAL, 2022) e Viçosa (CE) explorada até o ano de 1987 (GONZALEZ, 2019).

Nesse sentido, a mineração na região semiárida apresenta perspectivas bastante promissoras, uma vez que existem áreas propícias para o desenvolvimento e exploração de diversos minérios. Além disso, a região possui alguns estados com produção mineral bem diversificada, como por exemplo, Bahia, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte. Nas áreas do interior do sertão, houve um aumento de indústrias do setor mineral dispostas a investir. Dessa forma, tanto no Nordeste quanto em outras regiões do país, as indústrias minerais se estabeleceram em áreas estratégicas visando o beneficiamento de uma variedade de minerais (SANTOS, *et al.*, 2017).

### **3.1.2 Materiais obtidos da extração de minério**

Desde a sua descoberta, o cobre sempre foi utilizado em uma ampla variedade de aplicações ao longo da história, devido às suas propriedades físico-químicas, como ponto de fusão relativamente baixo, excelente ductilidade, maleabilidade, resistência à corrosão, alta condutividade térmica e elétrica. Essas propriedades o tornaram um dos metais mais comumente utilizados (DNPM, 2010).

Pode-se enfatizar que a indústria geralmente faz a utilização do cobre, considerando uma série de propriedades físicas específicas que são mais importantes para cinco setores, sendo o da construção civil, rede elétrica, eletrônico, automobilístico e pelos maquinários industriais (SOUSA, 2019).

Neste contexto, da ampla utilização, a produção da cadeia de cobre pode ser dividida em três etapas distintas. A primeira etapa envolve a extração mineral das rochas. A segunda etapa é englobada pelo beneficiamento do minério, na qual são obtidos dois materiais: o concentrado de cobre (com teor médio de 35%) e uma polpa, denominada de rejeito, destinada as estruturas de deposição (paddock, pilhas de estéril e barragem de rejeitos). Concluída essa etapa, o concentrado de cobre segue para as refinarias metalúrgicas, onde se inicia a terceira etapa deste processo de produção e as metalurgias são encarregadas de produzir e comercializar o cobre metálico (SOUSA, 2019).

Ressalta-se que existem duas classificações geológicas para o minério de cobre que ocorrem naturalmente, o oxidado, mais superficial, de origem na crosta terrestre e de baixo teor e o sulfetado, ocorrendo em camadas mais profundas e de maior percentual de cobre na sua

composição química (ANDRADE; CUNHA; GANDRA, 2001). Na Tabela 1, a seguir são apresentados os principais minérios de cobre.

**Tabela 1** – Principais minerais com presença de cobre na sua composição.

Tipo	Minerais comuns	Fórmula Química	% de Cu
<b>Minério primário</b>	Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$	34,6
	Bornita	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	63,3
<b>Mineral secundário</b>	Calcocita	$\text{Cu}_2\text{S}$	79,9
	Covelhita	$\text{CuS}$	66,5
	Cuprita	$\text{Cu}_2\text{O}$	88,8
	Ternolita	$\text{CuO}$	79,9

Fonte: Adaptado de Davenport *et al.*, 2002.

### 3.2 RESÍDUOS

A expansão descontrolada das atividades industriais tem levado ao aumento da poluição, o que tem afetado seriamente a qualidade de vida das comunidades agrícolas locais, e principalmente o meio ambiente (SILVEIRA, 2015). Conforme definido por Aguiar e Novaes (2002), a poluição pode incluir qualquer alteração química, física ou biológica que perturbe os ciclos biológicos do meio ambiente.

O termo “resíduo” é de origem latina e significa “resto” e pode representar a perda de matéria-prima e/ou insumos e pode indicar ineficiências no processo produtivo (JACOMINO *et al.*, 2002).

Sabe-se que os resíduos sólidos são gerados em todas as etapas do processo produtivo, incluindo extração, manuseio, armazenamento, coleta, transporte e disposição final, além de atividades como o tratamento de efluentes e controle de emissões atmosféricas (OLIVEIRA; LANGE, 2005).

A norma técnica NBR 10.004, elaborada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), estabelece diretrizes para o tratamento, transporte e destinação final adequada de resíduos e, classificando os resíduos quanto ao seu potencial de risco à saúde pública e ao meio ambiente, em:

- Classe I: Perigosos;

- Classe II: Não perigosos, sendo subdividida em:
  - II A: Não Inertes;
  - II B: Inertes.

Vale ressaltar que a periculosidade de um resíduo está relacionada às suas características químicas, físicas e biológicas e que podem representar riscos potenciais (ABNT NBR 10.004, 2004). Portanto, é de fundamental importância ter conhecimento do potencial de contaminação ao considerar os processos de reutilização de resíduos.

### 3.3 RESÍDUOS DE MINERADORA

Os resíduos produzidos na mineração possuem características que os diferenciam de outros setores. Isso ocorre principalmente porque existem duas categorias. O resíduo sólido resultante da extração, conhecido como estéril, e o material resultante do processo de beneficiamento, conhecido como rejeito (IBRAM, 2016; NIERWINSKI, 2019).

De acordo com Vilaça (2020), no beneficiamento são produzidos dois produtos diferentes durante o processamento de minérios: o concentrado e um resíduo mineral. Esses resíduos são chamados de rejeitos na indústria de mineração, uma vez que não são de interesse e/ou de utilização para as mineradoras. Este resíduo é caracterizado pela composição de frações líquidas e sólidas.

Ainda de acordo com este autor, a quantidade e a composição química dos resíduos das atividades de mineração dependem dos métodos de extração e processamento do minério, das características geológicas e da localização da mina em relação a superfície.

Os rejeitos são definidos como material remanescente após o beneficiamento em usinas, lavadoras ou concentradores que removem os metais e minerais de interesse econômico (HUDSON-EDWARDS *et al.*, 2001; LOTTERMOSER, 2007; YOUNGER; WOLKERSDORFER, 2004). Além disso, são encontrados com uma grande variedade de propriedades geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas, dependendo do tipo de minério processado e dos tratamentos aplicados. O termo rejeito é amplo e inclui subprodutos de várias indústrias como alumínio, carvão, areias betuminosas, urânio, metais preciosos e metais de base (KOSSOFF *et al.*, 2014).

Em geral, as partículas de rejeitos são predominantemente de silte (DALIRI, 2013; VICK, 1990). Essas partículas tendem a ser angulares a muito angulares, resultando em altos

ângulos de atrito em rejeitos secos. Os tamanhos das partículas variam e são difíceis de generalizar, mas geralmente excluem pedregulhos e argila, e se constituem principalmente de areia e silte. Se os resíduos forem de granulometria fina, eles são geralmente chamados de “lama”, e se forem de granulometria grossa (acima de 0,075mm), são chamados de rejeitos granulares (BJELKEVIK, 2005).

A composição química dos rejeitos depende da mineralogia do minério, dos líquidos de processamento utilizados para extração econômica do metal, da eficiência do processo de extração e do grau de intemperismo nas estruturas (barragens, paddok e pilhas de estéril) de armazenamento. A maioria dos estudos se concentram na identificação de elementos-traço e metaloides potencialmente tóxicos. No entanto, o ferro e a sílica são quase onipresentes, e esses elementos são geralmente os mais comuns, junto com o oxigênio. Além disso, Al, Ca, K, Mg, Mn, Na, P, Ti e S também são constituintes importantes (KOSSOFF *et al.*, 2014). Embora não haja um protocolo geralmente aceito para determinar os elementos-traço analisados em estudos de rejeitos, As, Cu, Pb e Zn são comumente quantificados e frequentemente presentes em altas concentrações (DAVID, 2002; HUDSON-EDWARDS *et al.*, 2001; MECK; LOVE; MAPANI, 2006; RABINOWITZ, 2005).

No que diz respeito à mineralogia, os resíduos da extração de metais preciosos e de base geralmente contêm quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e, além de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), também o K-feldspato ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), Na-feldspato ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), Ca-feldspato ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) e dolomita ( $\text{Ca, Mg (CO}_3)_2$ ) (LOTTERMOSER, 2007). Além dessas substâncias, o sulfeto de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) é quase sempre onipresente.

### 3.4 REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE MINERADORAS

A geração de rejeitos causa problemas ambientais há décadas, pois podem representar riscos à saúde humana das comunidades agrícolas, à flora, fauna e aos ecossistemas das áreas de influência das mineradoras. Entretanto, nos últimos anos houveram avanços e inovações que visam o aproveitamento e a reutilização de rejeitos como uma das soluções tecnológicas para minimizar os impactos causados ao meio ambiente.

Em virtude das crescentes preocupações ambientais associadas à mineração, muitas pesquisas foram realizadas sobre a viabilidade de reutilizar os resíduos da mineração (YELLISHETTY *et al.*, 2008), a saber: Chaves (2009) avaliou a adição de resíduos da extração



de minério de ferro à argila do Rio Grande do Norte; Wolff (2009) a caracterização de resíduos de minério de ferro de minas da Vale; Esposito *et al.* (2011) o uso de resíduos de minério na produção de cimento para tijolos rejeitados (TRC); Nociti (2011) a utilização de resíduos da extração de minério de ferro para a produção de cerâmicas vermelhas; Silva (2014) a utilização e reciclagem de resíduos de concentração de minério de ferro na produção de pavimentos e cerâmicas; Andrade (2014) a caracterização de rejeitos de mineração de ferro, *in natura* e segregados, para aplicação como material de construção civil; Silveira (2015) a utilização de resíduos de mineração na construção civil; Gomes (2017) o estudo de aproveitamento de rejeito de mineração; Sousa (2019) a utilização de rejeito de minério de cobre como agregado miúdo na produção de concreto; Passos (2021) a análise comparativa do potencial de utilização de resíduo de mineração em argamassa autonivelante; Silva (2022) a análise de massas cerâmicas utilizando argila piauiense, com teores de resíduo de pó de balão e rejeito de minério de cobre visando a produção de cerâmica vermelha; Costa (2022) o panorama dos estudos de aproveitamento de rejeitos de mineração do estado do Pará de 2010 a 2020; Junior e Oliveira (2022) a utilização do rejeito de minério de ferro na formulação de argamassas; e Lemos *et al.* (2023) a utilização de rejeitos de minério de ferro como matéria-prima alternativa na produção de tijolos de cimento.

Além desses, também foram realizadas pesquisas visando o aproveitamento de subprodutos na indústria asfáltica. O Relatório Técnico (2017) da Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT evidencia o potencial da utilização da escória de ferro silício-manganês como substituto de agregados naturais em misturas asfálticas. Esse relatório ainda analisou a substituição na construção da VIA 040, que liga Belo Horizonte – MG ao Distrito Federal, e seu estudo técnico constatou que a escória poderia substituir até 40% do agregado natural na mistura asfáltica.

Além dos estudos citados acima, existem outras pesquisas na indústria da construção civil que utilizam diferentes tipos de resíduos e os usam para diversas aplicações. Esses resíduos são utilizados para fabricação de outros materiais, como por exemplo, para base ou sub-base de estradas, asfalto, lastro de ferrovias, adições em concretos, argamassas, produção de peças pré-moldadas e elementos não estruturais.

De acordo com Sousa (2019), o principal objetivo deste tipo de pesquisa é encontrar soluções mais sustentáveis para os resíduos gerados durante o processo de fabricação de determinados materiais, e desta forma, buscam reduzir os impactos ambientais causados tanto

pela utilização de novos recursos naturais, quanto pelo descarte inadequado desses materiais sem valor agregado.

### 3.5 MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Para Oliveira (2015), na construção, são considerados materiais todas as substâncias utilizadas na fabricação de produtos relacionados ao setor construtivo, desde a infraestrutura até as edificações. Alguns desses materiais têm sido utilizados, como o concreto, por muitos anos, enquanto outros estão em constante evolução. O desenvolvimento de materiais de construção não é um fenômeno novo, originou-se nos tempos do homem primitivo, fazendo o uso de materiais encontrados na natureza sem muitas modificações.

Além disso, esse mesmo autor, afirmou que à medida que a humanidade evolui, surge a necessidade de facilitar a transformação desses materiais de maneira simplificada, a fim de facilitar sua utilização e/ou criar novos materiais a partir deles. Dessa forma, o homem passou a modelar a argila, esculpir a madeira e a lapidar a pedra. Outro exemplo desse processo é a descoberta do concreto, que surgiu da necessidade de um material tão resistente quanto a pedra e mais maleável.

Os materiais de construção podem ser divididos em dois grupos: simples e compostos, obtidos diretamente da natureza ou como resultado de processos industriais. O uso adequado desses materiais depende muito de sua resistência, durabilidade, custo e acabamento. O entendimento de suas características permite otimizar muitos aspectos de um negócio, desde o desempenho até a lucratividade (OLIVEIRA, 2015; MUMPEMBE *et al.*, 2020).

Portanto, o setor construtivo depende de materiais de construção que desempenham um papel essencial. Sem esses materiais, os projetos de construção seriam inviáveis (TALANG & SIRIVITHAYAPAKORN, 2016). Três dos materiais de construção mais importantes são concreto, tijolos e as argamassas (OLIVEIRA, 2015; TALANG & SIRIVITHAYAPAKORN, 2016).

### 3.6 ARGAMASSA

A norma NBR 13529, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1995), define que a argamassa nada mais que uma combinação homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, podendo conter aditivos ou adições com propriedades de aderência e endurecimento.

#### 3.6.1 Componentes

De acordo com a NBR 13529 (ABNT, 1995), a argamassa é composta de aglomerantes, agregados miúdos, água e adições e aditivos.

Os aglomerantes são constituídos de cimento e cal. Na norma NBR 7211 (ABNT, 2005), os agregados miúdos são definidos como “agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 0,15 mm, em ensaio realizado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003)”.

A Norma 13529 (ABNT, 1995), estabelece que as adições são substâncias inorgânicas naturais ou industriais que passaram por uma redução significativa em sua granulometria. As substâncias são incorporadas à argamassa para modificar suas propriedades, levando em consideração a quantidade proporcionalmente.

Conforme estabelecido na norma NBR 13529 (ABNT, 1995), o aditivo é descrito como uma substância incorporada em pequenas quantidades em argamassas com a finalidade de melhorar uma ou mais propriedades, seja no estado fresco ou endurecido.

Com o objetivo de aprimorar a tecnologia das argamassas, foram realizados estudos sobre a utilização de materiais alternativos em sua fabricação (JUNIOR e OLIVEIRA, 2022).

Esta pesquisa tem como foco melhorar as propriedades da argamassa com diferentes proporções de rejeito de minério de cobre e facilitar o aumento da sustentabilidade.

Nessa perspectiva, nota-se um crescimento nos estudos com a inserção de rejeitos da indústria de mineração na formulação de argamassas, como por exemplo, em Muniz *et al.*, (2012) Fontes (2013), Neto *et al.*, (2016), Souza Dias (2017), Sinhorelli (2019), Guedes (2020), Passos (2021) e Junior e Oliveira (2022).

### 3.6.1.1 Propriedades da argamassa

#### 3.6.1.1.1 *Densidade de massa no estado fresco*

Dentre os elementos que exercem influência sobre a densidade da argamassa, estão o tipo de elemento utilizado, a quantidade de ar na argamassa e, sobretudo, a escolha do agregado miúdo. De acordo com as afirmações de Caresek (2010), o empacotamento, faz referência ao aumento da aderência entre as partículas de agregados miúdos presentes na argamassa, promovendo um impacto significativo nos índices vazios, porosidade e massa unitária do agregado.

Conforme as observações de Caresek (2010), a seleção de agregados para composição da argamassa deve ser feita com muita cautela, visto que eles representam aproximadamente 60% a 80% do consumo total de material de argamassas. Essa seleção tem um impacto significativo no comportamento da argamassa seja ela no estado fresco ou endurecido.

Segundo Gonçalves Silva (2006), a densidade da argamassa aumenta tanto no estado fresco como no endurecido à medida em que se aumenta a proporção de partículas finas, ou seja, agregados miúdos. O autor ainda menciona que isso ocorre em virtude do empacotamento mais eficiente das partículas finas, resultando em melhor ligação interpartículas dos agregados miúdos que compõem a argamassa.

Araújo (2014) aponta que a densidade ou massa específica da argamassa varia em função do teor de ar e da massa específica dos constituintes. Quanto mais leve a argamassa, mais fácil será o seu manuseio ao longo do tempo, facilitando a aplicação da argamassa pelos trabalhadores e, conseqüentemente aumentando a produtividade da operação (TURRA, 2016).

Um método para análise da densidade da argamassa está descrito na norma NBR 13278 (ABNT, 2005). A Tabela 2 apresenta a classificação das argamassas com base nas propriedades no estado fresco.

**Tabela 2** - Classificação das argamassas em função da densidade de massa no estado fresco.

Classe	Densidade da massa no estado fresco (Kg/m <sup>3</sup> )	Método de Ensaio
D1	≤1400	
D2	1200 a 1600	
D3	1400 a 1800	ABNT NBR 13278:2005
D4	1600 a 2000	
D5	1800 a 2200	
D6	>2000	

Fonte: Adaptada ABNT NBR 13281:2005, Tabela 5, p. 4.

### 3.6.1.1.2 Trabalhabilidade e índice de consistência da argamassa no estado fresco

Schankoski *et al.*, (2015), afirmou que diversos elementos que afetam a trabalhabilidade da argamassa. Entre esses fatores estão incluídos a quantidade de água adicionada à mistura, a presença de aditivos que melhoram a plasticidade da massa, o tipo e a quantidade de cimento utilizado, além do tipo de agregado miúdo selecionado, que pode apresentar variações em termos de forma e textura.

A trabalhabilidade é reconhecida como a principal propriedade da argamassa em seu estado inicial e é fundamental para assegurar as características desejáveis quando endurecida (SCHANKOSKI *et al.*, 2015). Durante a fase plástica, é importante que a argamassa possua uma trabalhabilidade adequada para facilitar o assentamento dos blocos, além de manter uma capacidade de retenção de água suficiente para garantir a hidratação do cimento.

De acordo com as afirmações de Castro (2016), a trabalhabilidade é a característica das argamassas em seu estado fresco que influencia a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e finalizadas, garantindo uma distribuição uniforme.

A trabalhabilidade de uma argamassa é influenciada por diferentes propriedades. Como mencionado por Castro (2016), a consistência e a plasticidade são os principais fatores que afetam a trabalhabilidade. Além disso, a norma ASTM C270-08 (2008, p.6) também destaca a coesão e a aderência como fatores importantes na trabalhabilidade das argamassas.

Para padronizar a avaliação da trabalhabilidade, a norma NBR 13276 (ABNT, 2016) estabeleceu a utilização do ensaio para o índice consistência como descrito na normativa citada.

Esse ensaio tem a finalidade de medir o diâmetro de espalhamento da argamassa, tal procedimento dá-se sobre uma mesa de superfície plana, onde é colocado no centro da mesa um tronco-cônico e preenchido com argamassa fresca em três camadas.

#### 3.6.1.1.3 Resistência à compressão da argamassa

A resistência à compressão de argamassas de revestimento é definida dependente principalmente do tipo e do consumo de aglomerantes (cimento, cal e etc.), da granulometria dos agregados, assim como da relação água/ aglomerante (SINHORELLI, 2019).

O cimento é classificado como o principal aglomerante por conferir resistência mecânica as argamassas. Contudo, para argamassas de revestimento não se faz necessário que apresentem valores elevados de resistência mecânica, tendo em vista que isso pode ocasionar redução da capacidade de deformação, a resistência ao impacto e até mesmo a capacidade de aderência (TRISTÃO, 1995).

Outro fator relevante para a resistências das argamassas é a relação água/aglomerante. O aumento da quantidade de água é o principal fator responsável por baixar a matriz da argamassa ao aumentar a porosidade, e conseqüentemente, resulta no declínio da resistência mecânica ((MEHTA & MONTEIRO, 2008). Tal fator pode ser comprovado pela lei de Duff Andrew Abrams (1919) que atestou que a resistência mecânica é inversamente proporcional ao valor da relação de água/aglomerante.

Nos últimos anos, diversos autores como Silva *et al.* (2010), Andrejkovicová *et al.* (2014), Palamar *et al.* (2015), Shoukry *et al.* (2016), Dallagnol (2018) e Barros (2018), provaram que a utilização de rejeitos minerais em grandes quantidades na produção de argamassas resulta em menor resistência à compressão.

O método para se obter a resistência à compressão de argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos no estado endurecido é estabelecido pela Norma NBR 13279 (ABNT, 2005). Na Tabela 3 apresentada a seguir encontram-se os valores de classificação das argamassas com base nessa propriedade mecânica.

**Tabela 3** - Classificação das argamassas em função da resistência à compressão axial simples no estado endurecido.

Classe	Resistência à Compressão (MPa)	Método de Ensaio
P1	≤ 2,0	
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	ABNT NBR 13279:2005
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	> 8,0	

Fonte: Adaptada ABNT NBR 13281:2005.

#### 3.6.1.1.4 Resistência à tração na flexão da argamassa

Dentre as demandas mecânicas atuantes em revestimentos argamassados, a flexão é uma das mais importantes para se analisar o desempenho de argamassas. Haja vista que durante a sua utilização, ela esteja sujeita a movimentos de retratação hidráulica e térmica, além de ações extrínsecas que podem causar tensões internas de tração. Além disso, podem surgir manifestações patológicas na forma de fissuras, quando essas tensões internas ultrapassam o limite de resistência (FIORITO, 2005).

De acordo com Carvalho Junior *et al.*, (2005), os principais componentes da argamassa, como o agregado miúdo, o cimento Portland e a cal, têm influência direta na resistência mecânica do material. Os pesquisadores observaram que um aumento na proporção de aglomerantes resulta em uma diminuição na resistência à tração na flexão. A granulometria do agregado é um outro fator que desempenha um papel importante, pois uma distribuição descontínua pode prejudicar as propriedades mecânicas da argamassa. Mais dois fatores que podem afetar a resistência é a quantidade de água e aditivos químicos.

Fontes *et al.* (2016), avaliaram em sua pesquisa o desempenho mecânico de argamassas com rejeito e obtiveram resultados expressivos. A razão desse desempenho se deve ao fato de haver uma formação de uma matriz mais contínua favorecendo a formação de produtos de hidratação. Vale reiterar que, a relação água/cimento em argamassas com adições de rejeito é maior, e a menor dimensão diametral média dos agregados proporciona uma criação de uma estrutura com maior arranjo o que acarreta no melhor desempenho mecânico.

A resistência à tração na flexão é determinada seguindo todas as diretrizes estabelecidas pelo método da NBR n° 13279 (ABNT, 2005). Na Tabela 4 estão apresentados os valores de classificação para argamassas quanto à tração.

**Tabela 4** - Classificação das argamassas em função da resistência à tração na flexão no estado endurecido.

Classe	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Método de Ensaio
R1	≤ 1,5	
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	ABNT NBR 13279:2005
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	> 3,5	

Fonte: Adaptada ABNT NBR 13281:2005.

#### 3.6.1.1.5 Resistência de aderência à tração da argamassa

De acordo com as diretrizes estabelecidas pela NBR 13528 (ABNT, 2019), a resistência de aderência à tração ( $R_a$ ) da argamassa refere-se à máxima tensão suportada por uma área específica do revestimento (corpo de prova) na interface de avaliação, quando submetida a uma força de tração normal.

O ensaio de resistência de aderência à tração é fundamental para se verificar a interação das camadas que compõem a argamassa, o qual determina o valor da tensão de aderência máxima suportada por ela, bem como identifica a interface que apresenta menor resistência às tensões atuantes. Dessa forma, é possível garantir a qualidade do revestimento, seja com acabamento em pintura ou em revestimento cerâmico (ALVARES, 2017).

À aderência da argamassa (revestimento), como destacado por Franciscon (2007), é influenciada pelas propriedades da massa em seu estado fresco, pelos procedimentos de execução do revestimento, pelas características e natureza da superfície de base e por sua limpeza superficial.

No que tange à classificação dos resultados segundo a NBR n° 13749 (ABNT, 2005), a norma informa que o ensaio só será aceito se de cada 12 (doze) corpos de prova de revestimento



argamassados, pelo menos 8 (oito) alcançarem valores de  $R_a \geq 0,30$  MPa para revestimento externos e de  $R_a \geq 0,20$  MPa para revestimentos internos com acabamento em pintura.

### 3.7 PROPRIEDADES DE AVALIAÇÃO TÉRMICA E ISOLAMENTO TÉRMICO EM ARGAMASSA

#### 3.7.1 Capacidade de amortecimento e atraso térmico

Papst (1999) define a capacidade de amortecimento como uma propriedade de fechamento que visa reduzir a amplitudes das variações térmicas, enquanto, Rivero (1986) discorre como a relação entre a amplitude de temperatura superficial interna de um fechamento e a amplitude da temperatura do ambiente externo.

Para o coeficiente de amortecimento ( $\mu$ ), em regimes cíclicos com temperaturas internas constantes, o valor será sempre inferior a 1 ( $\mu < 1$ ), e quanto menor for seu coeficiente maior será a capacidade de amortecimento do fechamento (RIVERO, 1986).

De acordo com Rivero (1986), o atraso ou retardo térmico ( $\phi$ ) é o tempo necessário para que haja uma diferença térmica entre temperatura do ambiente externo e o ambiente interno nas faces (superfícies) opostas de um fechamento. De acordo com o autor, esse fechamento depende dos parâmetros envolvidos no processo de propagação de calor em regime variável, como a condutividade térmica, calor específico, densidade absoluta e espessura.

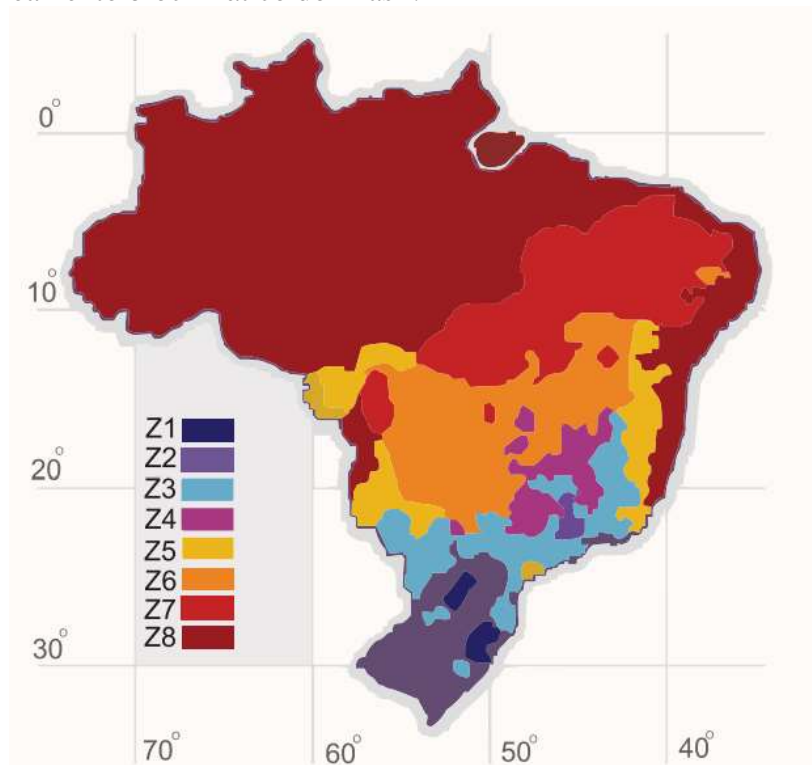
Segundo Ghisi e Lamberts (1998a), o atraso térmico é conceituado como o tempo decorrente entre períodos em que a temperatura máxima do ambiente ocorre no exterior e interior de uma edificação, quando há um fluxo de calor através de um componente construtivo submetido a uma variação periódica da temperatura do ambiente externo. Logo, é válido afirmar que o atraso térmico depende da capacidade térmica de um componente construtivo, assim como da ordem das camadas das faces opostas do material.

Conforme Ghisi e Lamberts (1998b), uma placa homogênea argamassada (corpo de prova) com espessura “e” deve ser submetida a um regime térmico com período de 24 horas para se obter o atraso térmico.

Assim, a análise térmica dos materiais utilizados nas construções tem recebido crescente atenção desde a publicação da norma NBR 15.575 (ABNT, 2013). Esta norma estabelece que as edificações devem cumprir requisitos de desempenho térmico, levando em consideração a

região bioclimática determinada pela norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005), como pode ser observado na Figura 2.

**Figura 2** - Zoneamento bioclimático do Brasil.



Fonte: ABNT, 2005.

No contexto da transferência de calor, a condutividade térmica é amplamente reconhecida como uma propriedade essencial dos materiais (STANCATO, 2000). Ela representa a quantidade de calor transmitido através de um material considerado homogêneo, em regime estacionário, por unidade de espessura, unidade de área e unidade de tempo, quando há uma diferença unitária de temperatura entre suas faces.

Os materiais isolantes se caracterizam por ter baixa condutividade térmica, em virtude da grande quantidade de ar confinado em seu interior. A norma NBR 15.220 (ABNT, 2005) contém informações sobre a condutividade térmica e densidade de massa de diversos materiais utilizados na construção civil. A Tabela 5 a seguir, apresenta os valores de atraso térmico permitido para as oito zonas bioclimáticas do Brasil.

**Tabela 5** – Valores de atraso térmico definido e permitido por norma para as zonas bioclimáticas.

Zonas	Atraso Térmico
Z1 e Z2	$\varphi \leq 4,3$
Z4, Z6 e Z7	$\varphi \geq 6,5$
Z3, Z5 e Z8	$\varphi \leq 4,3$

Fonte: Adaptada da norma NBR 15520-3 (ABNT, 2005).

A condução térmica também está relacionada a outros fatores. Segundo Vittorino, Sato e Akutsu (2003), ela é inversamente proporcional à quantidade de ar presente no material e diretamente proporcional ao teor de umidade. Além disso, a microestrutura do agregado também desempenha um papel importante, onde agregados com estrutura cristalina e poros abertos têm maior capacidade de condução de calor em comparação com agregados de estrutura vítrea e poros fechados.

Barros (2018), comprovou que propriedades térmicas de argamassa contendo vermiculita possuem baixa condução térmica, constatando assim, uma redução significativa na condutividade térmica. Quando ocorreu a substituição total do agregado por vermiculita, foi observada uma diminuição de até 82% na condutividade térmica da argamassa. Essa redução foi de 54% quando a substituição do agregado foi de 50%.

Da mesma forma, Koksai, Gencel e Kaya (2015) também observaram uma redução na condutividade térmica com o aumento da relação entre vermiculita e cimento. Em suas análises, eles observaram uma redução de aproximadamente 28% e 58% na condutividade térmica.

Diante desses estudos faz-se necessário avaliar as propriedades térmicas em argamassas com substituição parcial de diferentes proporções de rejeitos de minério de cobre podem alterar a sua condutividade térmica.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 LOCAL DO EXPERIMENTO

O experimento foi conduzido no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAME) e no Laboratório Multiusuário de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (LAMDEM), ambos pertencentes ao Instituto de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais (IPCM); no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LACRA) e no Núcleo de Estudos Aplicados em Ambiente Animal e Inovações Tecnológicas (NESA<sup>3</sup>TEC), pertencentes ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola; no Laboratório de Materiais e Técnicas de Construções (LABMATEC), do curso de Graduação em Engenharia Civil e no Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEM), do curso de Engenharia Mecânica, localizados na Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro-BA.

O município encontra-se distante a 507 Km da capital, está localizado a 9°26'18"S e 40°30'19"W, com altitude média de 369 m e índice pluviométrico anual de 393 mm, apresenta clima tropical semiárido, tipo BshW, seco e quente, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger.

### 4.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DO ESTUDO

Para avaliação do comportamento da argamassa com utilização de rejeito de cobre, foi realizado um planejamento experimental dos ensaios. Este planejamento experimental foi fundamental para obtenção de respostas, as quais foram necessárias ao longo da execução deste experimento e, portanto, foram delineadas neste estudo duas variáveis, as de controle e as de resposta.

A seguir é apresentado o fluxograma da Figura 3, que de forma simplificada e descreve as etapas que constituíram o planejamento experimental do presente estudo.

**Figura 3** - Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: Autor, 2024.

#### 4.2.1 Variáveis de controle

Neste trabalho, utilizou-se 4 (quatro) critérios como variáveis de controle: idade de ruptura, traço adotado, relação água/cimento e a proporção de substituição parcial de rejeito, os quais estão detalhados posteriormente.

##### 4.2.1.1 Idade de ruptura

Adotou-se duas idades de ruptura dos corpos de provas estipuladas em 14 e 28 dias. As idades escolhidas justificam-se porque permitem avaliar o comportamento da curva de resistência da argamassa, além do efeito comparativo com outros estudos semelhantes e

descritos na literatura, como por exemplo, os estudos de Santiago (2018), Guedes (2020) e Passos (2021).

#### 4.2.1.2 Traço adotado

O traço adotado para esta pesquisa foi de 1:4. As proporções de cimento, areia e rejeito utilizadas são apresentadas no item: Produção de Argamassa.

#### 4.2.1.3 Relação água/cimento (a/c)

A relação água/cimento (a/c) utilizada neste trabalho foi definida em função da consistência da mistura.

#### 4.2.1.4 Proporção de substituição parcial de rejeito (%)

Para esta pesquisa utilizou-se 5 (cinco) proporções de substituição de agregado miúdo por rejeito de cobre, essas proporções foram adotadas levando em consideração os parâmetros de proporção das pesquisas descritas no item 4.2.1.1.

A Tabela 6 a seguir, apresenta as nomenclaturas estabelecidas para cada percentual adotado.

**Tabela 6** – Composição percentual de substituição para os tratamentos avaliados.

Nomenclaturas dos Tratamentos	Proporção de Substituição de Rejeito (%)
T0	Sem adição (testemunha)
T1	Adição de 10%
T2	Adição de 20%
T3	Adição de 30%
T4	Adição de 40%
T5	Adição de 50%

Fonte: Autor, 2024.

#### 4.2.2 Variáveis de resposta

Nesta pesquisa, adotou-se como variáveis de resposta da argamassa os parâmetros do estado fresco (trabalhabilidade, índice de consistência e densidade de massa), e estado endurecido (resistência à tração, resistência à compressão axial simples, resistência de aderência à tração e avaliação térmica.) Logo, a decisão por utilizar essas variáveis justificou-se pelo fato de que as principais alterações no comportamento dos parâmetros no estado fresco e estado endurecido das argamassas podem ser analisadas através destas variáveis. Além disso, é pertinente justificar que foram selecionadas por se encontrarem presentes em outras pesquisas e estudos com a mesma temática, criando desta forma, uma base de comparação de resultados entre as pesquisas.

A apresentação da Tabela 7 a seguir, relaciona todas as variáveis de controle e de resposta, e assim, foi possível obter o programa experimental desenvolvido para este estudo, o qual pode ser observado no item 4.2.

**Tabela 7** – Relação entre as variáveis de controle, resposta e corpos de prova.

Argamassa Produzida	Relação a/c	Resistência à Tração na Flexão		Resistência à Compressão Axial Simples		Resistência de Aderência à Tração		Avaliação Térmica
		Idade de Ensaio (em dias)		Idade de Ensaio (em dias)		Idade de Ensaio (em dias)		Idade de Ensaio (em dias)
		14	28	14	28	14	28	28
T0	Em função da consistência da mistura	3	3	6	6	12	12	5
T1		3	3	6	6	12	12	5
T2		3	3	6	6	12	12	5
T3		3	3	6	6	12	12	5
T4		3	3	6	6	12	12	5
T5		3	3	6	6	12	12	5
<b>Nº de Corpos de Prova por Ensaio</b>		36		72		144		30
<b>Total de Corpos de Prova</b>		282						

Fonte: Autor, 2024.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO E DOS MATERIAIS

#### 4.3.1 Cimento portland

Para o presente estudo, utilizou-se cimento CP II-F-32 (Cimento Portland com Adições de Fíler), com características de secagem rápida, versatilidade de aplicações e suas propriedades atendem a produção de argamassas de assentamento e revestimento. Dessa forma, será possível avaliar a verdadeira influência do rejeito de cobre na substituição parcial dos agregados miúdos. As características físicas, químicas e mecânicas do cimento utilizado foram fornecidas pelo fabricante, as quais podem ser observadas na Tabela 8 apresentada a seguir.

**Tabela 8** - Características químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado conforme a fabricante APODI.

Características	Determinações		Resultados Obtidos	Especificações NBR 16697 (ABNT, 2018)
Químicas	Teores (%)	PF	9,53	≤ 12,5
		MgO	4,06	N/A
		SO <sub>3</sub>	2,92	≤ 4,5
		RI	2,14	≤ 7,5
Físicas	Finura	#200	1,6	≤ 12,0
		#325	11,6	N/A
	Blaine	( <i>cm<sup>2</sup>/g</i> )	4720	N/A
	Massa específica	( <i>g/cm<sup>3</sup></i> )	3,02	N/A
	Tempo de pega	Início (min)	135	≥ 60
		Fim (min)	195	≤ 600
	Expansibilidade a quente (mm)		0,21	≤ 5,0
Mecânicos	Resistência à compressão	3 dias	22,5	≥ 10,0
		7 dias	30,5	≥ 20,0
		28 dias	39,3	≥ 32,0

Fonte: APODI, 2024.



### 4.3.2 Agregado miúdo

Utilizou-se como agregado miúdo para formulação da argamassa, areia extraída do Rio São Francisco na região de Juazeiro-BA/ Petrolina-PE.

Assim, a massa unitária foi calculada utilizando a equação proposta pela NBR NM 45 (ABNT, 2006). (Equação 1).

$$p = \frac{m}{V} \quad \text{Eq. (1)}$$

em que:

( $p$ ) = massa unitária ( $g \cdot cm^{-3}$ );

( $m$ ) = massa ( $g$ );

( $V$ ) = volume do recipiente ( $cm^3$ ).

A massa específica foi determinada pela expressão proposta pela norma NBR NM 52 (ABNT, 2009), sendo:

$$y = \frac{m}{(L_f - V_i)} \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

( $y$ ) = massa específica ( $g \cdot cm^{-3}$ );

( $m$ ) = massa seca ( $g$ );

( $L_f$ ) = leitura no frasco Chapman ( $cm^3$ );

( $V_i$ ) = volume inicial de água ( $cm^3$ ).

Para o valor do volume inicial ( $V_i$ ), utilizou-se  $200 \text{ cm}^3$  de água. Cabe colocar, que este valor foi padronizado de acordo com o princípio de Le Chatelier mencionado por Atkins e Jones (2006).

O índice de vazios foi calculado pela fórmula proposta pela NBR 16972 (ABNT, 2021), sendo:

$$E_v = \frac{100 * [(y * p_w) - p]}{(y * p_w)} \quad \text{Eq. (3)}$$

em que:

$(E_v)$  = índice do volume de vazios (%);

$(\gamma)$  = massa específica relativa média ( $g \cdot cm^{-3}$ );

$(p_w)$  = massa específica da água ( $g \cdot cm^{-3}$ );

$(p)$  = massa unitária média ( $g$ ).

Para o valor de massa específica da água ( $p_w$ ), adotou-se  $1g \cdot cm^{-3}$ , uma vez que este valor é tabelado conforme é citado pela literatura.

Além das etapas supracitadas anteriormente, realizou-se ainda a determinação do percentual em massa ( $g$ ) que cada faixa estabelecida das partículas representou na massa total de rejeito ensaiada. Essa determinação englobou a análise granulométrica, módulo de finura, diâmetro máximo e, posteriormente, a construção da curva de distribuição granulométrica do resíduo analisado em comparação a NBR 7211/2005, como estabelece as diretrizes estabelecidas por esta norma.

Assim, a Tabela 9 traz um demonstrativo dos valores determinados para todos os parâmetros citados ao longo desta seção.

**Tabela 9** – Valores determinados para todos os parâmetros físicos do agregado miúdo.

Determinações	Normas utilizadas	Resultados obtidos		
		Abertura da peneira	Porcentagem retida (em massa)	
Análise granulométrica	NBR 7211 (ABNT, 2005)	ABNT (mm)	Individual	Acumulada
		9,5	0	0
		6,3	0	0
		4,75	0	0
		2,36	0,82	0,27
		1,18	0,17	0,33
		0,6	17,85	6,28
		0,3	169,75	62,86
		0,15	77,05	88,54
		Fundo	33,91	100
Diâmetro máximo (mm)	NBR 7211 (ABNT, 2005)	1,18		
Módulo de finura	NBR 7211 (ABNT, 2005)	1,58		
Massa unitária ( $\frac{g}{cm^3}$ )	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,57		
Massa específica ( $\frac{g}{cm^3}$ )	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,64		
Índice de vazios (%)	NBR 16972 (ABNT, 2021)	40,67		

Fonte: Autor, 2024.

### **4.3.3 Água**

O fornecimento de água para a condução desta pesquisa deu-se pelo abastecimento local, o qual fornece água ao Campus de Juazeiro da Universidade Federal do Vale do São Francisco.

### **4.3.4 Rejeito de cobre**

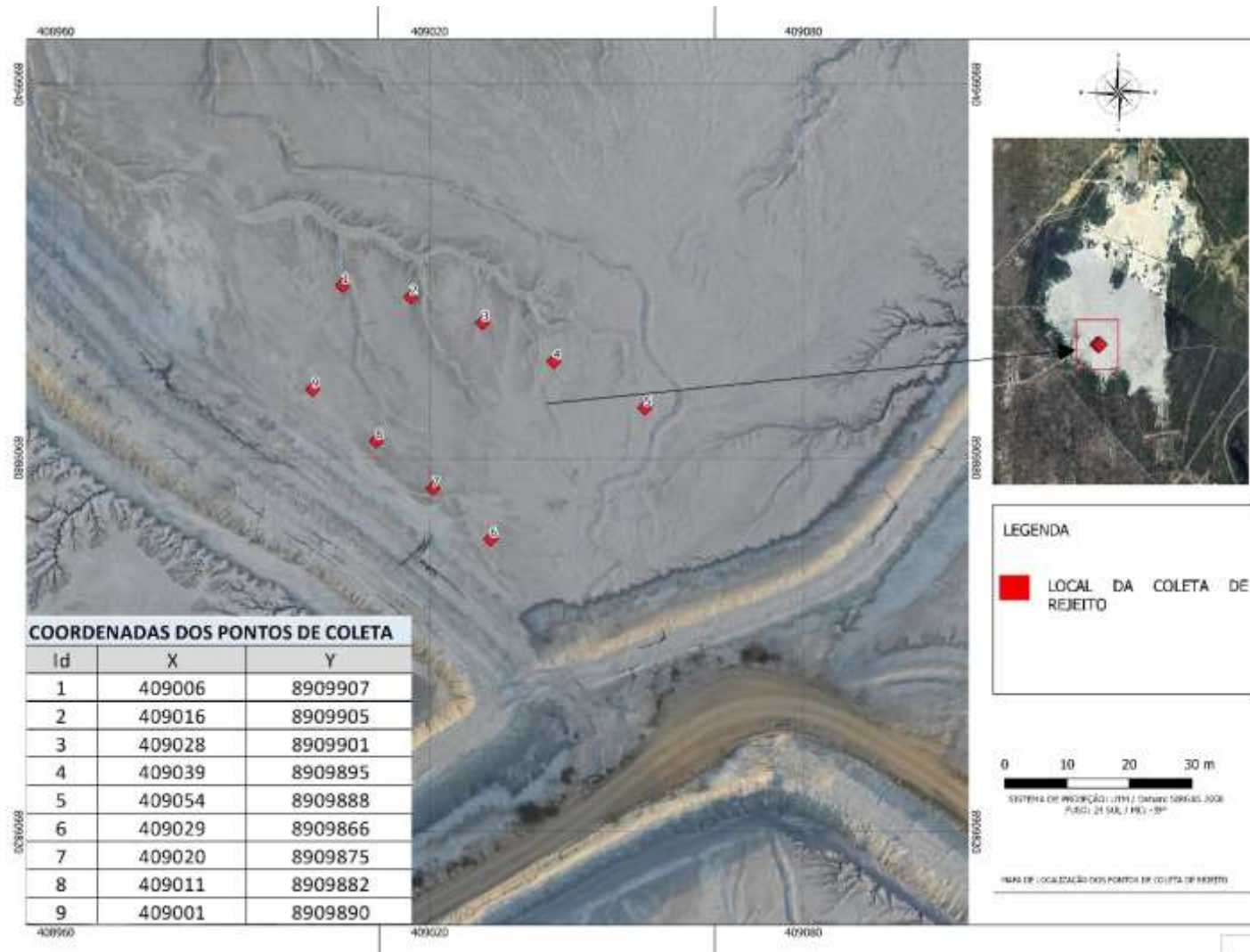
Para o desenvolvimento desta pesquisa, utilizou-se o rejeito de mineração de cobre como substituto parcial dos agregados miúdos, coletado na barragem de rejeitos da Mina Caraíba, localizada na Fazenda Caraíba do município de Jaguarari-BA. A coleta e caracterização do rejeito foram conduzidas em conformidade aos métodos descritos nas seções subsequentes.

#### **4.3.4.1 Coleta das amostras de rejeito**

Foram coletados aproximadamente 200 Kg de rejeito, as amostras foram coletadas em vários pontos da barragem de rejeitos e seguiu-se todas recomendações da norma NBR 10007 (ABNT, 2004). Ademais, as amostras foram colocadas dentro de sacos plásticos e, em seguida foram encaminhadas para os laboratórios da Universidade Federal do Vale do São Francisco, os quais estão elencados no item 4.1 deste documento.

Vale ressaltar, que em laboratório, as amostras foram homogeneizadas, quarteadas e reduzidas, para que ocorresse os ensaios em conformidade a norma NBR NM 27 (ABNT, 2001). No mapa da Figura 4, é apresentada a área e os pontos de coleta (em vermelho) do material, e na Figura 5 pode ser observado um colaborador da empresa realizando a coleta do rejeito.

**Figura 4** – Extensão da área da barragem de rejeitos e pontos de coleta do material.



Fonte: Autor, 2024.

**Figura 5** - Colaborador da empresa realizando a coleta do material.



Fonte: Autor, 2024.

#### 4.3.4.2 Métodos de caracterização utilizados

Para caracterização do rejeito da Mina Caraíba, foram realizados testes físicos, químicos e ambientais, cujas metodologias serão descritas a seguir.

##### 4.3.4.2.1 Caracterização física

Para caracterização física do rejeito foram feitas as mesmas análises propostas para a caracterização do agregado miúdo (item 4.3.2).

Na Tabela 10 podem ser observados todos os parâmetros determinados para o rejeito de cobre.

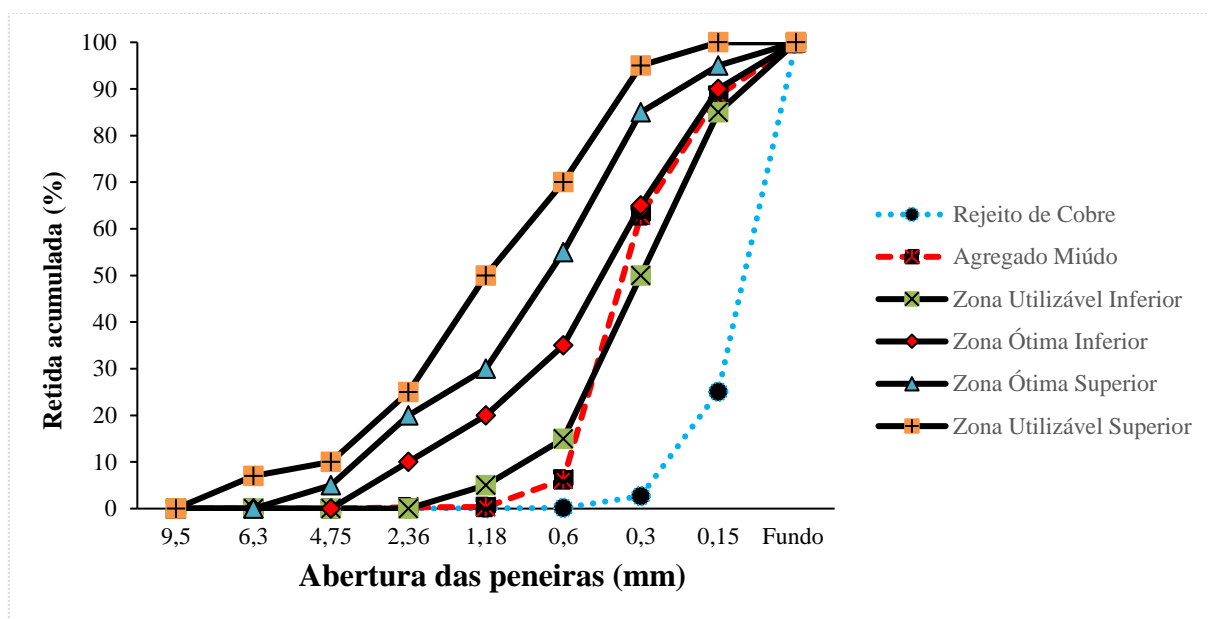
**Tabela 10** – Valores determinados para todos os parâmetros físicos do rejeito de cobre.

Determinações	Normas utilizadas	Resultados obtidos		
		Abertura da peneira	Porcentagem retida (em massa)	
Análise granulométrica	NBR 7211 (ABNT, 2005)	ABNT (mm)	Individual	Acumulada
		9,5	0	0
		6,3	0	0
		4,75	0	0
		2,36	0	0
		1,18	0,19	0,06
		0,6	0,22	0,13
		0,3	7,70	2,70
		0,15	67,02	25,04
		Fundo	224,82	100
Diâmetro máximo (mm)	NBR 7211 (ABNT, 2005)	0,3		
Módulo de finura	NBR 7211 (ABNT, 2005)	0,28		
Massa unitária ( $\frac{g}{cm^3}$ )	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,60		
Massa específica ( $\frac{g}{cm^3}$ )	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,83		
Índice de vazios (%)	NBR 16972 (ABNT, 2021)	43,56		

Fonte: Autor, 2024.

Na Figura 6 são apresentadas as curvas granulométricas dos materiais utilizados como agregado miúdo em comparação aos limites determinados e preconizados pela norma NBR 7211 (ABNT, 2005). Pode-se perceber que a maior parte da curva granulométrica do agregado miúdo (linha vermelha) se encontra dentro dos limites estabelecidos pela norma, enquanto que o rejeito (linha azul) está fora dos limites estabelecidos por esta mesma norma. Vale citar que este comportamento da distribuição da curva gerada para o rejeito de cobre já era esperado, visto que apresentou valor de módulo de finura (0,28) baixo. Para determinação do diâmetro máximo (mm), considerou-se o valor da abertura da peneira correspondente a massa retida acumulada ( $\leq 5\%$ ), como determina a NBR 7211:2005.

**Figura 6** – Curvas granulométricas do agregado miúdo (areia e rejeito) em comparação aos limites estabelecidos pela NBR7211/2005.



Fonte: Autor, 2024.

#### 4.3.4.2.2 Caracterização química

A fim de validar a caracterização química do rejeito, optou-se por utilizar as técnicas de análises por Fluorescência de Raios X (FRX), Difrátograma de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplado a Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), as quais foram realizadas no laboratório de Ciências dos Materiais da UNIVASF.

O método de FRX é classificado como uma técnica analítica poderosa, e nesse trabalho, foi utilizada para identificar e quantificar elementos e/ou substâncias presentes nas amostras de rejeito de cobre. Além disso, esta técnica é de fundamental importância para entender a composição química e avaliar a presença de impurezas e/ou contaminantes que podem afetar a qualidade das amostras de rejeito de cobre.

Para análise de FRX da amostra de rejeito de cobre, utilizou-se o equipamento de bancada, o analisador XRC CTX 800 (Bruker), equipado com uma fonte de excitação alvo de Rh de 50 Kv e 4W, um detector SSD com janela de grafeno e um escudo detector empregados para analisar composições elementares. Entretanto, este equipamento só é capaz de detectar elementos com número atômico entre 11 e 92 (Na – U).

Os resultados obtidos através da análise da FRX para os óxidos principais encontrados no rejeito analisado estão dispostos na Tabela 11.

**Tabela 11** – Caracterização química por FRX do rejeito de cobre.

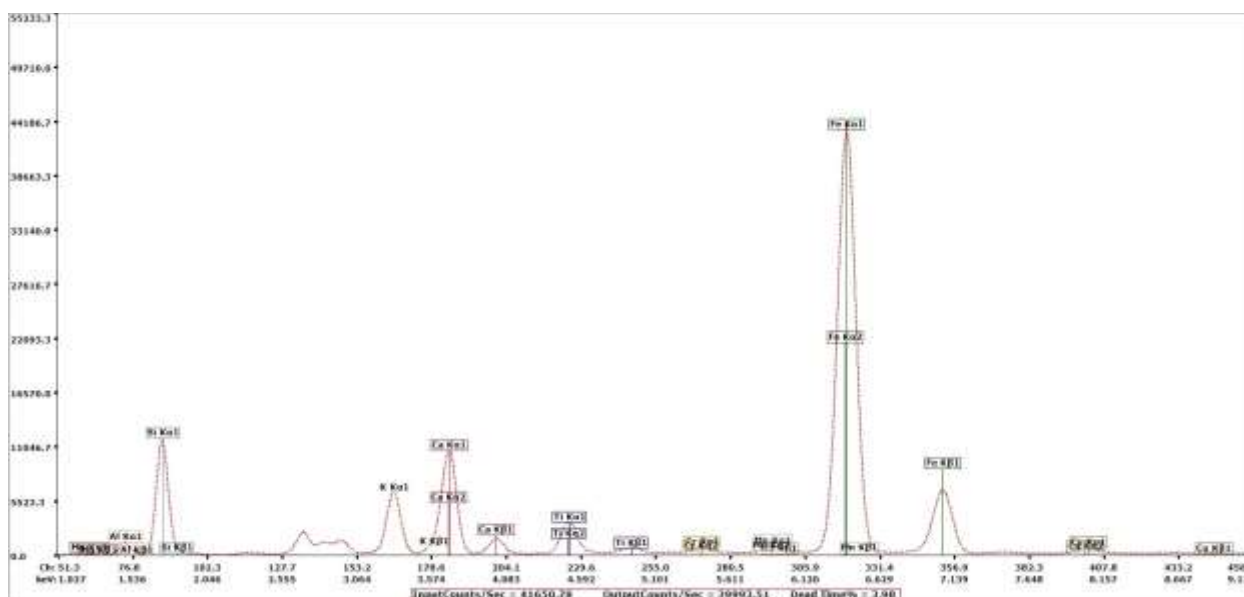
Rejeito de Cobre	
Composto	% (massa)
Óxido de Magnésio – MgO	6,02
Óxido de Alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,18
Óxido de Silício - SiO <sub>2</sub>	46,70
Óxido de Potássio - K <sub>2</sub> O	2,05
Cobre – Cu	0,10
Ferro – Fe	6,47
Cálcio – Ca	2,39

Fonte: Autor, 2024.

Na Tabela 11 em questão, é importante destacar a existência do óxido de magnésio que pode ocasionar reações que leva à formação de produtos expansivos, o qual pode provocar uma redução na resistência da argamassa ao longo do tempo. Portanto, é necessário analisar minuciosamente o elemento MgO e verificar, no caso de substituições, os limites permitidos em termos percentuais pela legislação em vigor.



**Figura 7-** Espectro gerado na análise de fluorescência por raios X para amostra de cobre analisada.



Fonte: Autor, 2024.

O uso da técnica de DRX é classificado como um método valioso para avaliar a reatividade do material. Neste caso, a amostra foi analisada com o objetivo de identificar as fases amorfas ou cristalinas presentes na estrutura que compõem o resíduo de cobre. Quando predomina a forma cristalina, isso indica baixa reatividade, enquanto que a forma amorfa sugere um potencial pozolânico mais elevado (SOUSA, 2019).

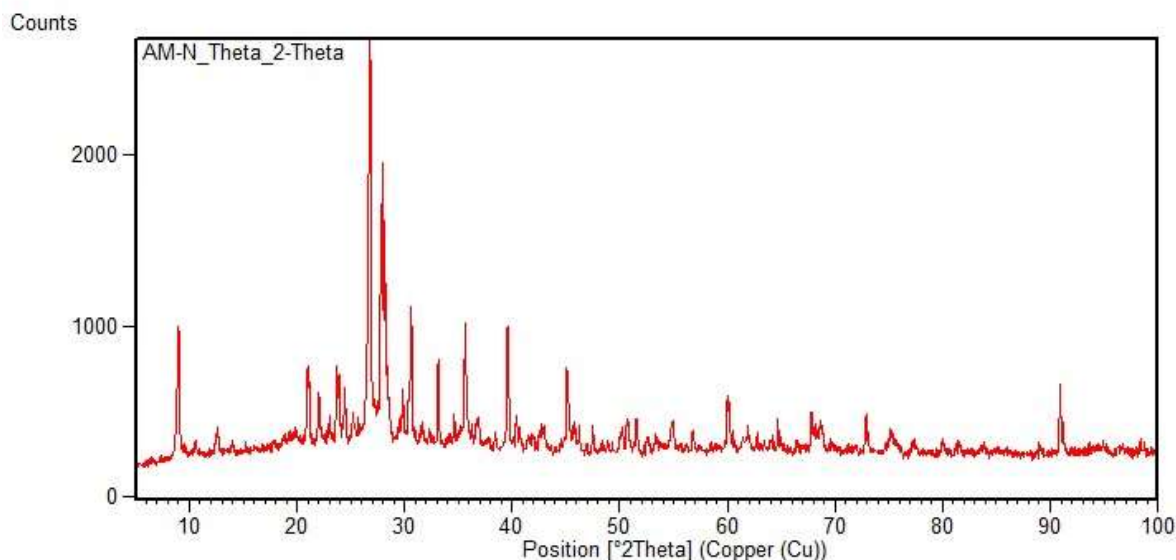
De acordo com Callister (2014), os materiais de natureza cristalina são aqueles que se destacam por apresentarem, em seus difratogramas, formas com uma grande quantidade de picos. Já os materiais com fases amorfas são caracterizados por exibirem curvas com uma forma arredondada e ausência de picos. Assim sendo, um material cristalino refere-se àquele em que os átomos se encontram posicionados em um arranjo que se repete ou é periódico ao longo de grandes distâncias atômicas.

Para análise de DRX da amostra de rejeito de cobre, utilizou-se o equipamento de bancada Difratorômetro de Raios X Rigaku MiniFlex (Rigaku Corporation, Tokyo, Japan), com radiação  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$ ), operando a voltagem de 40KV e corrente de 15mA em uma varredura contínua ( $2\theta$ ) de  $5^\circ$  a  $100^\circ$  com passo de  $0,02^\circ$ , velocidade de varredura de  $20^\circ/\text{min}$  e temperatura ambiente.

Conforme o difratograma da Figura 8 apresentado a seguir, o material apresenta uma

natureza cristalina devido à presença de múltiplos picos de intensidade identificados pelo equipamento, o que orienta a seleção do material analisado em substituição ao agregado miúdo.

**Figura 8** – Difratoograma de Raios X da amostra de rejeito de cobre.

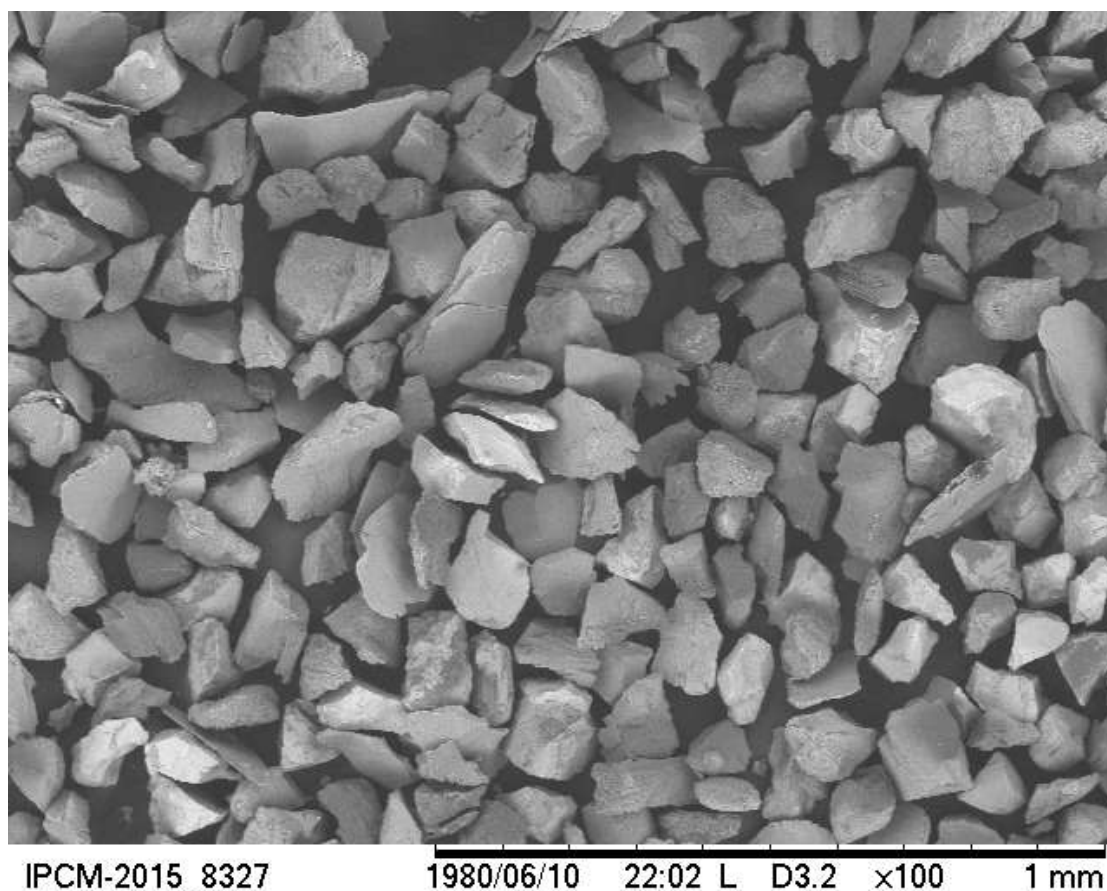


Fonte: Autor, 2024.

A morfologia das partículas que compõem o rejeito de cobre foi obtida através do método microscopia eletrônica de varredura e através da espectroscopia por energia dispersiva foi realizada uma análise elementar da superfície do material, na qual obteve-se uma identificação química qualitativa e quantitativa dos elementos que constituem a amostra de interesse.

Para a análise de morfologia utilizou-se um microscópio do modelo VEGA 3 TESCAN®, tendo diferença de tensão de trabalho de 5 kV, com as amostras metalizadas em ouro (Au), acoplado a um micro analisador EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) da marca OXFORD®, com aceleração de 15 kV. Assim, é possível observar na Figura 9 que as partículas exibem uma configuração irregular e superfícies rugosas.

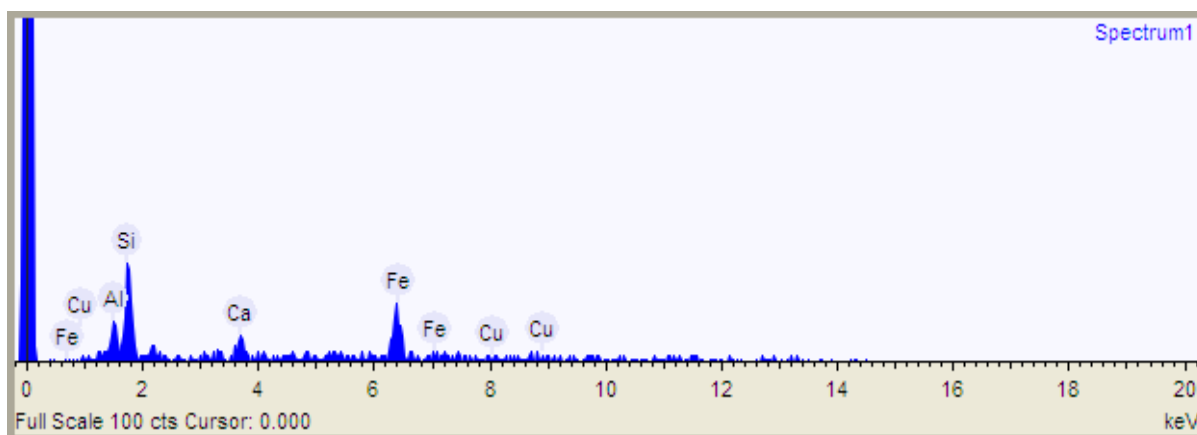
**Figura 9** – A morfologia das partículas que compõem o rejeito de cobre.



Fonte: Autor, 2024.

Na Figura 10 é apresentado o espectro da composição da superfície das partículas presentes na amostra de rejeito de cobre, os quais foram alcançados por meio do método de EDS, enquanto que na Tabela 12 pode-se observar que a amostra analisada possui predominância do elemento alumínio, silício, cálcio, ferro e cobre.

**Figura 10** – Microanálise qualitativa de elementos químicos presentes na amostra de rejeito da mineração de cobre.



Fonte: Autor, 2024.

**Tabela 12** – Percentual dos elementos com predominância no espectro da amostra de rejeito da mineração de cobre.

Elemento	%
Alumínio	9,0
Silício	25,9
Cálcio	6,7
Ferro	57,5
Cobre	1,0

Fonte: Autor, 2024.

#### 4.3.4.2.3 Caracterização ambiental

As análises de caracterização ambiental do rejeito de cobre foram fornecidas pela própria empresa. Para verificação de seu potencial contaminante a empresa utilizou as normativas da ABNT de 2004, as NBR n° 10004 para classificação de resíduos sólidos, NBR n° 10005 para lixiviação e a NBR 10006 para solubilização.

Através da caracterização ambiental do rejeito, é possível traçar possíveis rotas tecnológicas para sua reutilização, tratamento, disposição final e correto manuseio, além de entender os possíveis riscos associados a estes.

Sendo assim, os valores dos ensaios de todos os parâmetros analisados para as amostras de rejeito encontram-se dentro dos limites máximos permitidos de acordo com as normas supracitadas anteriormente. Os resultados para corrosividade, lixiviação e solubilização estão apresentados nas Tabelas 13, 14 e 15, respectivamente.

**Tabela 13** – Resultados do parâmetro pH para o ensaio de corrosividade.

Amostra	Resultado	Limite Aceitável
Rejeito	9,55	2 < pH < 12,5

Fonte: EroBrasil - Caraíba, 2024.

**Tabela 14** – Resultados dos parâmetros para o ensaio de lixiviação.

Parâmetros	Resultado (mg/L)	Limite Aceitável (mg/L)
Arsênio (As) total	< 0,035	1,0
Bário (Ba) total	0,86	70,0
Cádmio (Cd) total	<0,02	0,5
Chumbo (Pb) total	<0,2	1,0
Cromo (Cr) total	<0,07	5,0
Mercúrio (Hg) total	<0,0049	0,1
Prata (Ag) total	<0,10	5,0
Selênio (Se) total	<0,009	1,0

Fonte: EroBrasil - Caraíba, 2024.

**Tabela 15** – Resultados dos parâmetros para o ensaio de solubilização.

<b>Parâmetros</b>	<b>Resultado (mg/L)</b>	<b>Limite Aceitável (mg/L)</b>
Alumínio (Al) total	0,14	0,2
Arsênio (As) total	<0,0051	0,01
Bário (Ba) total	<0,08	0,7
Cádmio (Cd) total	<0,001	0,005
Cobre (Cu) total	<0,008	2,0
Cromo (Cr) total	<0,006	0,05
Ferro (Fe) total	<0,07	0,3
Manganês (Mn) total	<0,003	0,1
Mercúrio (Hg) total	<0,0002	0,001
Prata (Ag) total	<0,005	0,05
Selênio (Se) total	<0,0065	0,01
Sódio (Na) total	5,4	200,0

---

Fonte: EroBrasil - Carafba, 2024.

De acordo com os resultados, o rejeito de minério de cobre fornecido pela empresa é classificado: Resíduo Classe II B – Inerte, segundo aos critérios da NBR 10004 (ABNT, 2004). Ou seja, essa classificação se refere a quaisquer resíduos que, quando analisados de uma forma representativa, conforme a NBR 10007 (ABNT, 2004), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, segundo a NBR 10006 (ABNT, 2004), não tiveram nenhum contato de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água excetuando-se aspectos como: cor, turbidez, dureza e sabor.

#### 4.4 PRODUÇÃO DA ARGAMSSA

De acordo com Maciel *et al.* (1998), a produção da argamassa implica na combinação organizada dos seus componentes, conforme as proporções determinadas e durante um período de cura, utilizando-se de equipamentos específicos para esse propósito ou de maneira manual.

Assim, foram produzidos 15Kg de argamassa de modo manual para cada tratamento e para as duas idades avaliadas. O primeiro passo compreendeu a mistura dos materiais secos (cimento, areia e rejeito) até a obtenção de homogeneidade. A água foi adicionada por partes, até que fosse encontrado a trabalhabilidade e consistência desejada da mistura. Observa-se na Tabela 16, as proporções de cimento, areia, rejeito e o volume de água utilizado até a obtenção da consistência ideal da mistura.

**Tabela 16** – Proporção dos materiais utilizados na produção da argamassa.

Tratamentos	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Rejeito (Kg)	Água (g)
T0	3	12	-	222
T1	3	10,8	1,2	222
T2	3	9,6	2,4	224
T3	3	8,4	3,6	236
T4	3	7,2	4,8	260
T5	3	6,0	6,0	304

Fonte: Autor, 2024.

#### 4.4.1 Ensaios e normas utilizadas

Com o propósito de alcançar os objetivos desta pesquisa e realizar a quantificação das variáveis de interesse, foram conduzidos ensaios no estado fresco e no estado endurecido das argamassas.

##### 4.4.1.1 Ensaios no estado fresco

Foram realizadas duas análises no estado fresco para as argamassas de revestimento, as quais estão descritas a seguir.

#### *4.4.1.1.1 Trabalhabilidade e Índice de Consistência*

No estado fresco, a quantidade de água presente na mistura é um fator determinante para a trabalhabilidade da argamassa. Portanto, para avaliar se uma argamassa tem boa trabalhabilidade é necessário que apresente uma aderência na colher de pedreiro, ou seja, quando a massa possui um bom deslizamento e adere as superfícies. Assim, a trabalhabilidade da argamassa é padronizada através do índice de consistência conforme as diretrizes da NBR nº 13276/2016 da ABNT que mede o diâmetro de espalhamento da argamassa. Logo, pode-se afirmar que o diâmetro de espalhamento e trabalhabilidade é obtido em função da quantidade de água utilizada para se obter uma boa fluidez da massa.

Para tornar o comportamento das argamassas mais compreensível, foram sintetizados os resultados da quantidade de água necessária para obtenção da trabalhabilidade e os resultados do diâmetro de espalhamento (consistência) obtidos na mesa de consistência para cada proporção de rejeito utilizada na confecção das argamassas.

Assim, a determinação do índice de consistência é realizada com base nas diretrizes da norma citada anteriormente.

O ensaio dá-se sobre uma mesa de superfície plana, onde é colocado no centro da mesa um tronco-cônico, sendo este preenchido com argamassa fresca em três camadas. Após o preenchimento de todas as camadas são aplicados 15, 10 e 5 golpes com força e tempo semelhante.

Em seguida, o molde é removido, como pode ser observado na Figura 11, e na sequência são aplicados 30 golpes consecutivos na mesa. Logo após última queda da mesa, o espalhamento do molde tronco-cônico foi medido imediatamente com auxílio de um paquímetro e de posse desse resultado foi obtido o volume de água necessário para obtenção da consistência ideal da mistura, para o traço definido.



**Figura 11** – Ensaio para obtenção do Índice de Consistência.



Fonte: Autor, 2024.

Considerando que a trabalhabilidade das argamassas é uma das propriedades mais importantes, visto que é responsável por garantir características desejáveis no estado endurecido. Medi-la é complexo, tendo em vista que depende da composição dos materiais, do preparo, da umidade e da temperatura, assim, a NBR 13276 (ABNT, 2016), estabeleceu limites para padronizar a trabalhabilidade das argamassas em  $260 \pm 5$  mm.

Dessa forma, para garantir a uniformidade desejada, dentro do limite estabelecido pela norma e com um volume suficiente de massa para envolver os materiais de cada proporção, observou-se, de maneira geral, que o volume de água aumenta à medida que as proporções de rejeito aumentam, conforme descrito no item 4.4.

#### 4.4.1.1.2 Densidade de massa

Neste ensaio, foram empregadas as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 13278 (ABNT, 2005). Utilizando um recipiente com volume conhecido, no qual foi adicionando a argamassa produzida e disposta em três camadas, em cada uma das camadas foi aplicado 20 golpes. Após preencher completamente o recipiente, de modo que a massa estivesse nivelada com o objeto, procedeu-se à sua pesagem.

Os valores aplicados na Equação 4 a seguir, foram obtidos da média aritmética dos valores resultantes das pesagens do recipiente com argamassa.

$$D = \frac{M_c - M_v}{V_r} * 1000 \quad \text{Eq. (4)}$$

em que:

( $D$ ) = densidade ( $\frac{Kg}{m^3}$ );

( $M_c$ ) = média da massa do recipiente com argamassa ( $g$ );

( $M_v$ ) = massa do recipiente vazio ( $g$ );

( $V_r$ ) = volume do recipiente ( $cm^3$ ).

#### 4.4.1.2 Ensaio no estado endurecido

Posteriormente ao estudo de determinação dos parâmetros no estado fresco, as argamassas foram submetidas aos ensaios mecânicos com finalidade de verificar a influência da substituição do agregado miúdo pelas proporções de rejeito adotadas nessa pesquisa.

Para as análises dos parâmetros mecânicos foram realizados os ensaios de resistência à tração na flexão, compressão axial simples, de aderência à tração e o ensaio de avaliação térmica, os quais serão apresentados nos subitens subsequentes.

Além disso, para que houvesse a validação da caracterização ambiental da argamassa produzida a partir de rejeitos de mineração de cobre, utilizou-se os mesmos procedimentos citados no item 4.3.4.2.3 (Caracterização Ambiental do Rejeito) realizada por um laboratório

particular, cujo laudo contendo os resultados encontram-se disponíveis no Anexo A deste trabalho.

#### 4.4.1.2.1 Resistência à tração na flexão

Este ensaio foi determinado seguindo as diretrizes normativas da NBR 13279 (ABNT, 2005).

O ensaio foi realizado imediatamente após a confecção da argamassa, onde foram preparados três corpos de prova prismáticos com dimensões de 40 mm X 40 mm X 160 mm (Figura 12) para cada proporção adotada neste estudo, os quais foram armazenados no laboratório. As rupturas foram realizadas depois de 14 e 28 dias por meio da utilização do equipamento EMIC DL 10000 (Figura13).

A resistência à tração na flexão foi determinada pela equação 5.

$$R_f = \frac{1,5 * F_f * L}{40^3} \quad \text{Eq. (5)}$$

Sendo:

$(R_f)$  = resistência à tração na flexão (MPa);

$(F_f)$  = carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

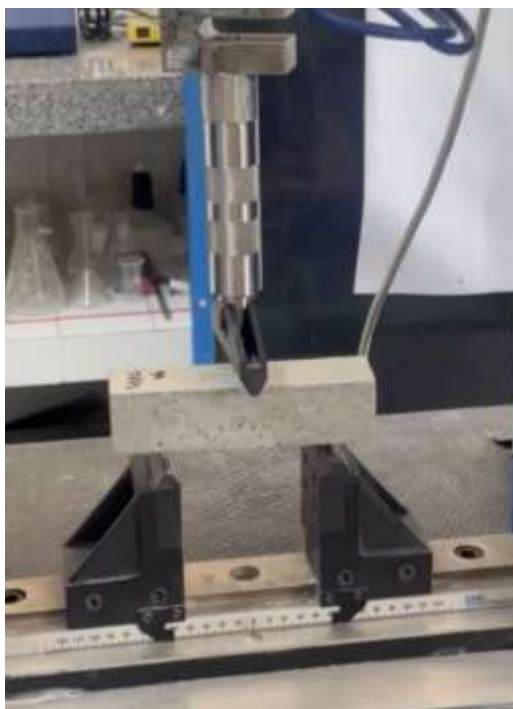
$(L)$  = distância entre os suportes (mm).

**Figura 12** – Modelagem dos corpos de prova para realização do ensaio na tração na flexão.



Fonte: Autor, 2024.

**Figura 13** – Realização do ensaio de resistência à tração na flexão.



Fonte: Autor, 2024.

#### 4.4.1.2.2 Resistência à compressão axial simples

Assim como o ensaio de resistência à tração na flexão, este ensaio também seguiu as diretrizes estabelecidas pela normativa NBR 13279 (ABNT, 2005).

A realização deste ensaio deu-se após o rompimento dos três corpos de prova confeccionados para todas as proporções adotadas nesse estudo e submetidas ao ensaio de resistência à tração na flexão.

Para obtenção da resistência a compressão axial simples aplicou-se uma carga nas superfícies laterais dos corpos de provas, que compreendia uma dimensão de 40 mm X 40 mm, e posteriormente, foi obtida através da equação 6.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

$(R_c)$  = resistência à compressão axial simples (MPa);

$(F_c)$  = carga máxima aplicada (N);

(1600) = área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga de 40 mm X 40 mm ( $mm^2$ ).

Na Figura 14 apresentada a seguir, exemplifica a realização do ensaio de resistência à compressão axial simples.

**Figura 14** – Realização do ensaio de resistência à compressão axial simples.



Fonte: Autor, 2024.

#### *4.4.1.2.3 Resistência de aderência à tração*

Para aplicação do revestimento, foi avaliada a resistência de aderência à tração, verificando a capacidade de adesão da argamassa de acordo com as normas NBR 13528 (ABNT, 2019).

Este ensaio consiste na preparação de uma parede de blocos cerâmicos preparada individualmente para cada proporção adotada a ser aplicada. O revestimento, então, foi aplicado de forma simples sobre a superfície da parede, sem chapisco e com utilização de um delimitador de espessura para se obter maior uniformidade, sarrafo e espátula para finalização.

Além disso, para avaliação do ensaio após o tempo de cura estabelecido nesse estudo, foram realizados 12 furos nas paredes com revestimento de argamassa, com o serra-copo, a uma profundidade de 1 a 5 mm dentro do revestimento. Em seguida, são fixadas pastilhas com a utilização de massa plástica e o arrancamento é feito por meio do equipamento de tração.

Com a utilização de um dispositivo de tração conectado às pastilhas, um dinamômetro da marca Dinateste foi utilizado para realizar o arrancamento e calcular a resistência de aderência, seguindo a norma estabelecida. Essa resistência é determinada pela relação entre a força necessária para realizar o arranque, medida pelo aparelho, e a área do corte realizado, considerando o diâmetro do corpo de prova. Por fim, a resistência de aderência à tração do revestimento foi representada pela média das resistências dos 12 corpos de prova extraídos de cada parede contendo a argamassa de revestimento.

O cálculo de resistência à aderência foi calculado por meio da Equação 7 seguindo as diretrizes da norma da ABNT, a NBR nº 13528 de 2019.

$$R_a = \frac{F}{A} \quad \text{Eq. (7)}$$

Sendo:

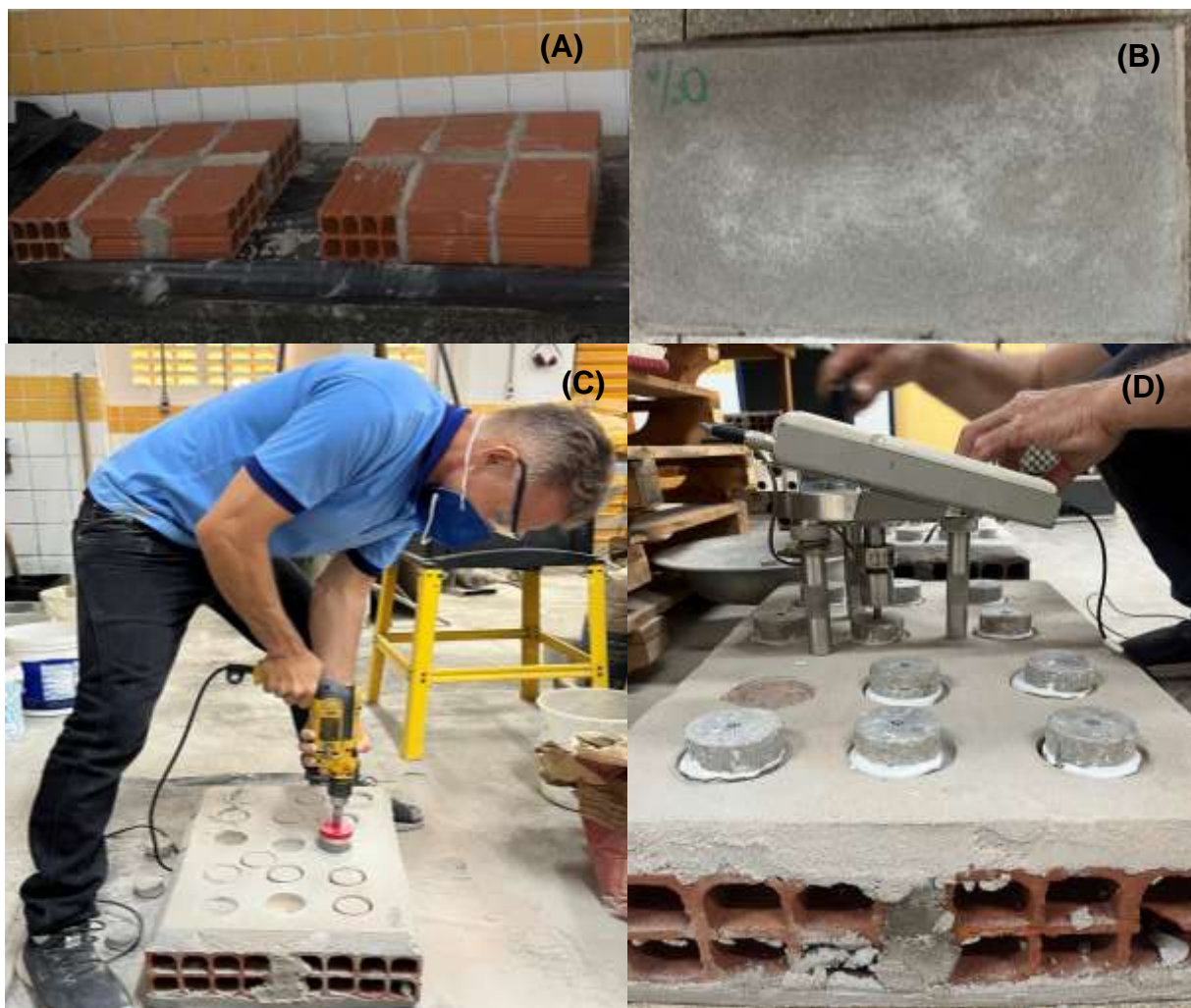
$(R_a)$  = resistência de aderência à tração ao substrato ( $MPa$ );

$(F)$  = força de ruptura ( $N$ );

$(A)$  = área do corpo de prova ( $mm^2$ ).

A Figura 15 apresenta as paredes confeccionadas para receber a argamassa de revestimento, argamassa de revestimento aplicada na parede, perfuração dos 12 corpos de prova para arranque e arrancamento com o equipamento dinamômetro.

**Figura 15** – Ensaio de resistência de aderência à tração: (A) paredes de blocos cerâmicos; (B) argamassa de revestimento aplicada na parede; (C) perfuração dos corpos de prova e (D) arrancamento dos corpos de prova com auxílio do equipamento dinamômetro.



Fonte: Autor, 2024.

#### 4.4.1.2.4 Avaliação térmica

A avaliação térmica das argamassas foi feita a partir da confecção de 5 corpos de prova para cada um dos tratamentos estabelecidos. As dimensões dos corpos de prova foram de 20 cm x 20 cm x 2 cm, comprimento, largura e altura, respectivamente.



**Figura 16** – Corpos de prova para análise de avaliação de térmica.



Fonte: Autor, 2024.

Após o período de 28 dias para a cura e secagem dos corpos de prova, foram submetidos ao ensaio de avaliação térmica com um protótipo desenvolvido em seis escalas de temperatura. O aparelho desenvolvido para essa finalidade pode ser observado na Figura 17.

**Figura 17** – Protótipo de avaliação térmica de materiais.



Fonte: Autor, 2024.

As propriedades térmicas foram obtidas pela determinação do atraso térmico e a capacidade de amortecimento das cinco repetições para os seis tratamentos adotados nessa pesquisa.

O atraso térmico foi calculado através da Equação 8.

$$\varphi = |HPE - HPI| \quad \text{Eq. (8)}$$

Em que:

$(\varphi)$  = atraso térmico ( $h$ );

(*HPE*) = hora de ocorrência do pico de temperatura no ambiente externo (*h*);

(*HPI*) = hora de ocorrência do pico de temperatura no ambiente interno (*h*).

Já a capacidade de amortecimento foi calculada pela equação 7 proposta por Rivero (1986).

$$\mu = \frac{\omega_S}{\theta_S} \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde:

( $\mu$ ) = capacidade de amortecimento ( $^{\circ}C$ );

( $\omega_S$ ) = amplitude de temperatura superficial interna de um fechamento ( $^{\circ}C$ );

( $\theta_S$ ) = amplitude da temperatura superficial externo ( $^{\circ}C$ ).

#### 4.5 TRATAMENTOS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS

Os experimentos para determinação das resistências à tração, à compressão axial simples e de aderência à tração foram realizados em delineamento inteiramente casualizado (DIC). Os ensaios de avaliação térmica foram conduzidos em delineamento em blocos casualizados (DBC), para o bloco considerou-se a temperatura e o tratamento dado pelas proporções de rejeito utilizada. Todos os resultados foram submetidos a análise de variância ao nível de 5% de probabilidade. Na sequência foram submetidas à análise regressão e as médias foram comparadas entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Os modelos de regressão foram selecionados com base no comportamento do fenômeno e na significância dos coeficientes de regressão.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção foram apresentados e analisados os resultados obtidos dos ensaios realizados para argamassa de revestimento a base de rejeito de cobre nos estados frescos e endurecido, conforme o planejamento experimental.

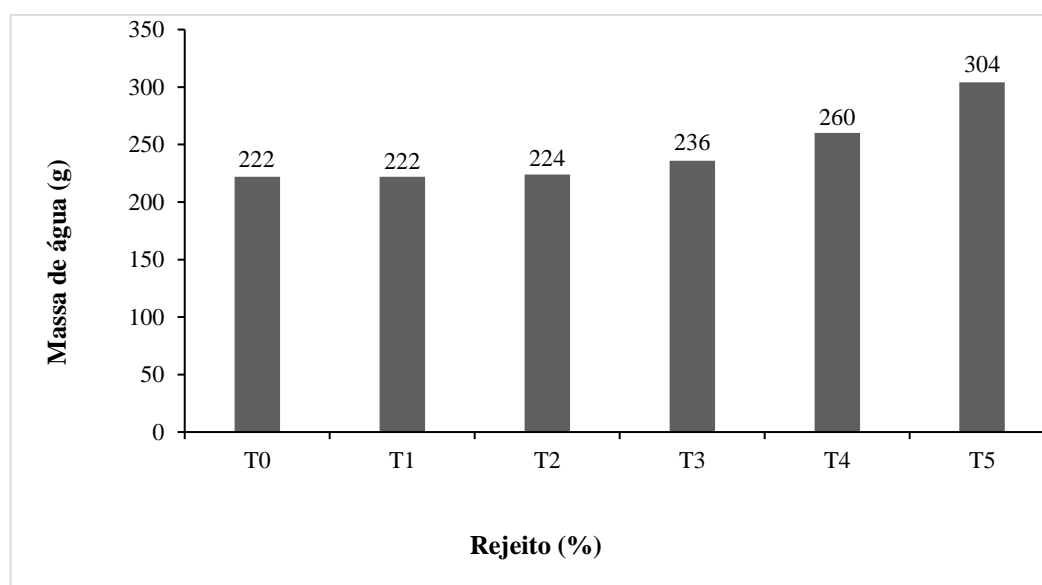
### 5.1 COMPORTAMENTO DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

Foram determinados os parâmetros de trabalhabilidade, índice de consistência e densidade de massa com intuito de avaliar o comportamento das argamassas em seu estado fresco. Os resultados obtidos na avaliação são apresentados e discutidos nos tópicos subsequentes.

#### 5.1.1 Trabalhabilidade e índice de consistência

Na Figura 18 são apresentados os resultados da quantidade de água necessária para que cada argamassa produzida e analisada apresentasse uma boa trabalhabilidade. Na figura as diferentes porcentagens se referem às distintas proporções de substituição de rejeito de minério de cobre estudadas nessa pesquisa (T0, T1, T2, T3, T4 e T5).

**Figura 18** – Gráfico para os valores determinados da massa de água utilizada para cada tratamento adotado.



Fonte: Autor, 2024.

Mediante análise do gráfico acima, constata-se que a adição de rejeito de minério de cobre à argamassa de T1 demandou a mesma quantidade de água que a testemunha, enquanto que os demais percentuais (T2, T3, T4 e T5) requereram uma maior quantidade de água adicionada nas formulações, como já era esperado, pelo fato do rejeito apresentar granulometria muito fina, como comprovado pelo gráfico de granulometria da Figura 6.

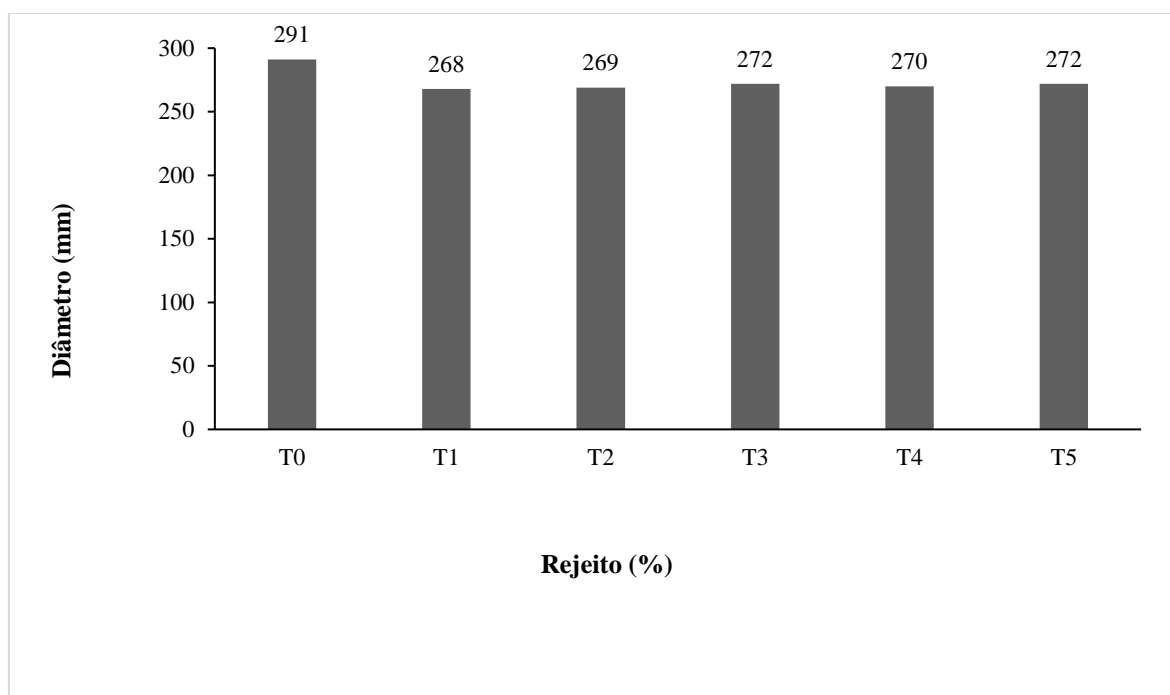
Fontes (2013), nos resultados do seu estudo de utilização do rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento, explicou que a maior demanda de água está atrelada ao fato da granulometria do material utilizado como substituto ao agregado de areia possuir granulometria muito fina, corroborando com os resultados do presente trabalho.

Como dito anteriormente, o rejeito de minério de cobre é caracterizado como um material de granulometria fina que promove maior absorção e retenção de água com mais facilidade, como observado no gráfico, quanto maior a proporção de rejeito adotada, maior a quantidade de água exigida pela argamassa para se alcançar a trabalhabilidade e o espalhamento ideal. Tal comportamento pode ser observado nos resultados de Sinhorelli (2019), que explica a relação direta da influência de rejeitos de minerais de granulometria fina com a quantidade de água ideal.

Ainda é observado no gráfico que, a introdução de rejeito de minério de cobre nas proporções adotadas como agregado de substituição não traz influência satisfatória na consistência das argamassas quando comparadas ao tratamento T0. Entretanto, quando se eleva o percentual de substituição como nos casos averiguados nesta pesquisa e os resultados apresentados nos estudos de Augusto Romano (2004), Silva *et al.* (2010), Cintra (2013) e Xu *et al.* (2015), é fundamental o aumento da demanda de água na confecção da argamassa à medida que aumenta proporção de agregados finos, como por exemplo, a adição de rejeito de cobre na composição.

Para o Índice de Consistência foi adotado um espalhamento mínimo pré-definido entre 270 a 290±10 mm. Na Figura 19 são apresentados os resultados médios do diâmetro de espalhamento (consistência) das argamassas produzidas.

**Figura 19** – Gráfico para valores determinados do diâmetro de espalhamento (consistência) das argamassas.



Fonte: Autor, 2024.

Analisando e correlacionando o gráfico da Figura 18 com o gráfico da Figura 19, percebe-se que houve uma diferença entre o espalhamento da testemunha (T0) e dos demais tratamentos. Tal fato pode ser explicado pela diferença de massa específica das frações de areia (agregado natural) e de rejeito de minério de cobre e pelo material utilizado como substituto parcial (rejeito) possuir menor módulo de finura em relação ao agregado natural, exigindo a maior quantidade de água para se alcançar o diâmetro de espalhamento definido e que compreendia a faixa de 270 a 290±10 mm.

Para validar as informações elencadas anteriormente pode-se citar o estudo de Medeiros (2016), o qual analisou a incorporação de resíduos de scheelita para produção de argamassa autonivelante.

Os valores médios observados entre a Figura 18 e 19 evidencia que o rejeito de minério de cobre, em proporções superiores a T1 de substituição de areia, passa a aumentar a quantidade de água quando comparados ao tratamento T0, fato atribuído a possível rugosidade das partículas de rejeito que aumenta o atrito entre os grãos acima dessa proporção de substituição, e desse modo, necessitou uma maior quantidade água a fim de garantir o diâmetro de espalhamento (consistência) estabelecido. Portanto, por meio da relação dos gráficos anteriores

conclui-se que a proporção de T1 de substituição de areia por rejeito de minério de cobre é a que requer menor quantidade de água para atender o diâmetro de espalhamento esperado.

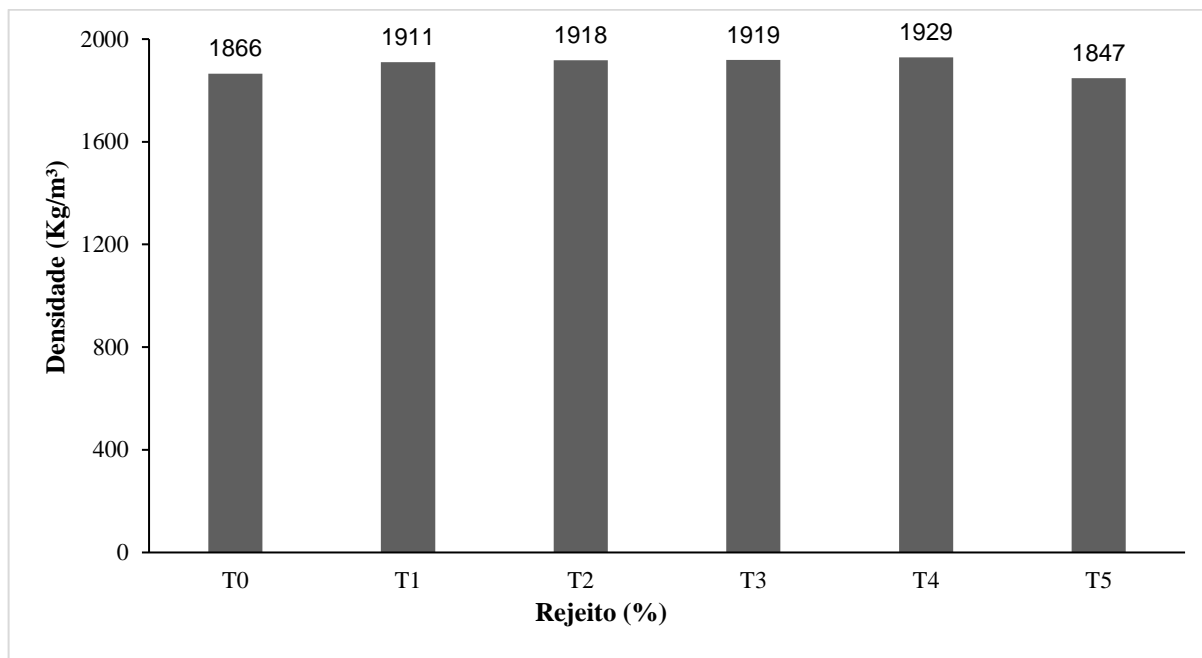
Os autores Fontenele; Oliveira e Cabral (2020), na sua pesquisa de avaliação do estado fresco de argamassa mista de revestimento com substituição da cal por resíduos de cerâmica vermelha, constataram a relação existente entre a rugosidade, atrito e a maior demanda exigida para se alcançar a consistência ideal como supracitado no parágrafo anterior.

### **5.1.2 Densidade de massa**

Após a realização dos passos estabelecidos pela Norma NBR 13278/2005 da ABNT, determinou-se os valores da densidade de massa da argamassa no estado fresco.

No gráfico da Figura 20 estão apresentados os valores de densidade de massa determinados para o traço definido de acordo com a metodologia empregada neste trabalho. Ao analisar o gráfico desta figura, classifica-se as densidades de massa determinadas das argamassas confeccionadas a partir de areia (T0 - testemunha) e em proporção de substituição parcial de rejeito de minério de cobre (T1, T2, T3, T4 e T5) como D4, tendo em vista que, os valores determinados compreendem o intervalo de 1600 a 2000 Kg/m<sup>3</sup> de densidade de massa no estado fresco como mencionado na Tabela 2.

Além disso, Carasek (2010) classifica argamassas leves àquelas com valores de densidade de massa abaixo de 1400 Kg/m<sup>3</sup> no estado fresco, enquanto aquelas com densidade de massa entre 1400 Kg/m<sup>3</sup> e 2300 Kg/m<sup>3</sup> o autor classifica como normais, e dessa forma, podem ser utilizadas para revestimento. Logo, os resultados encontrados nessa pesquisa obedecem ao intervalo de classificação do autor, e assim, podendo ser utilizada para revestimentos.

**Figura 20** – Gráfico para valores determinados da densidade de massa no estado fresco.

Fonte: Autor, 2024.

De acordo com a Figura 20, observa-se que a argamassa com traço de T4 de substituição em massa de rejeito de minério de cobre foi a que apresentou maior densidade de massa. Verifica-se por meio deste gráfico que os traços de T1, T2 e T3 das argamassas confeccionadas apresentaram valores semelhantes ao traço de T4. Vale destacar ainda que a quantidade de água utilizada na confecção da argamassa com T1 de rejeito foi a mesma da argamassa T0. Já para argamassa T5 de rejeito a demanda de água aumentou com a proporção de substituição do agregado convencional.

Portanto, as melhores performances das argamassas com T1, T2, T3 e T4 de rejeito de minério de cobre pode ser atribuída a melhor organização entre os agregados e a substituição de rejeito adotada. Segundo Junior e Oliveira (2022), essa organização entre os agregados está relacionada ao teor de substituição de rejeito, que promoveu uma redução na porosidade da estrutura da argamassa.

O estudo de avaliação da utilização de rejeito de minério de ferro na formulação de argamassas desenvolvido por Junior e Oliveira (2022), explicou que valores menores de densidade de massa nas argamassas são decorrentes da maior demanda de água na mistura, assim, pode-se atribuir que para a argamassa com traço de T5 do presente estudo pode ser explicado pela maior quantidade de água requerida na mistura como defende estes autores.



O rejeito é caracterizado como um material muito fino, e em função de tal característica promove o aumento da densidade de massa no estado fresco, uma vez que os agregados deste material preenchem os espaços vazios entre as partículas de areia. Os estudos de Fontes (2013), Dias (2017), Sinhorelli (2019), Junior e Oliveira (2022) confirmam o comportamento apresentado nesta pesquisa.

Medeiros (2016), apontou no seu estudo de argamassas de revestimento com resíduo de scheelita que o aumento no teor de rejeito em substituição ao agregado convencional implica no aumento da densidade de massa. Isso ocorre pelo fato da areia, agregado convencional, possuir massa específica menor que o rejeito de minério de cobre como observado nas Tabelas 7 e 8 desse trabalho, e assim confirmando o a teoria desse autor.

## 5.2 COMPORTAMENTO DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

### 5.2.1 Resistência à tração na flexão

Os resultados estatísticos de resistência à tração com idade de 14 e 28 dias podem ser observados na Tabela 17, tais resultados estão expressos em função de suas respectivas médias, erro padrão das médias e coeficientes de variação.

**Tabela 17** – Resultados médios para variável de resistência à compressão axial simples (MPa).

Idade (dias)	Tratamentos						EPM	CV (%)
	T0	T1	T2	T3	T4	T5		
14	1,52 c	2,49 a	2,49 a	1,94 bc	2,30 ab	1,67 c	0,17	7,94
28	1,66 c	2,49 ab	2,53 ab	2,84 a	2,39 b	2,55 ab	0,16	5,99

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo Nível de significância de 5% de probabilidade; EPM = Erro Padrão da Média; CV = Coeficiente de Variação.

Fonte: Autor, 2024.

Foi realizado uma análise de regressão linear, a fim de averiguar se isoladamente a substituição proporcional de rejeito de cobre na mistura da argamassa possui de fato significância estatística.

De acordo com a tabela, as argamassas desenvolvidas nesse estudo podem ser classificadas como R3, uma vez que apresentam valores de resistência entre 1,5 e 2,7 MPa, com

exceção da argamassa T3 com idade de 28 dias, a qual se enquadra no grupo R4 que apresenta valores na faixa de 2,0 a 3,5 MPa (Tabela 4).

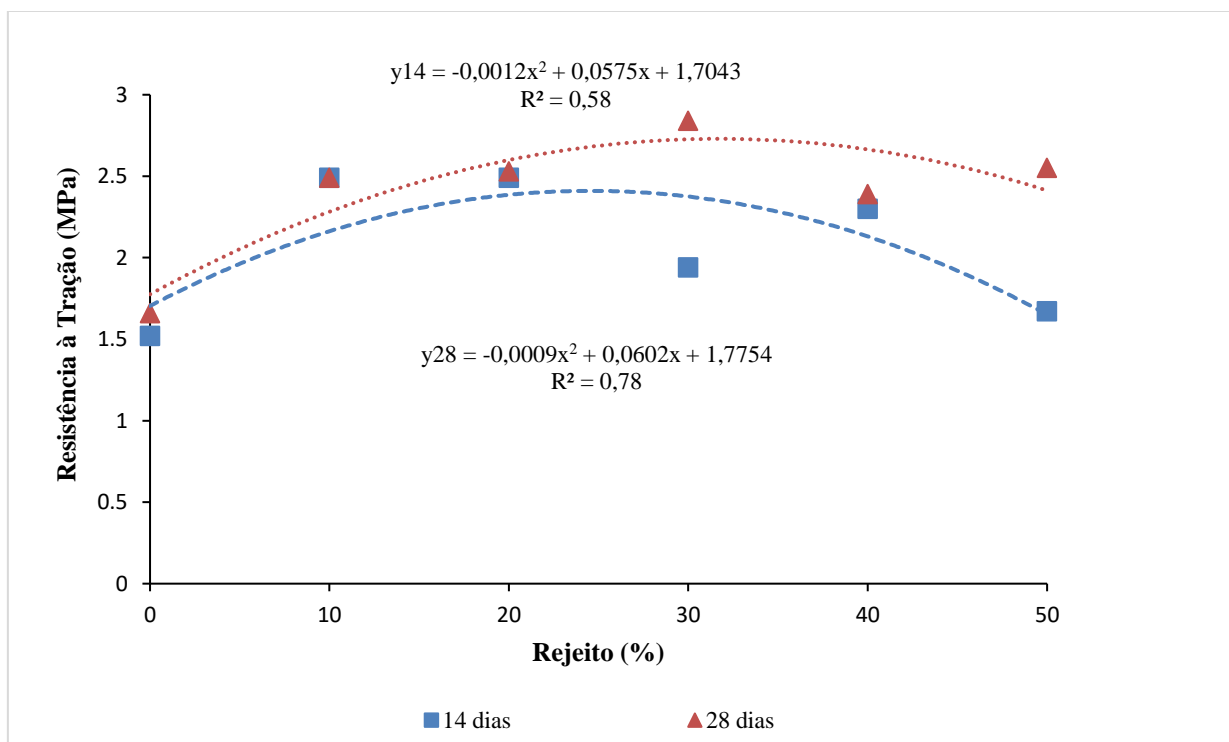
Os resultados apresentados na Tabela 17 acima evidenciam que houveram diferenças significativas nos tratamentos ao substituir agregados miúdos por rejeito de cobre na mistura. Assim, nota-se que para idade de 14 dias, que as argamassas dos tratamentos de T1, T2 e T4 não apresentam diferença significativa entre si, no entanto, maiores que a resistência de T0, enquanto os percentuais de T3 e T5 apresentaram resultados de resistência maiores que o grupo T0.

Os resultados apresentados comprovam que a substituição parcial de areia por rejeito de cobre, proporcionou um aumento significativo na resistência à tração na flexão da argamassa, ao ponto que constatou não só a diferença significativa entre as argamassas com rejeito e argamassa testemunha, bem como, confirmou a significância entre os diferentes percentuais de substituição adotados, com por exemplo, os percentuais de T1 e T2 para ambas as idades, a adição de rejeito contribuiu de modo positivo e satisfatório para esta propriedade da argamassa.

A contribuição positiva descrita anteriormente pode estar associada ao fato dos percentuais de T1 e T2 de substituição apresentarem um maior preenchimento dos poros pelo alto teor de partículas finas, conferindo assim, uma maior resistência a argamassa, como explica Dias (2017) em seu estudo que utilizou rejeitos de mineração como agregado para produção de argamassa colante.

Observa-se no Gráfico da Figura 21 a seguir, a curva representativa do comportamento da resistência à tração na flexão para 14 e 28 dias de idade.

**Figura 21** – Resistência à tração na flexão das argamassas em função da porcentagem de rejeito, nas duas idades de ruptura.



Fonte: Autor, 2024.

De acordo com o gráfico da Figura 21, todos os tratamentos apresentaram aumento de resistências quando comparadas a T0, no entanto, é perceptível uma redução nas argamassas com T4 e T5 de substituição, para ambas as idades. Logo, é pertinente inferir que os melhores desempenhos se atribuem a T1, T2 e T3 para as duas idades analisadas.

Quando comparadas entre idades, as argamassas com 14 dias possuem valores médios de resistência inferiores as de 28 dias, Fontes (2013), Qomi *et al.* (2014), Fontes *et al.* (2016) e Sousa (2019) afirmaram que este comportamento pode ser explicado pelo envolvimento das partículas do rejeito e os produtos de hidratação do cimento, assim como a menor redução de espaço poroso dos mesmos (GRIGOLI & HELENE, 2002).

O aumento de resistência em argamassas com rejeito minerais está diretamente relacionado a quantidade de particulado fino desse material ser maior que do agregado convencional, resultando no preenchimento dos espaços vazios entre partículas de areia e, conseqüentemente, conferindo uma maior coesão entre o rejeito, areia e cimento, estudos na

literatura como os de Higashiyama *et al.* (2012), Fontes (2013), Dias (2017), Sinhorelli (2019) e Júnior e Oliveira (2022) justificaram esse aumento.

Em análise ao gráfico, pode-se concluir que a queda do desempenho para T4 e T5 está diretamente ligado a granulometria fina do rejeito e a elevação da porosidade demandando maiores quantidade de água para atingir os parâmetros ideais do estado fresco, e dessa forma, diminuindo a resistência das argamassas no estado endurecido, haja vista que a quantidade de água é inversamente proporcional a resistência. Faria *et al.* (2019) afirmou que a resistência mecânica de argamassas é afetada por esses fatores.

Portanto, a adição de rejeito de cobre nas argamassas resultou num aumento considerável da resistência à tração na flexão entre as idades de 14 e 28 dias, observando-se que os maiores valores são apresentados pelos tratamentos T1, T2 e T3, ou seja, esses três grupos são classificados como as proporções ideais de substituição para produção de argamassas e superiores a estes há uma tendência de diminuição da resistência. Logo, é relevante destacar que em termos de maximização dos objetivos dessa pesquisa, deve-se utilizar rejeito de cobre com proporção de substituição na faixa de 10% (T1), 20% (T2) e 30% (T3).

### 5.2.2 Resistência à compressão axial simples

Os resultados estatísticos de resistência à compressão axial simples com idade de 14 e 28 dias estão dispostos na Tabela 18, tais resultados estão expressos em função de suas respectivas médias, erro padrão das médias e coeficientes de variação.

**Tabela 18** – Resultados médios para variável de resistência à compressão axial simples (MPa).

Idade (dias)	Tratamentos						EPM	CV (%)
	T0	T1	T2	T3	T4	T5		
14	6,42 c	9,18 a	9,73 a	8,72 ab	8,55 ab	7,19 bc	0,51	12,81
28	8,58 b	11,27 a	9,80 ab	9,82 ab	9,55 ab	8,64 b	0,40	14,39

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo Nível de significância de 5% de probabilidade; EPM = Erro Padrão da Média; CV = Coeficiente de Variação.

Fonte: Autor, 2024.

Para este ensaio, também se realizou uma análise de regressão, com intuito de verificar se de maneira isolada cada proporção de substituição de rejeito de cobre na argamassa possui significância estatística.

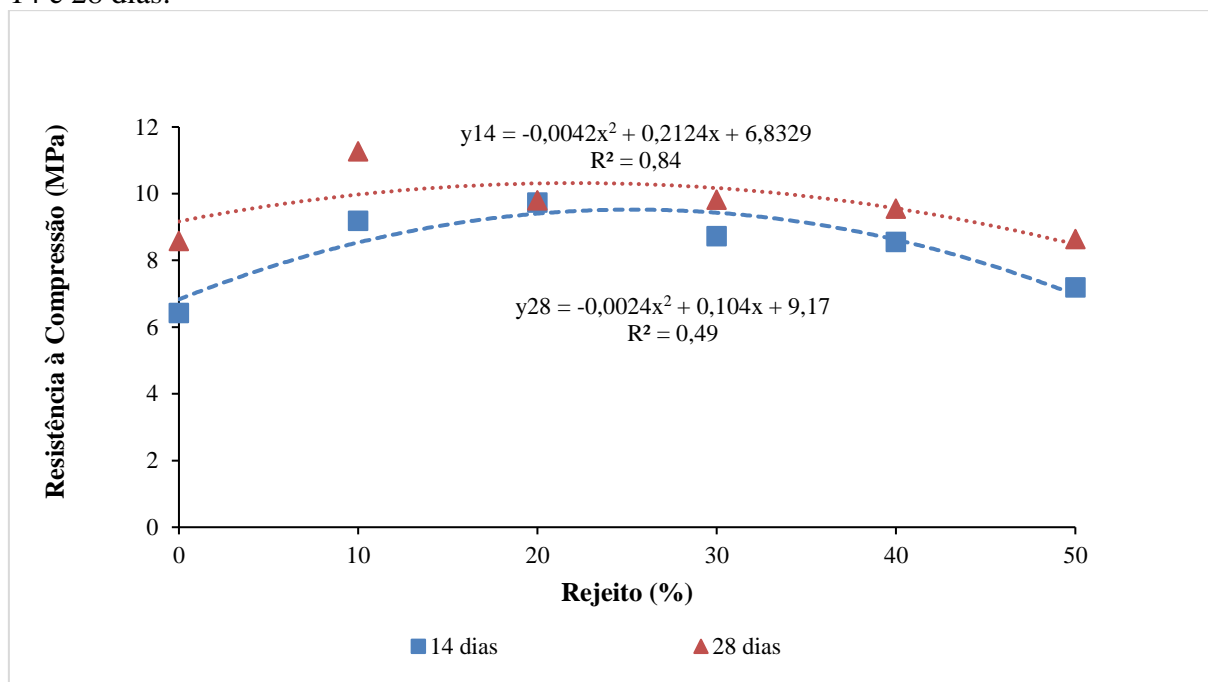
Em relação à classificação, de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005) as argamassas produzidas a partir de rejeito de cobre compreendem ao grupo de P5, visto que compreendem o intervalo de 5,5 a 9,0 MPa, no entanto, para T1 aos 28 dias classificada como P6 já que o valor médio de resistência é maior que 8,0 MPa.

Nota-se conforme a tabela anterior, que houveram diferenças significativas na resistência a compressão das argamassas, em relação a 14 dias, para os tratamentos T1, T2, T3 e T4 quando comparados a T0, enquanto, T5 evidencia que não houve diferença quando relacionado a T0. Aos 28 dias, as argamassas dos grupos T2, T3, T4 e T5 não apresentaram diferença em relação ao grupo T0, já T1 difere estatisticamente de T0.

Na Tabela 19, é evidente que os diferentes percentuais de substituição também apresentaram bom desempenho quanto a resistência à compressão, esse comportamento é resultante do envolvimento das partículas de rejeito com os demais materiais utilizados no procedimento de fabricação das argamassas, comportamento similar as pesquisas de Fontes (2013), Dias (2017), Sinhorelli (2019) e Júnior e Oliveira (2022). Os estudiosos, ainda revelaram que a resistência a compressão tende a diminuir quando os percentuais da substituição em massa são maiores, fazendo uma analogia a esta pesquisa, comprova-se que valores superiores aos de T3, este parâmetro mecânico apresenta queda como dito pelos autores.

De modo geral, a utilização de rejeito de minério de cobre resultou num aumento considerável em todos os percentuais analisados. Esse aumento, ocorre em virtude de as adições do resíduo refinarem os poros das argamassas sob a influência do efeito *filler*. Metha e Monteiro (2014) observaram que esse efeito é mais expressivo na resistência a compressão axial do que na resistência à tração na flexão, levando a uma pequena queda quando se eleva os percentuais de substituição, logo, o gráfico da Figura 22 representa o comportamento explanado anteriormente.

**Figura 22** – Resistência à compressão axial simples em função da porcentagem de rejeitos, aos 14 e 28 dias.



Fonte: Autor, 2024.

Segundo a Figura 22, no quesito idade, comparando as idades de 14 e 28 dias, as argamassas dos grupos T1, T2 e T3 aos apresentaram ganho de resistência consideráveis quando comparados a T0 para as ambas as idades, e aos 28 dias as argamassas apresentam resultados mais expressivos em relação a 14 dias. No entanto, os tratamentos com valores superiores ao do grupo T3, para as duas idades analisadas, as resistências decrescem, tendo em vista que o material apresenta estrutura rugosa e que em grandes proporções de substituição tendem a requerer maiores quantidade de água, acarretando assim, na queda de resistência.

Logo, é possível notar que houveram dois tipos de comportamentos usuais no gráfico acima para a variável analisada, o primeiro, sendo o aumento da resistência quando analisados entre idades, e o segundo, a diminuição da resistência conforme o percentual de substituição de rejeito vai se elevando, comportamento similar as pesquisas de Fontes (2013), Fontes *et al.* (2016) e de Sousa (2019).

Além disso, o parâmetro mecânico de compressão também é afetado por outros fatores como a porosidade do agregado e da matriz cimentícia, temperatura e tempo de cura (endurecimento), granulometria dos componentes dos materiais utilizados, conforme

justificaram Lima; Fernandes e Lückeroth (2022) no estudo de análise da agregação do rejeito de mineração em materiais para uso na construção civil com foco em argamassa sustentável.

De acordo com o gráfico da Figura 22, evidencia-se que o rejeito de minério de cobre exerceu de forma positiva o ganho de resistência em todas as proporções adotadas nesse estudo. Em observação e comparação aos resultados de resistência do parâmetro mecânico compressão, pode-se afirmar que a utilização do rejeito de minério de cobre nas argamassas, resultou em bons resultados para T1, T2 e T3 quando relacionados a testemunha T0. Ou seja, vale dizer que T1, T2 e T3 são os percentuais considerados ideais na substituição de agregado miúdo na produção de argamassas de revestimento.

Outro fator que explica a maior ganho de resistência das argamassas com rejeito de cobre em relação a T0, está atrelado ao maior teor de finos, visto que preenchem os poros de agregado miúdo formando uma matriz mais resistente (DIAS, 2017).

Já os tratamentos T4 e T5 apresentam decaimento em seus valores de resistência, apesar disso, não devem ser desconsiderados como percentuais de substituição, tendo em vista a premissa de que para argamassas para fins de revestimento não necessitam necessariamente obter altos valores de resistência a compressão, como afirma Bauer (2005) e Sinhorelli (2019).

Portanto, é possível afirmar que a adição de rejeito de minério de cobre para produção de argamassas proporciona um aumento considerável de resistência. Como dito nesse estudo, as melhores performances para compressão são englobadas pelos tratamentos T1, T2 e T3, tornando-se semelhante aos tratamentos com melhores desempenhos do ensaio resistência à tração na flexão.

### 5.2.3 Resistência de aderência à tração

A determinação da resistência de aderência à tração seguiu as diretrizes e recomendações da ABNT, a norma NBR n°13528/19. Na Tabela 19 são apresentados os resultados de resistência média e coeficiente de variação obtidos após a realização do ensaio, bem como análise de variância aplicado ao teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

**Tabela 19** – Resultados médios para variável de resistência de aderência à tração (MPa).

Idade (dias)	Tratamentos						EPM	CV (%)
	T0	T1	T2	T3	T4	T5		
14	0,43 a	0,33 ab	0,33 ab	0,29 ab	0,29 ab	0,19 b	0,03	43,90
28	0,50 a	0,46 ab	0,42 ab	0,36 ab	0,33 ab	0,27 b	0,04	41,84

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo Nível de significância de 5% de probabilidade; EPM = Erro Padrão da Média; CV = Coeficiente de Variação.

Fonte: Autor, 2024.

Analisando a Tabela 19, pode-se perceber que em termos da média geral as adições de rejeito na mistura provocaram uma pequena redução da resistência de aderência e os tratamentos T1, T2, T3 e T4 são considerados estatisticamente iguais para as duas idades analisadas quando comparadas ao T0, enquanto T5 apresenta diferença estatística quando comparado a T0 para ambas as idades, porém semelhante aos demais percentuais de substituição.

De acordo com a tabela, percebe-se que os resultados de resistência de aderência à tração aos 28 dias foram superiores a 14 dias, os tratamentos T1 e T2 foram os que apresentaram melhores desempenhos, ainda é possível notar que valores de substituição superiores a T2 tendem a diminuir, porém dentro dos limites permitidos pela NBR 13749 (ABNT, 2013).

Segundo Carasek (2007), a aderência de uma argamassa sofre influência de diversos fatores, como adesão inicial, retenção de água, reologia, características do substrato, processo de execução e fatores externos, fazendo um adendo a esta pesquisa, tais fatores podem ter relação direta com a diminuição da resistência de aderência à tração dos tratamentos estudados em relação a testemunha (T0).



Constata-se conforme os resultados obtidos que ao substituir agregado miúdo (areia) por rejeitos de minério de cobre houve uma pequena redução nos valores de resistência de aderência das argamassas, em razão do maior teor de finos e sua densidade absoluta maior que a da areia, proporcionando maior retenção de água e assim diminuindo a resistência da argamassa (FONTES, 2013; SANTAMARÍA-VICARIO *et al.*, 2015).

Os valores expressos na tabela apresentaram resultados para C.V (%) com 43,90% para 14 dias e 41,84%, para 28 dias. Gonçalves (2004), afirmou que é comum o ensaio de resistência de aderência apresentar um coeficiente de variação em torno de 50%. Logo, pode-se afirmar que os valores encontrados nesse estudo estão dentro do valor de C.V. (%) que o autor defende.

Na Tabela 20 a seguir, constam todas aferições de resistência de aderência à tração para cada um dos 12 corpos de prova das duas idades avaliadas. Assim, a referida tabela foi anexada nesse estudo com intuito de se fazer uma comparação entre os valores estabelecidos pela NBR 13749 (ABNT, 2013) e os resultados obtidos nessa pesquisa.

**Tabela 20** – Resultados de resistência de aderência à tração para os doze corpos de prova para todos os tratamentos estudados.

Idades (dias)	Tratamentos (%)	Ra por Corpo de Prova											
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11	CP12
14	T0	0,47	0,50	0,13	0,33	0,32	0,66	0,15	0,33	0,74	0,19	0,72	0,71
	T1	0,31	0,50	0,39	0,40	0,09	0,32	0,24	0,37	0,48	0,18	0,42	0,33
	T2	0,30	0,35	0,22	0,47	0,34	0,54	0,25	0,51	0,31	0,21	0,23	0,28
	T3	0,38	0,32	0,26	0,31	0,37	0,30	0,28	0,16	0,35	0,31	0,20	0,24
	T4	0,32	0,15	0,31	0,29	0,36	0,33	0,29	0,25	0,55	0,20	0,27	0,26
	T5	0,09	0,31	0,11	0,48	0,14	0,30	0,10	0,07	0,09	0,40	0,06	0,13
28	T0	0,48	0,65	0,65	0,46	0,50	0,64	0,10	0,75	0,40	0,54	0,29	0,59
	T1	0,25	0,78	0,60	0,32	0,67	0,34	0,52	0,38	0,55	0,88	0,19	0,07
	T2	0,32	0,45	0,47	0,26	0,60	0,37	0,47	0,29	0,33	0,17	0,73	0,63
	T3	0,40	0,18	0,20	0,28	0,32	0,39	0,46	0,35	0,43	0,42	0,45	0,47
	T4	0,29	0,21	0,57	0,26	0,49	0,13	0,15	0,41	0,26	0,29	0,51	0,40
	T5	0,19	0,13	0,24	0,15	0,42	0,27	0,40	0,20	0,22	0,47	0,36	0,28

Ra = Resistência de Aderência à Tração; CP = Corpo de Prova.

Fonte: Autor, 2024.

Tomando como base os requisitos de classificação para resistência de aderência à tração da norma 13749/2013 da ABNT, que determina que este ensaio somente deverá ser aceito se cada grupo de 12 (doze) corpos prova, pelos menos 8 (oito) apresentarem  $R_a \geq 0,30$  MPa para revestimento externos e  $R_a \geq 0,20$  MPa para revestimentos internos.

Constata-se na Tabela 21 que, aos 14 dias os tratamentos T1 e T2 atingiram o valor de resistência de permitido por norma para revestimentos externos, em que 9 corpos de prova apresentam  $R_a \geq 0,30$  MPa, já T1 e T2 apresentam o mesmo número de corpos de prova em comparação a argamassa testemunha (T0), enquanto, os tratamentos T3, T4 e T5 estão reprovados de acordo com a norma NBR 13749/2013; já para 28 dias, os grupos T1, T2 e T3 apresentam 9 corpos de prova com valores superiores ao estabelecido pela normativa e igualados ao mesmo número do grupo T0, e reprovados por norma para esta idade os tratamento T4 e T5.

Comparando entre idades, o ganho de resistência de aderência para revestimentos externo é perceptível que aos 28 dias, T1 manteve o mesmo número de corpos de prova com valores de  $R_a \geq 0,30$  MPa, enquanto T2 e T3 se igualam a T1 e a argamassa testemunha (T0), já os tratamentos T4 e T5 mantiveram-se reprovados em comparação aos valores permitidos por norma e a T0.

Para revestimentos internos, aos 14 dias, os tratamentos T1, T2, T3 e T4 apresentaram valores de  $R_a \geq 0,20$  MPa acima de 8 corpos de prova como determina a norma e quando comparado a T0, para 28 dias, pode-se dizer o mesmo comportamento da idade de 14 dias se repetiu.

Nota-se que nos resultados apresentados na tabela que, há uma grande variabilidade de resultados de resistência quando se compara as repetições em cada percentual analisado. Assim, segundo Sinhorelli (2019), essa variabilidade é característica na realização desse ensaio. Esse autor ainda afirma que a resistência de aderência à tração é classificada como uma das características mecânicas mais relevantes como objeto de avaliação para uma argamassa de revestimento.

### 5.2.4 Avaliação térmica

Os resultados das determinações da avaliação térmica (capacidade de amortecimento e atraso térmico) aos 28 dias estão apresentados na Tabela 21.

**Tabela 21** – Resultados médios para variável capacidade de amortecimento ( $^{\circ}\text{C}$ ) e atraso térmico (h).

Variáveis	Tratamentos						EPM	CV (%)
	T0	T1	T2	T3	T4	T5		
$\mu$	0,83 a	0,85 a	0,78 a	0,81 a	0,81 a	0,81 a	0,09	5,76
$\varphi$	1,12 a	0,52 a	0,64 a	0,99 a	0,49 a	0,99 a	0,11	103,70

Nível de significância de 5% de probabilidade; EPM = Erro Padrão da Média; CV = Coeficiente de Variação;  $\mu$  = Capacidade de Amortecimento ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\varphi$  = Atraso Térmico (h).

Fonte: Autor, 2024.

Analisando os valores obtidos para a capacidade de amortecimento da tabela acima, percebe-se que os resultados dos tratamentos de T3, T4 e T5 são iguais e próximo ao grupo T0, superior ao tratamento de T2 e inferior a T1, ou seja, não se pode rejeitar a hipótese de igualdade entre as médias e os teores de substituição analisados. Essa característica de igualdade/similaridade também pode ser observada no estudo de Dias (2018), que analisou o desempenho termomecânico de argamassas com adição de resíduos de vermiculita para construções rurais.

Esse comportamento estar diretamente ligado a manipulação do ensaio, que englobou a caracterização de dois ciclos, representados pela relação entre o aumento e redução de temperatura superficial interna e temperatura do ambiente externo durante o período de análise, como é definido por Rivero (1986) e Dias (2018).

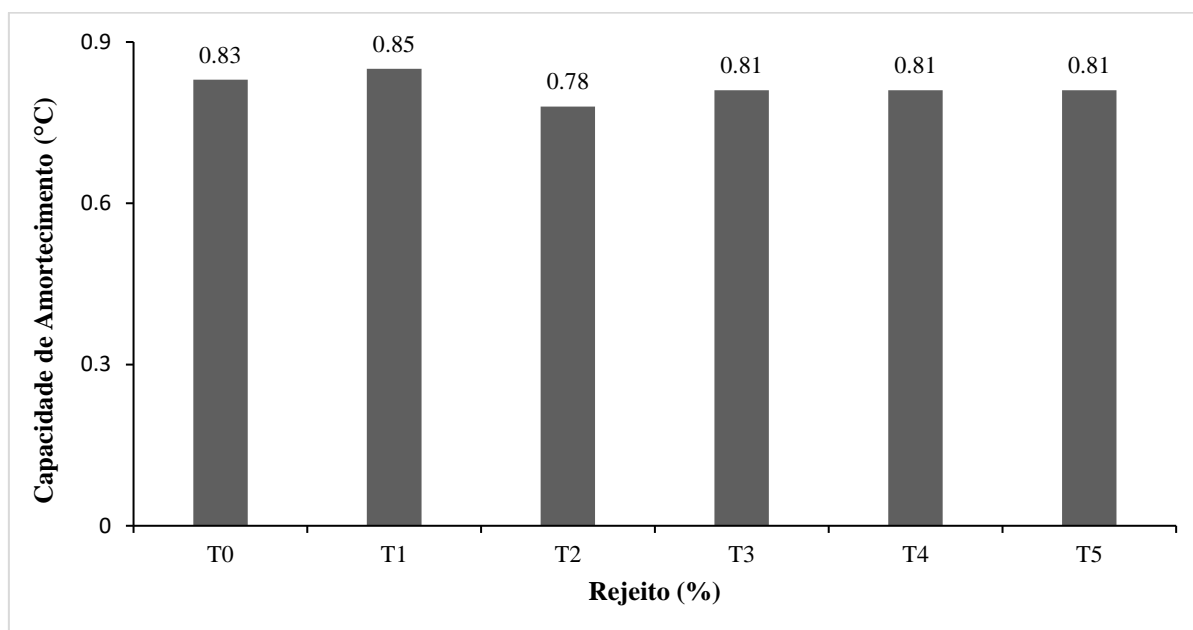
Observa-se na Tabela 21 apresentada anteriormente, os resultados estatísticos para a variável atraso térmico. Nota-se que, não houve diferença estatística entre os percentuais de substituição quando comparados entre si e o tratamento T0.

A tabela acima, evidencia que os tratamentos de T1, T2, T3, T4 e T5 apresentaram retardo térmico menor em relação ao grupo T0. Tal comportamento pode estar correlacionado com a composição mineralógica, granulometria, distribuição das partículas e pela formação de

microporos do rejeito de cobre, como explana a pesquisa de argamassas isolantes térmicas para revestimento com resíduos de mineração e siderurgia de Martins (2022).

No gráfico da Figura 23, é apresentado o comportamento da capacidade de amortecimento. Os valores observados no gráfico foram obtidos entre a divisão da amplitude de temperatura superficial interna de um fechamento pela amplitude da temperatura superficial externa.

**Figura 23** – Gráfico para os valores determinados para capacidade de amortecimento (°C).



Fonte: Autor, 2024.

Ao analisar o padrão das barras do gráfico acima, percebe-se que a substituição de agregados miúdos por rejeito de cobre não alterou a capacidade de amortecimento das argamassas, haja vista que apresentou  $\mu < 1$ , como explica a definição de determinação do coeficiente de amortecimento de Rivero (1986).

O comportamento expresso por todos os tratamentos analisados pode ser justificado pelas propriedades físicas do rejeito, o qual é caracterizado como material de granulometria muito fina e que acaba por requerer uma maior quantidade água, corroborando assim, para uma baixa capacidade de amortecimento das argamassas, tal ação pode ser observada na pesquisa de Silva (2018).

O estudo de Leal (2012) analisou o desenvolvimento de argamassas de revestimento com comportamento térmico melhorado e Gomes *et al.* (2017) que avaliaram a influência do

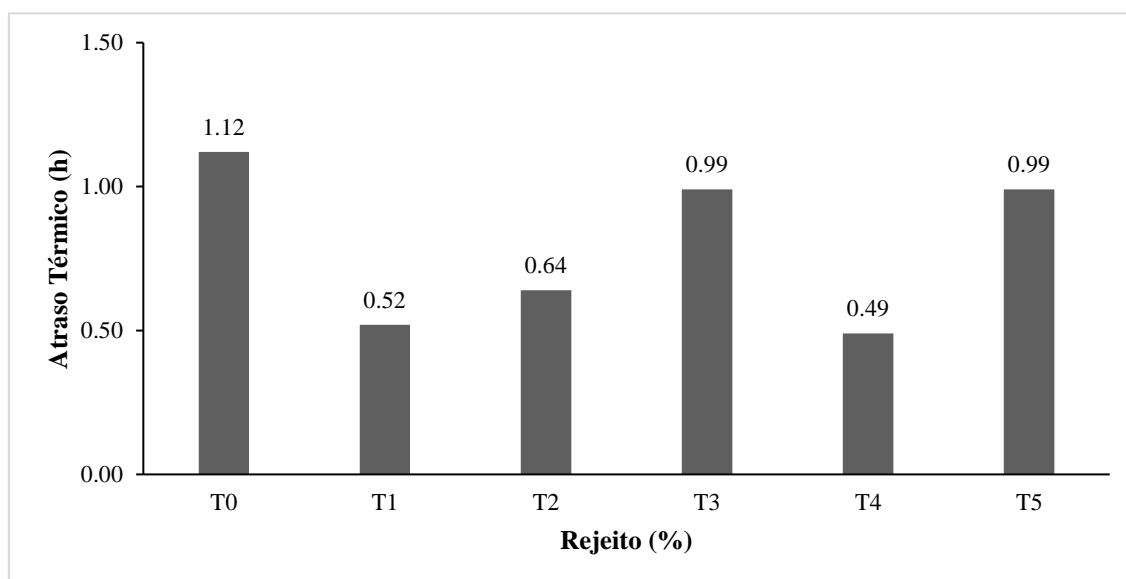
teor de umidade na condutividade térmica de argamassas térmicas externas, estes autores confirmaram que fatores como estrutura interna e tamanho dos poros conferem baixa condução térmica, bem como destacam que quanto menor a dimensão dos poros e mais fino o material utilizado na mistura, menor será a capacidade de condução térmica. Tais fatores observados por esses autores podem justificar o comportamento de baixa capacidade de amortecimento do presente estudo.

Sinhorelli (2019) afirma que o aumento de adição de rejeitos minerais em argamassas dificulta a condução térmica. Assim, pode-se observar que a incorporação de rejeitos de minério de cobre nos tratamentos estudados, promove a diminuição de espaços vazios das argamassas no estado endurecido, de forma a reduzir o amortecimento térmico.

A inferência citada pelos autores serve como parâmetro de justificativa e interpretação para os resultados obtidos pela determinação da capacidade de amortecimento neste estudo. No tocante a essa determinação, evidencia-se que a pequena dimensão das partículas do rejeito de minério de cobre proporcionou um maior número de microporos, e assim, promoveu menor capacidade de amortecimento, comprovados a partir do coeficiente de determinação de Rivero (1986), em que todos os tratamentos analisados apresentaram  $\mu < 1$ .

O gráfico da Figura 24 exemplifica o comportamento e os resultados para a variável atraso térmico, obtidos pela diferença do horário de ocorrência do pico de temperatura do ambiente externo e hora de ocorrência do pico de temperatura no ambiente interno.

**Figura 24** – Gráfico para os valores determinados de atraso térmico (h).



Fonte: Autor, 2024.

De acordo com o gráfico, todos os tratamentos estudados alcançaram atraso térmico dentro da faixa permitida ( $\varphi \leq 4,3h$ ) para Z1, Z2, Z3, Z5 e Z8 como estabelecido pela normativa NBR 15220-3 da ABNT (2005). Estes resultados indicam que o tempo de exposição foi suficiente para que a variação de temperatura da face externa fosse registrada na face interna dos corpos de prova num período de 24 horas.

Assim, o presente estudo que utilizou rejeitos de minério de cobre para produção de argamassa, apresentou  $\varphi \leq 4,3h$ , confirmando a tese de Sinhorelli (2019) sobre a adição de rejeitos minerais em argamassas dificultar a condução térmica, uma vez que diminui os espaços vazios da argamassa no estado endurecido.

Os baixos valores de atraso térmico encontrados nessa pesquisa podem ser justificados pelas características estruturais, tamanho e menor dimensão dos poros e alta porosidade do rejeito de cobre, tendo em vista que o ar, presente nos agregados e nos espaços vazios da argamassa endurecida possuem baixa propagação térmica, e dessa forma, acarreta em uma maior resistência a passagem de calor, semelhança observada no estudo de Barros (2018) que analisou a análise térmica e mecânica de argamassas de revestimento com adição de vermiculita expandida em substituição ao agregado miúdo e Gomes (2021) que avaliou a aplicação de rejeito de mineração de ouro na produção de tijolo de solo-cimento, confirmando que os poros também são responsáveis por diminuir a condução térmica de uma superfície para outra, aumentando assim, a resistência do material em conduzir calor.

Já para as zonas bioclimáticas Z4, Z6 e Z7, os resultados encontrados nesse estudo não atendem a NBR 15220-3 por ser inferior ao mínimo permitido ( $\varphi \geq 6,5h$ ). Ou seja, para tornar os valores do atraso térmico dentro do permitido pela norma, precisa-se aumentar a resistência térmica dos corpos de prova. O aumento da resistência térmica pode ser realizado pela aplicação de novas camadas de revestimento de argamassa conforme as diretrizes da normativa citada, a fim de obter valores dentro da faixa permitida para essas zonas.

## 6 CONCLUSÕES

Mediante aos resultados obtidos pode-se concluir que, as argamassas produzidas com rejeito de cobre com percentuais de substituição de 10%, 20% e 30% foram as que apresentaram melhores desempenhos mecânicos de tração na flexão, compressão axial simples e de aderência à tração quando comparadas com argamassa produzida (T0) sem adição de rejeito e os valores estabelecidos por norma. Na análise da avaliação térmica, todas argamassas apresentaram bom desempenho térmico podendo ser amplamente utilizadas nas zonas bioclimáticas Z1, Z2, Z3, Z5 e Z8.

Portanto, de maneira geral, a substituição de agregados miúdos por rejeitos de minério de cobre possibilita a produção de argamassas, uma vez que apresentaram resultados com expressivas melhorias de desempenho quando comparadas as argamassas sem adição de rejeitos, podendo ser amplamente utilizada na construção civil e rural.



## REFERÊNCIAS

ABRAMS, D. A. **Design of Concrete Mixtures**. Chicago, 1919. Disponível em: <[http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos\\_concretos/abrams\\_dosagem\\_rev11.pdf](http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/abrams_dosagem_rev11.pdf)>. Acesso em: 05 de julho de 2023.

ALVARES, A. J. Avaliação da Qualidade de Desempenho de Revestimento Argamassado Após a Realização de Retrofit (Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Civil). Brasília- DF, 2017. UniCEUB.

ANDRADE, M. L. A.; CUNHA, L. M. S.; GANDRA, G. T. **O Cobre Brasileiro em Ascensão no Cenário Mundial**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, v. 13, p. 65-94, 2001.

ANDREJKOVICOVÁ, S., VELOSA, A. L., FERRAZ, E., ROCHA, F. **Influence of clay minerals addition on mechanical properties of air lime–metakaolin mortars** Construction and Building Materials 65 (2014) 132–139.

ANDRADE, L. C. R. D. (2014). **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. Disponível em:<<https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/6664/1/texto%20completo.pdf>>. Acesso em: 28 de junho de 2023.

ANTT- Agência Nacional de Transportes Terrestres - **Recurso de desenvolvimento tecnológico - RDT**: utilização de escória de ferro silício-manganês como agregado em misturas asfálticas dosadas pela metodologia superpave. Relatório Final. Minas Gerais – 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13259**: Revestimento de Paredes e Tetos de Argamassas Inorgânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: Redução da Amostra de Campo para Ensaios de Laboratório. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Procedimentos para Obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizados de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho Térmico de Edificações - Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho Térmico de Edificações Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos — Determinação da Densidade de Massa e do Teor de Ar Incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos — Determinação da Resistência à Tração na Flexão e à Compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para Concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado Miúdo - Determinação da Massa Específica e Massa Específica Aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15575**: Edificações Habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13749: Revestimento de Paredes Inorgânicas – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Determinação do Índice de Consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13528-2: Revestimento de Paredes Inorgânicas – Determinação da Resistência de Aderência à Tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Determinação de Massa Unitária e Índice de Vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ATKINS, P., JONES, L. Princípios de Química, 3ª ed., Editora Brookman, 2006.

AUGUSTO ROMANO, C. (2004). Blogs UFVJM. Gerenciador de Blogs da UFVJM. Disponível em: <<http://site.ufvjm.edu.br/icet/files/2013/04/Concreto-02.pdf>>. Acesso em: 03 de abril de 2024.

BARROS, I. M. da S. **Análise térmica e mecânica de argamassas de revestimento com adição de vermiculita expandida em substituição ao agregado**. Natal, 2018. 86p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

BAUER, E. **Revestimentos de argamassa – características e peculiaridades**. Brasília: LEM-UnB; Sinduscon, 2005. 92 p.

BJELKEVIK, A. **Water Cover Closure Design for Tailings Dams State of the Art Report**. [S. l.: s. n.], 2005.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas / Agência Nacional de Mineração; coordenação técnica de Karina Andrade Medeiros.** – Brasília: ANM, 2023. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>>. Acesso em: 22 de junho de 2023.

BRASIL MINERAL. **As maiores empresas do setor mineral. 2022.** Disponível em: <<https://www.brasilmineral.com.br/noticias/as-200-maiores-empresas-brasileiras-de-mineracao>>. Acesso em: 23 de junho de 2023.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução.** LTC, v. 8º Edição, 2014.

CARASEK H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. (Organizador/Editor). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: IBRACON. 2007.

CARASEK, H. **Argamassas.** Capítulo 26. In: ISAIA, Geraldo (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 2 ed. IBRACON, 2010. V.1 & v.2.p. 863-891 ISBN 978-85-98576-14-5 e 978-85-98576-15-2.

CARVALHO JR, A. N., BRANDÃO, P. R. G., & FREITAS, J. M. C. (2005). **Relação entre a resistência de aderência de revestimento de argamassa e o perfil de penetração de pasta de aglomerante nos poros do bloco cerâmico.** ANTAC, 518–529.

CARVALHO, G. B. de. 2018. 207 f. **Incidências de impactos decorrentes de acidentes com barragens de rejeito.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto -MG, 2018.

CASTRO, M. (2016, 1 de outubro). **Argamassas.** Disponível em: <[http://moemacastro.weebly.com/uploads/5/7/9/8/57985191/cap\\_4\\_argamassas](http://moemacastro.weebly.com/uploads/5/7/9/8/57985191/cap_4_argamassas)>. Acesso em: 04 de julho de 2023.

CINTRA, C. L. D. **Argamassa para revestimento com propriedades termoacústicas, produzida a partir de vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus.** 2013. 182f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) –Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP, 2013.

CHAVES, L. F. M. **Estudo da Adição do Resíduo Proveniente da Extração de Minério de Ferro em Argilas do Rio Grande do Norte**. 2009. 170 folhas. (Tese de Doutorado em Engenharia de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2009.

COSTA, J. H. B. da. **Panorama dos Estudos de Aproveitamento de Rejeitos de Mineração do Estado do Pará de 2010 a 2020 / Jaime Henrique Barbosa da Costa**. - Poços de Caldas, MG, 2022. Disponível em: <[https://repositorio.ifpa.edu.br/jspui/bitstream/prefix/335/1/Monografia\\_PanoramaEstudosAproveitamento.pdf](https://repositorio.ifpa.edu.br/jspui/bitstream/prefix/335/1/Monografia_PanoramaEstudosAproveitamento.pdf)>. Acesso: em 28 de junho de 2023.

DALLAGNOL, G. H. (2018). **Estudo sobre as características nos estados fresco e endurecido de uma argamassa para revestimentos estabilizada por 72 horas variando o tempo de aplicação a partir de sua mistura na central dosadora**. [TCC (Trabalho de conclusão de curso, do Curso de Engenharia Civil) não publicado]. Universidade de Caxias Do Sul.

DALIRI, F. **The Influence of the Desiccation and Stress History on Monotonic and Cyclic Shear Response of Thickened Gold Tailings**. 2013. Thesis – Carleton University, [s. l.], 2013.

DAVENPORT, W.G.; KING, M.; SCHLESINGER, M.; BISWAS, A.K. **Extractive Metallurgy of Copper**. Pergamon, Oxford. 4ª ed. 2002.

DAVID, C. P. **Heavy metal concentrations in growth bands of corals: a record 3 of mine tailings input through time (Marinduque Island, Philippines)**. Elsevier Science Ltd, [s. l.], 2002.

DIAS, R. T. V. Desempenho termomecânico de argamassas com adição de resíduos de vermiculita para construções rurais. (2018). Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/28298/RENATA%20TOMAZ%20VIEIRA%20DIAS%20%20DISSERTA%20c3%87%20c3%83O%20PPGEA%20CTR%202018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 25 de julho de 2024.

DIAS, L; S. **Rejeito de mineração de quartzito como agregado para produção de argamassa colante**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto.

Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

DNPM - **Departamento Nacional de Produção Mineral**. Cobre – Brasília: DNPM, 2010. 216 - 235 Pg.

ESPOSITO, T., MANTILA, J. N. R., CARRASCO, E. V. e MOREIRA, L. E. (2011). **Estudo da viabilidade do aproveitamento dos rejeitos da Samarco Mineração S.A. Na construção civil e como material alternativo em obras geotécnicas**. Relatório Técnico. UFMG. 52 p.

FERNANDES, F. R. C. **Recursos minerais e comunidade - impactos humanos, socioambientais e econômicos**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos: estudo e procedimentos de execução**. 2 ed. São Paulo: Pini, 2005.

FONTENELE, A. D., OLIVEIRA, L. M. G. D., & CABRAL, A. E. B. (2020). **Avaliação do estado fresco de argamassa mista de revestimento com substituição da cal por resíduos de cerâmica vermelha**. Disponível em: <[https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/57608/1/2020\\_eve\\_adfontenele.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/57608/1/2020_eve_adfontenele.pdf)>. Acesso: 05 de abril de 2024.

FONTES, W. C. (2013). **Utilização do rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento**. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/5709>>. Acesso em: 04 de julho de 2023.

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

FRANCISCON, M. (2007). **Tecnologia da Argamassa** [Monografia (Trabalho de conclusão de curso, do Curso de Engenharia Civil)]. Universidade São Francisco.

FREITAS, C. D. (2010). **Argamassas de revestimento com agregados miúdos de britagem da Região Metropolitana de Curitiba**. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1884/24528>>. Acesso em: 04 de julho de 2023.

GHISI, E., LAMBERTS, R. **Desempenho térmico das edificações-Parte1: Definições, símbolos e unidades**. Proposta de Norma. Florianópolis, 1998a.

GHISI, E., LAMBERTS, R. **Desempenho térmico de edificações- Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações**. Proposta de Norma. Florianópolis, 1998b.

GOMES, A. C. F. **Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração**. Dissertação (Mestrado) - UFMG. 202. Disponível em: < [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-AN9QQC/1/anacl\\_udiagomes\\_disserta\\_\\_ofinal.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-AN9QQC/1/anacl_udiagomes_disserta__ofinal.pdf)>. Acesso em: 24 de julho de 2024.

GOMES, G. M.; FLORES-COLEN, I.; MANGA, L. M.; SOARES, A.; DE BRITO, J. **The influence of moisture content on the thermal conductivity of external thermal mortars. Construction and Building Materials**. v. 135, p. 279–286. 2017.

GOMES, A. C. F. Aplicação de rejeito de mineração de ouro na produção de tijolo de solo-cimento. Tese (doutorado) -UFMG. 2021. Disponível em: < <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/36665>>. Acesso em: 26 de julho de 2024.

GONZALES, M. **As três primeiras minas brasileiras de cobre do século XIX e XX: suas histórias**. 2019. Disponível em: <[https://www.notasgeo.com.br/2019/11/as-tres-primeiras-minas-brasileiras-de\\_18.html](https://www.notasgeo.com.br/2019/11/as-tres-primeiras-minas-brasileiras-de_18.html)>. Acesso em: 23 de junho de 2023.

GORAI, B., JANA, R.K., PREMCHAND. **Characteristics and utilization of copper slag -a review. Resources. Conservation Recycle**. 39, pgs – 299 -313, 2002.

GRIGOLI, A. S. & HELENE, P. R. L. **Porosidade do concreto: melhora pela introdução de adições inertes**. Anais. Brasília, DF: UnB, 2002.

GUEDES, L. K. A. **Análise da substituição parcial do agregado miúdo em argamassas de cimento Portland, por rejeito de cassiterita**. Ariquemes: FAEMA, 2020. TCC(Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil – Faculdade de Meio Ambiente – FAEMA.

HIGASHIYAMA, H.; SAPPAKITTIPAKORN, M.; SANO M.; YAGISHITA F. Chloride ion penetration into mortar containing ceramic waste aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 33, p. 48-54, 2012.

HUDSON-EDWARDS, K. et al. **Sources, distribution and storage of heavy metals in the Río Pilcomayo, Bolivia** *Journal of Geochemical Exploration*. [S. l.: s. n.], 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Brasília: [s. n.], 2016.

JACOMINO, V. M. F. et al. **Controle Ambiental das Indústrias de Ferro- Gusa em Altos-Fornos a Carvão Vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. p. 181-197.

JUNIOR, W. R. P.; OLIVEIRA, C. A. S. **Avaliação da utilização do rejeito de minério de ferro na formulação de argamassas**. Disponível em:<

<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/25954/23610/315945>>. Acesso em: 30 de junho de 2023.

KOSSOFF, D. et al. **Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation**. *Applied Geochemistry*, [s. l.], v. 51, p. 229–245, 2014.

LEAL, M. M. R. Desenvolvimento de argamassas de revestimento com comportamento térmico melhorado. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal, 2012.

LEMO, D. A. Q.; OLIVEIRA, C. A.; COSTA, B. D.; SANTOS, S. N. (2023). **O uso de rejeitos de minério de ferro como matéria-prima alternativa na produção de tijolos de cimento**. *ALTUS CIÊNCIA*, 17(17), 332-341. Disponível

em:<<http://revistas.fcjp.edu.br/ojs/index.php/altuscienca/article/view/79/83>>. Acesso em: 29 de junho de 2023.

LIMA, B. D. C., LIMA FERNANDES, G. B., & LÜCKEROTH, J. B. G. **ANÁLISE DA AGREGAÇÃO DO REJEITO DE MINERAÇÃO EM MATERIAIS PARA USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL COM FOCO EM ARGAMASSA SUSTENTÁVEL**. Disponível em:< <http://bib.pucminas.br:8080/pergamumweb/vinculos/00000f/00000fe0.pdf>>. Acesso em: 26 de julho de 2024.

LOTTERMOSER, B. G. **Mine wastes: characterization, treatment and environmental impacts**. Second Editioned. [S. l.]: Springer, 2007.



LOTTERMOSER, B. G. (2011). **Recycling, Reuse and Rehabilitation of Mine Wastes**. *Elements*, 7(6), 405–410. Disponível em: <<https://pubs.geoscienceworld.org/msa/elements/article-abstract/7/6/405/137924/Recycling-Reuse-and-Rehabilitation-of-Mine-Wastes?redirectedFrom=fulltext>>. Acesso em: 04 de julho de 2023.

MARTINS, L. M. (2022). Argamassas isolantes térmicas para revestimento com resíduos da mineração e siderurgia. Disponível em: <<https://repositorio.ufop.br/handle/123456789/17382>>. Acesso em: 25 de julho de 2024.

MEDEIROS, M. Estudo de argamassas de revestimento com resíduo de scheelita. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2016. Disponível em: <[https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/22457/1/MauriceiaMedeiros\\_DISSERT.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/22457/1/MauriceiaMedeiros_DISSERT.pdf)>. Acesso em: 04 de abril de 2024.

MECK, M.; LOVE, D.; MAPANI, B. **Zimbabwean mine dumps and their impacts on river water quality – a reconnaissance study**. *Physics and Chemistry of the Earth*, [s. l.], v. 31, n. 15–16, p. 797–803, 2006.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: PINI, 2008.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto, Microestrutura, Propriedades e Materiais**, 4 ed. Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), São Paulo, 2014.

MINTLAB – Suporte ao Minitab 2018 – **O que é ANOVA?**. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling>>. Acesso em: 04 de julho de 2023.

MUMPEMBE, M. N., LAWRENCE, M. e MICHAEL, K. (2020) "**Assessment of Artisan Clay Bricks for Structural Strength, Chemical Stability and Durability**," *Journal of Civil Construction and Environmental Engineering*, 5(6), p. 178.

MUNIZ, L. F. C.; TRALDI, M. A. B.; ARAÚJO, R. C. **Utilização do rejeito de mineração na fabricação de argamassa**. 2012.

NETO, M. L. Q.; MEDEIROS, M. K. S.; FLORÊNCIO, F. D. C. **Uso de resíduos da mineração de escelita em argamassas de assentamento e revestimento.** 2016.

NIERWINSKI, H. P. **Caracterização e Comportamento Geomecânico de Rejeitos de Mineração.** 2019. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

NOCITI, D. M. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012. Disponível em:< [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94442/nociti\\_dm\\_me\\_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94442/nociti_dm_me_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 29 de junho de 2023.

OLIVEIRA, G. A. G., LANGE, L. C. **Gerenciamento dos Resíduos Sólidos Industriais na Área Mineira da Bacia Hidrográfica do Médio São Francisco.** Saneamento Ambiental Brasileiro. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2005. p. 1-13.

OLIVEIRA, T. Y. M. **Estudo Sobre o Uso De Materiais de Construção Alternativos que Otimizam a Sustentabilidade em Edificações.** Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2015. Disponível em:< <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10014837.pdf>>. Acesso em: 30 de junho de 20223.

OTTOBONI, J. **Resíduo industrial é ainda o grande vilão do meio ambiente.** 5 jun. 2018. Disponível em: <<https://envolverde.cartacapital.com.br/residuo-industrial-e-ainda-o-grandevilao-no-meio-ambiente/>>. Acesso em: 24 de junho 2023.

PALAMAR, I., BARLUENGA, G., PUENTES, J., (2015) Lime–cement mortars for coating with improved thermal and acoustic performance. *Construction and Building Materials* 2015:75: 306-314.

PAPST, A. L. **Uso de Inércia térmica no clima subtropical. Estudo de caso em Florianópolis – SC.** Florianópolis, 1999. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

PASSOS, M. G. **Análise comparativa do potencial de utilização de resíduo de mineração em argamassa autonivelante.** / Maelle Guedes Passos. Pombal, 2021. Trabalho de

Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2021.

QOMI M.J, et. al., **Combinatorial molecular optimization of cement hydrates** - Nature Communications - 2014.

RABINOWITZ, M. B. **Lead isotopes in soils near five historic American lead smelters and refineries**. [S. l.: s. n.], 2005.

RIVERO, R. *Arquitetura e Clima: acondicionamento térmico natural*. 2ª edição. D.C. Luzzatto Editores, Porto Alegre, 1986.

SANTAMARÍA-VICARIO, I. *et al.* **Design of masobry mortars fabricated concurrently wiht diferente stell slag aggregates**. *Consuction and Building Materials*, v. 95, p. 197-206, 2015.

SANTOS, S. J. A.; DANTAS, A. C. P.; LIMA, J. S. S. **Potencial Mineral no Semiárido Brasileiro**. 2017. Disponível em:  
<[https://www.editorarealize.com.br/editora/anais/conidis/2017/TRABALHO\\_EV074\\_MD4\\_SA2\\_ID538\\_02102017230915.pdf](https://www.editorarealize.com.br/editora/anais/conidis/2017/TRABALHO_EV074_MD4_SA2_ID538_02102017230915.pdf)>. Acesso em: 23 de junho de 2023.

SHOUKRY, H., KOTKATA, M. F., ABO-EL-ENEIN, S.A., MORSY, M.S., SHEBL, S.S. (2016) **Enhanced physical, mechanical and microstructural properties of lightweight vermiculite cement composites modified with nano metakaolin**. *Construction and Building Materials* 2016:112: 276–283.

SILVA, L. M., RIBEIRO, R. A., LABRINCHA, J. A., FERREIRA, V. M. (2010). "**Role of lightweight fillers on the properties of a mixed-binder mortar**." *Cement and Concrete Composites* 32(1): 19-24.

SILVA, F. L. **Aproveitamento e reciclagem de resíduos da concentração de minério de ferro na produção de Pavers e cerâmica**. 2014. 126 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) –Rede Temática em Engenharia de Materiais –REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

SILVA, F. R. G. D. (2022). **Análise de massas cerâmicas utilizando argila piauiense, com teores de resíduo de pó de balão e rejeito de minério de cobre visando a produção de**

**cerâmica vermelha.** Disponível

em:<[https://bdm.ufpa.br:8443/bitstream/prefix/5578/1/TCC\\_AnaliseMassasCeramicas.pdf](https://bdm.ufpa.br:8443/bitstream/prefix/5578/1/TCC_AnaliseMassasCeramicas.pdf)>.

Acesso em: 28 de junho de 2023.

SILVEIRA, M. D. (2015). **Utilização de resíduos de mineração na construção civil.**

Disponível em:

<[https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBDA2SHGH/1/marina\\_duque\\_silveira\\_utiliza\\_o\\_de\\_residuos\\_de\\_minera\\_o\\_na\\_constru\\_o\\_civil\\_cecc\\_ufmg\\_jan15.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBDA2SHGH/1/marina_duque_silveira_utiliza_o_de_residuos_de_minera_o_na_constru_o_civil_cecc_ufmg_jan15.pdf)>. Acesso em:

28 de junho de 2023.

SINHORELLI, K. S. **Estudo das propriedades realógicas e térmicas das argamassas de revestimento contendo adições minerais e vermiculita.** Dissertação de Mestrado –

UFPB/CT. João Pessoa. 2019. Disponível em:

[https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/19802/1/K%c3%a1ssiaDosSantosSinhorelli\\_Dissert.pdf](https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/19802/1/K%c3%a1ssiaDosSantosSinhorelli_Dissert.pdf)>. Acesso de 04 de julho de 2023.

SOUSA, D. M. (2019). **Utilização de rejeito de minério do cobre como agregado miúdo na produção de concreto.**

SCHANKOSKI, R. A., PRUDÊNCIO JR., L. R., & PILAR, R. (2015). **Influência do tipo de argamassa e suas propriedades do estado fresco nas propriedades mecânicas de alvenarias estruturais de blocos de concreto para edifícios altos.** *Matéria* (Rio de Janeiro), 20(4), 1008–1023. Disponível em:<<https://doi.org/10.1590/s1517-707620150004.0104>>.

Acesso em: 04 de julho de 2023.

TALANG, N. P. R. SIRIVITHAYAPAKORN, S. (2016) "**Application of Life Cycle Assessment Method for Environmental Impact Assessment of Fired Brick Production Plant in Thailand,**" *Applied Environmental Research*, p. 15-26.

TREVIZAN, E. V. (2013). **Aproveitamento de rejeitos na mineração** [TCC (Graduação) não publicada]. Universidade Federal de Goiás.

TRISTÃO, F. A. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento.** Florianópolis, 1995. 197p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

TURRA, D. G. (2016). **Contribuições para o estudo de algumas propriedades nos estados fresco e endurecido da argamassa estabilizada por 72 horas** [Monografia (Graduação em Engenharia Civil) não publicada]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VICK, S. G. **Planning, design, and analysis of tailings dams**. [S. l.]: BiTech, 1990.

VILAÇA, A. S. I. (2020). **Valorização de resíduos da mineração de ferro do quadrilátero ferrífero: métricas de avaliação na perspectiva da economia circular**. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/219206/PCEM0558-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>>. Acesso em: 28 de junho de 2023.

XU J, CHU H, XU Y, et al. **Prediction of compressive strength and elastic modulus of expanded polystyrene lightweight concrete**. Mag Concr Res. 2015;67(17):1–9.

YELLISHETTY, M., KARPE, V., REDDY, E.H., SUBHASH, K.N., **Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study**. Resources, Conservation and Recycling, v.52, n.11, p. 1283-1289, 2008.

YOUNGER, P. L.; WOLKERSDORFER, C. **Mining Impacts on the Fresh Water Environment: Technical and Managerial Guidelines for Catchment Scale Management**. [S. l.: s. n.], 2004.

WOLFF, A.P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale. 2009. 90 folhas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

**ANEXO A - ARGAMASSA CONFECCIONADA A PARTIR DE REJEITO DE  
MINERAÇÃO DE COBRE**

**RELATÓRIO DE ENSAIO N° 286430/2024-0****Processo Comercial N° 9139/2024-1*****DADOS REFERENTES AO CLIENTE***

<b>Empresa solicitante:</b>	MINERACAO CARAIBA S/A
<b>Endereço:</b>	Fazenda LOC FAZENDA CARAIBA, SN - SEDE - Jaguarari - Bahia - CEP: 48960000 .
<b>Nome do Solicitante:</b>	Lucia Maria Soares dos Santos e Otoniel Cajuí Bonfim

**IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA:****Argamassa confeccionada a partir de rejeito****Análise Solicitada**

Classificação de Resíduo segundo NBR 10004

**Data da Amostragem**

24/07/2024

**Data de Entrada no Laboratório**

25/07/2024 08:22

**Data de Elaboração do Relatório de Ensaio**

13/08/2024

## RESULTADOS ANALITICOS DA AMOSTRA

Argamassa confeccionada a partir de rejeito de cobre

Coletor da Amostra: Interessado

### ⇒ Resíduo - Massa Bruta (NBR 10004)

#### NBR 10004:2004 - Massa Bruta

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP - NBR 10004:2004
pH (Suspensão 1:1)		2 a 13	12,37	2,0 - 12,5 (b)
Sulfeto (como H <sub>2</sub> S)	mg/kg	20	< 20	500 (c)
Porcentagem de Sólidos	% p/p	0,05	98,4	
Cianeto (como HCN)	mg/kg	0,99	< 0,99	250 (c)

### ⇒ Resíduo - Extrato Lixiviado (NBR 10005)

#### NBR 10005:2004 - Lixiviado - (Anexo F) Inorgânicos

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Bário	mg/L	0,01	0,0770	70,0
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Cromo	mg/L	0,01	0,118	5,0
Fluoreto	mg/L	0,1	0,3	150
Mercúrio	mg/L	0,000075	< 0,000075	0,1
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	5,0
Selênio	mg/L	0,005	< 0,005	1,0

#### NBR 10005:2004 - Lixiviado - (Anexo F) Orgânicos

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
1,1-Dicloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	3,0
1,2-Dicloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	1,0
1,4-Diclorobenzeno	mg/L	0,001	< 0,001	7,5
2,4,5-T	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,2
2,4,5-TP	mg/L	0,00005	< 0,00005	1,0
2,4,5-Triclorofenol	mg/L	0,0001	< 0,0001	400
2,4,6-Triclorofenol	mg/L	0,0001	< 0,0001	20,0
2,4-D	mg/L	0,00005	< 0,00005	3,0
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,13
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,003
Benzeno	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Benzo(a)pireno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,07
Cloreto de Vinila	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Clorobenzeno	mg/L	0,001	< 0,001	100
Clorofórmio	mg/L	0,001	< 0,001	6,0
DDT (isômeros)	mg/L	0,00001	< 0,00001	0,2
Endrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,06
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,1
Hexaclorobutadieno	mg/L	0,00001	< 0,00001	0,5
Hexacloroetano	mg/L	0,00005	< 0,00005	3,0
3+4-Metilfenol (m+p-Cresol)	mg/L	0,0001	< 0,0001	200
Metoxicloro	mg/L	0,00003	< 0,00003	2,0
Nitrobenzeno	mg/L	0,00005	< 0,00005	2,0
2-Metilfenol (o-Cresol)	mg/L	0,00005	< 0,00005	200
Pentaclorofenol	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,9



Piridina	mg/L	2,5	< 2,5	5,0
Tetracloroeto de Carbono	mg/L	0,001	< 0,001	0,2
Tetracloroeteno	mg/L	0,001	< 0,001	4,0
Toxafeno	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,5
Tricloroeteno	mg/L	0,001	< 0,001	7,0
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	0,00002	< 0,00002	0,003
Lindano (g-HCH)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,2

#### NBR 10005:2004 - Lixiviado - (Anexo F) Orgânicos

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Clordano (cis e trans)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,02
Metililcetona (2-Butanona)	mg/L	2,5	< 2,5	200

#### NBR 10005:2004 - Lixiviado - (Anexo F)

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Tempo de Lixiviação	horas	---	18	16 - 20
Solução de Extração		---	1	
pH Final do Lixiviado		---	11,06	

### ⇒ Resíduo - Extrato Solubilizado (NBR 10006)

#### NBR 10006:2004 - Solubilizado - (Anexo G) Inorgânicos

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Alumínio	mg/L	0,01	0,815	0,2
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Bário	mg/L	0,01	0,0460	0,7
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Cianeto	mg/L	0,05	< 0,05	0,07
Cloro	mg/L	5	11,9	250
Cobre	mg/L	0,005	0,0479	2,0
Cromo	mg/L	0,01	0,0574	0,05
Ferro	mg/L	0,01	0,0160	0,3
Fluoreto	mg/L	0,5	< 0,5	1,5
Índice de Fenóis	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Manganês	mg/L	0,01	< 0,01	0,1
Mercúrio	mg/L	0,000075	< 0,000075	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	1	< 1	10,0
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Selênio	mg/L	0,005	< 0,005	0,01
Sódio	mg/L	0,5	11,6	200
Sulfato	mg/L	5	156	250
Surfactantes (como LAS)	mg/L	0,2	< 0,2	0,5
Zinco	mg/L	0,01	< 0,01	5,0

#### NBR 10006:2004 - Solubilizado - (Anexo G) Orgânicos

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
2,4,5-T	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,002
2,4,5-TP	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,03
2,4-D	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,03
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,00003
DDT (isômeros)	mg/L	0,00001	< 0,00001	0,002
Endrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,0006
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,00005	< 0,00005	0,001
Metoxicloro	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,02
Toxafeno	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,005
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	0,00002	< 0,00002	0,00003
Lindano (g-HCH)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,002
Clordano (cis e trans)	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,0002

**NBR 10006:2004 - Solubilizado - (Anexo G)**

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
pH Final do Solubilizado	---	2 a 13	11,90	

## CONTROLE DE QUALIDADE DO LABORATÓRIO

### Controle de Qualidade - Metais Totais - Água

**312748/2024-0 - Branco de Análise - Metais Totais - Água**

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
------------	---------	----	-----------------------

**312748/2024-0 - Branco de Análise - Metais Totais - Água**

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
Prata	µg/L	10	< 10
Alumínio	µg/L	10	< 10
Arsênio	µg/L	10	< 10
Bário	µg/L	10	< 10
Cádmio	µg/L	1	< 1
Cromo	µg/L	10	< 10
Cobre	µg/L	5	< 5
Ferro	µg/L	10	< 10
Sódio	µg/L	500	< 500
Selênio	µg/L	5	< 5
Zinco	µg/L	10	< 10
Manganês	µg/L	10	< 10

**312749/2024-0 - Amostra Controle - Metais Totais - Água**

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Arsênio	0,1	mg/L	105	80 - 120
Cromo	0,1	mg/L	105	80 - 120
Cobalto	0,1	mg/L	100	80 - 120
Lítio	0,1	mg/L	95	80 - 120
Manganês	0,1	mg/L	98	80 - 120
Estrôncio	0,1	mg/L	103	80 - 120

### Recuperação dos Surrogates

**312748/2024-0 - Branco de Análise - Metais Totais - Água**

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Ítrio (Metais Totais)	100	µg/L	101	70 - 130

**312749/2024-0 - Amostra Controle - Metais Totais - Água**

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Ítrio (Metais Totais)	100	µg/L	102	70 - 130

**Resíduo - Extrato Solubilizado (NBR 10006)**

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Ítrio (Metais Totais)	100	µg/L	90,0	70 - 130

### Controle de Qualidade - Mercúrio - Água

**306540/2024-0 - Branco de Análise - Mercúrio Total - Água**

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
Mercúrio	µg/L	0,075	< 0,075

**306541/2024-0 - Amostra Controle - Mercúrio Total - Água**

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Mercúrio	1	µg/L	90	80 - 120

## Controle de Qualidade - Metais Totais - Água

**296936/2024-0 - Branco de Análise - Metais Totais - Água**

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
Prata	µg/L	10	< 10
Alumínio	µg/L	10	< 10
Arsênio	µg/L	10	< 10
Bário	µg/L	10	< 10
Cádmio	µg/L	1	< 1
Cromo	µg/L	10	< 10
Cobre	µg/L	5	< 5
Ferro	µg/L	10	< 10
Sódio	µg/L	500	< 500
Selênio	µg/L	5	< 5
Zinco	µg/L	10	< 10
Manganês	µg/L	10	< 10

**296937/2024-0 - Amostra Controle - Metais Totais - Água**

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Arsênio	0,1	mg/L	106	80 - 120
Cromo	0,1	mg/L	108	80 - 120
Cobalto	0,1	mg/L	104	80 - 120
Lítio	0,1	mg/L	88	80 - 120
Manganês	0,1	mg/L	104	80 - 120
Estrôncio	0,1	mg/L	102	80 - 120

## Recuperação dos Surrogates

**296936/2024-0 - Branco de Análise - Metais Totais - Água**

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Ítrio (Metais Totais)	100	µg/L	98,0	70 - 130

**296937/2024-0 - Amostra Controle - Metais Totais - Água**

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Ítrio (Metais Totais)	100	µg/L	101	70 - 130

**Resíduo - Extrato Lixiviado (NBR 10005)**

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Ítrio (Metais Totais)	100	µg/L	76,0	70 - 130

## Controle de Qualidade - Mercúrio - Água

**301937/2024-0 - Branco de Análise - Mercúrio Total - Água**

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
Mercúrio	µg/L	0,075	< 0,075

**301938/2024-0 - Amostra Controle - Mercúrio Total - Água**

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Mercúrio	1	µg/L	87	80 - 120

## Controle de Qualidade - Fenóis Totais - Efluentes

**306722/2024-0 - Branco de Análise - Fenóis Totais - Efluentes**

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
Índice de Fenóis	mg/L	0,002	< 0,002

**306723/2024-0 - Amostra Controle - Fenóis Totais - Efluente**

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Fenóis Totais	0,025	mg/L	101	70 - 130

## Controle de Qualidade - VOC Lixiviado

**300652/2024-0 - Branco de Análise - VOC - Água**

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
1,1-Dicloroetano	µg/L	1	< 1
1,2-Dicloroetano	µg/L	1	< 1
1,4-Diclorobenzeno	µg/L	1	< 1
Benzeno	µg/L	1	< 1
Cloreto de Vinila	µg/L	1	< 1
Clorobenzeno	µg/L	1	< 1
Clorofórmio	µg/L	1	< 1
Tetracloroeto de Carbono	µg/L	1	< 1
Tetracloroetano	µg/L	1	< 1
Tricloroetano	µg/L	1	< 1

**300653/2024-0 - Amostra Controle - VOC - Água**

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
1,1-Dicloroetano	25	µg/L	100	70 - 130
Benzeno	25	µg/L	92	70 - 130

**300653/2024-0 - Amostra Controle - VOC - Água**

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Tricloroeteno	25	µg/L	92	70 - 130
Clorobenzeno	25	µg/L	92	70 - 130
1,2-Dicloroetano	25	µg/L	112	70 - 130
1,4-Diclorobenzeno	25	µg/L	104	70 - 130
Cloro de Vinila	25	µg/L	92	70 - 130
Clorofórmio	25	µg/L	104	70 - 130
Tetracloroeto de Carbono	25	µg/L	92	70 - 130
Tetracloroeteno	25	µg/L	92	70 - 130

## Recuperação dos Surrogates

**300652/2024-0 - Branco de Análise - VOC - Água**

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Dibromofluorometano	25	µg/L	101	70 - 130
p-Bromofluorbenzeno	25	µg/L	81,7	70 - 130

**300653/2024-0 - Amostra Controle - VOC - Água**

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Dibromofluorometano	25	µg/L	103	70 - 130
p-Bromofluorbenzeno	25	µg/L	81,6	70 - 130

**Resíduo - Extrato Lixiviado (NBR 10005)**

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Dibromofluorometano	25	µg/L	88,3	70 - 130
p-Bromofluorbenzeno	25	µg/L	107	70 - 130

**Metodologias:**

As metodologias utilizadas pela BIOAGRI foram baseadas “SW 846 (USEPA 1986, Test Method for Evaluating Solid Waste Report Number 846, Washington, DC” e as referências:

**Normas de Referência:**

Norma NBR 10004:2004 da ABNT - Classificação de Resíduos Sólidos  
 Norma NBR 10006:2004 da ABNT - Ensaio de Solubilização  
 Norma NBR 10005:2004 da ABNT - Ensaio de Lixiviação

As determinações sobre os extratos do Solubilizado e Lixiviado foram realizadas com base nos seguintes métodos do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – 23<sup>th</sup> Edition – 2017

**Métodos analíticos:**

Ânions: EPA 300.0: 1993, POP PA 032

Cianeto Solubilizado: ISO 14403-2: 2012

Cianeto: Determinação: EPA ISO 14403-2: 2012 / Preparo: EPA 9010 C: 2004

Fluoreto: Determinação: SMWW, 24ª Edição, 2023 - Método 4500 F C

Índice de Fenóis: ISO 14402: 1999

Lixiviação: ABNT NBR 10005: 2004, SMWW, 23ª Edição, 2017 - Método 4500H+ B

Mercurio: EPA 245.7: 2005

Metais Totais (ICP-OES): Determinação: EPA 6010 D: 2018 / Prep.: EPA 3010 A: 1992

pH: EPA 9045 D: 2004

Porcentagem de Sólidos e Cinzas: SMWW, 24ª Edição, 2023 - Método 2540 G

Solubilização: ABNT NBR 10006: 2004, SMWW, 23ª Edição, 2017 - Método 4500H+ B

Sulfeto: Determinação: EPA 9034: 1996 / Preparo: EPA 9030 B: 1996

Surfactantes: Determinação: ISO 16265:2019

SVOC: Determinação: EPA 8270 E:2018 / Preparo: EPA 3510 C:1996

Toxafeno: EPA 8081 B: 2007

VOC: Determinação: EPA 8260 D: 2018 / Preparo: EPA 5021A: 2014

**Massa Bruta - Observações dos parâmetros**

(b) = Avaliação da Corrosividade - Item "a" do tópico 4.2.1.2 da NBR 10004:2004  
(c) = Avaliação da reatividade - Item "e" do tópico 4.2.1.3 da NBR 10004:2004.

<b>LQ*:</b>	LQ = Limite de Quantificação da Amostra ( $LQ = LQM \times \text{fator de preparo da amostra} \times \text{correção base seca, quando aplicável}$ ); LQM = Limite de Quantificação do Método.
<b>VMP**:</b>	Valores Máximos Permitidos pela Norma ABNT NBR 10004:2004.
<b>Notas:</b>	“Mérieux NutriSciences” é nome fantasia, a razão social permanece Bioagri Laboratórios Ltda. Este Relatório de Ensaio só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração. LQ/ Faixa = Limite de Quantificação ou Faixa de Trabalho, quando aplicável..
<b>Responsabilidade Técnica:</b>	Os ensaios foram realizados na unidade da Bioagri Laboratórios Ltda. - Matriz, situada na Rua Aljovil Martini, 177/201, Bairro Dois Córregos, Cep. 14420-833, Piracicaba/SP, registrada no CRQ 4ª Região sob nº 16082-F e responsabilidade técnica do profissional Marcos Donizete Ceccatto, CRQ nº 04364387, 4ª.Região.
<b>Informações Complementares:</b>	<b>Classificação de resíduos sólidos: As opiniões e interpretações expressas abaixo não fazem parte do escopo da acreditação deste laboratório.</b> Um resíduo é classificado como Classe I (Perigoso) quando um ou mais parâmetros do Lixiviado e/ou Massa Bruta estiverem acima dos valores máximos permitidos pelos anexos da NBR 10004. Um resíduo é classificado como Classe II A (Não Inerte) quando um ou mais parâmetros do solubilizado estiverem acima dos valores máximos permitidos pelos Anexo G da NBR 10004. Um resíduo é classificado como Classe II B (Inerte) quando todos os parâmetros, tanto da Massa Bruta quanto dos ensaios de solubilização e lixiviação estiverem abaixo dos valores máximos permitidos pelos anexos da NBR 10004.
<b>Massa Bruta:</b>	Comparando-se os resultados obtidos com os Valores Máximos Permitidos pela NBR 10004:2004 podemos afirmar que: Os parâmetros satisfazem os limites permitidos.
<b>Solubilizado:</b>	Comparando-se os resultados obtidos com os Valores Máximos Permitidos pela NBR 10004:2004 - Anexo G podemos afirmar que: O(s) parâmetro(s) Alumínio, Cromo ultrapassam os limites máximos permitidos.
<b>Lixiviado:</b>	Comparando-se os resultados obtidos com os Valores Máximos Permitidos pela NBR 10004:2004 - Anexo F podemos afirmar que: O(s) parâmetro(s) satisfazem os limites permitidos.  Em função dos resultados obtidos, a amostra de resíduo deve ser classificada como Classe II A - Resíduo Não Inerte.  Obs : A Classificação do resíduo foi efetuada baseando-se somente nos parâmetros analisados.

Chave de Validação: 4e2ab52f27872a88c6cb5713f7680a7e

  
Ariane Tonin  
Controle de Qualidade  
CRQ 004487599 – 4ª Região

  
Joseane Maria Bülow  
Gerente Técnica  
CRQ 09200516 – 9ª Região