

# UFPA

**PPGEC**

**Universidade Federal  
do Pará**



Renara Borges Durães

## **RESISTÊNCIA MECÂNICA DE CONCRETOS COM A SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS POR RESÍDUO DE COBRE E ESCÓRIA DE FERRO GUSA**

Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil

Dissertação orientada pelo Professor Dr. Marcelo de Souza  
Picanço

Coorientador: Prof. Dr. Aedjota Matos de Jesus

Belém – Pará – Brasil

2025

Renara Borges Durães

**RESISTÊNCIA MECÂNICA DE CONCRETOS COM A SUBSTITUIÇÃO  
DE AGREGADOS POR RESÍDUO DE COBRE E ESCÓRIA DE FERRO  
GUSA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

Área de concentração: Estruturas e Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Coorientador: Prof. Dr. Aedjota Matos de Jesus

Belém – Pará – Brasil

2025



# RESISTÊNCIA MECÂNICA DE CONCRETOS COM A SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS POR RESÍDUO DE COBRE E ESCÓRIA DE FERRO GUSA

AUTORA:

**RENARA BORGES DURÃES**

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

APROVADO EM: 22 / 01 / 2025.

BANCA EXAMINADORA:



Documento assinado digitalmente

**MARCELO DE SOUZA PICANÇO**

Data: 29/01/2025 12:05:55-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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



Documento assinado digitalmente

**ANDRIELLI MORAIS DE OLIVEIRA**

Data: 28/01/2025 14:49:47-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Dra. Andrielli Moraes de Oliveira  
Membro Externo (UFG)



Documento assinado digitalmente

**LUCIANA DE NAZARE PINHEIRO CORDEIRO**

Data: 29/01/2025 09:53:57-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira  
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

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

---

D947r DURÃES, RENARA BORGES.  
RESISTÊNCIA MECÂNICA DE CONCRETOS COM A  
SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS POR RESÍDUO DE  
COBRE E ESCÓRIA DE FERRO GUSA / RENARA  
BORGES DURÃES. — 2025.  
56 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço  
Coorientador(a): Prof. Dr. Aedjota Matos de Jesus  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, Belém, 2025.

1. Reaproveitamento de resíduos; resíduos  
industriais; resíduo de cobre; escória de ferro gusa. I.  
Título.

## DEDICATÓRIA

Àqueles que amei, amo e sempre amarei, e que, de diferentes formas, me ajudaram a chegar até aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, cuja sabedoria guia o tempo e cujos planos sempre se revelam no momento certo. A Ele, agradeço a força e resiliência ao longo desta jornada, permitindo que cada etapa fosse cumprida com propósito e aprendizado.

À minha mãe, pelo amor incondicional, pela dedicação incansável e por ser minha maior referência de força e generosidade. Ao meu pai, pelo exemplo de integridade e pelo apoio silencioso, que me deu segurança em todos os momentos. À minha irmã, pelo companheirismo, pelas palavras de incentivo e bom humor que tornaram os dias mais leves. Vocês são o alicerce da minha vida e a razão de cada conquista.

Ao meu amigo Manoel Júnior, por sua amizade e pelas palavras de incentivo que reacenderam em mim o desejo de concluir este mestrado. Sua confiança e apoio foram essenciais para que eu retomasse este sonho com renovada determinação.

Ao professor Marcelo Picanço, pela orientação, pelo acolhimento e pela paciência ao longo deste processo. Sua dedicação foram cruciais para a construção deste trabalho, e serei eternamente grata por sua contribuição.

À Joana Pinheiro, pelo apoio indispensável no estudo dos resíduos, cuja colaboração enriqueceu este trabalho e tornou possível a superação de etapas desafiadoras.

Aos amigos que estiveram ao meu lado ao longo desta caminhada, compartilhando tanto os momentos de incerteza quanto as alegrias das conquistas. Cada gesto, cada conversa e cada demonstração de apoio foram fundamentais para tornar esta trajetória mais leve e significativa.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste sonho, meu sincero agradecimento.

## EPÍGRAFE

*"Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo propósito debaixo do céu."*

— Eclesiastes 3:1 (Bíblia Sagrada)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma das etapas da pesquisa .....	26
Figura 2- Resíduo de cobre.....	29
Figura 3- Escória de ferro.....	29
Figura 4- Resistência à compressão de concretos com substituição parcial de agregados naturais por resíduo de cobre e escória de ferro-gusa .....	36
Figura 5- Módulo de elasticidade de concretos com substituição parcial de agregados naturais por resíduo de cobre e escória de ferro-gusa.....	37
Figura 6- Resistência média à compressão diametral de concretos com substituição parcial de agregados naturais por resíduo de cobre e escória de ferro-gusa .....	38
Figura 7- Resistência média à tração na flexão de concretos com substituição parcial de agregados naturais por resíduo de cobre e escória de ferro-gusa .....	39



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Caracterização do cimento.....	27
Tabela 2- Informações disponibilizadas pelo fabricante do produto.....	28
Tabela 3- Composição de Cada Dosagem .....	31
Tabela 4- Programa experimental do estudo .....	32
Tabela 5- Propriedades físicas dos agregados naturais (areia fina e seixo fino) e alternativos (resíduo de cobre e escória de ferro) .....	34
Tabela 6- Ensaio de abatimento do concreto (Slump Test).....	40

## RESUMO

A crescente preocupação com a sustentabilidade na construção civil tem incentivado a busca por materiais alternativos que reduzam o impacto ambiental sem comprometer o desempenho estrutural. Nesse contexto, este estudo investigou a viabilidade da substituição parcial de agregados naturais por resíduos de cobre e escória de ferro-gusa na produção de concreto, avaliando a resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência à compressão diametral e módulo de elasticidade do concreto, além de avaliar a trabalhabilidade da mistura no estado fresco. Para isso, foram preparadas misturas com diferentes teores de substituição de agregados naturais por resíduos industriais (25%, 50% e 75%), comparadas a um concreto de referência sem substituições. Os materiais foram caracterizados quanto à sua granulometria, densidade e absorção de água, e os ensaios foram conduzidos conforme as normas técnicas vigentes. Os resultados indicaram que misturas com até 25% de substituição apresentaram desempenho mecânico semelhante ao concreto convencional, mantendo valores satisfatórios de resistência à compressão e módulo de elasticidade. A partir de 50% de substituição, observou-se uma redução na resistência mecânica, associada ao aumento da porosidade da matriz cimentícia e à menor aderência entre os agregados e a pasta de cimento. Além disso, o abatimento do concreto fresco diminuiu proporcionalmente ao aumento da substituição, evidenciando a influência dos resíduos na trabalhabilidade da mistura. Dessa forma, conclui-se que a incorporação de resíduos de cobre e escória de ferro-gusa em teores controlados pode representar uma alternativa sustentável para a construção civil, contribuindo para a redução do consumo de agregados naturais e para o reaproveitamento de resíduos industriais.

**Palavras-chave:** Reaproveitamento de resíduos; resíduos industriais, resíduo de cobre; escória de ferro gusa

## ABSTRACT

The growing concern for sustainability in civil construction has encouraged the search for alternative materials that reduce environmental impact without compromising structural performance. In this context, this study investigated the feasibility of partially replacing natural aggregates with copper waste and pig iron slag in concrete production, evaluating the compressive strength, flexural tensile strength, diametrical compressive strength and modulus of elasticity of the concrete, in addition to evaluating the workability of the mixture in the fresh state. For this purpose, mixtures with different levels of replacement of natural aggregates with industrial waste (25%, 50% and 75%) were prepared, compared to a reference concrete without replacements. The materials were characterized according to their particle size, density and water absorption, and the tests were conducted according to current technical standards. The results indicated that mixtures with up to 25% replacement presented mechanical performance similar to conventional concrete, maintaining satisfactory values of compressive strength and modulus of elasticity. From 50% replacement, a reduction in mechanical strength was observed, associated with an increase in the porosity of the cementitious matrix and a lower adhesion between the aggregates and the cement paste. In addition, the slump of the fresh concrete decreased proportionally to the increase in replacement, evidencing the influence of the waste on the workability of the mixture. Thus, it is concluded that the incorporation of copper waste and pig iron slag in controlled levels can represent a sustainable alternative for civil construction, contributing to the reduction of the consumption of natural aggregates and to the reuse of industrial waste.

**Keywords:** Waste reuse; industrial waste; copper waste; pig iron slag

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	13
1.3	OBJETIVOS	14
1.3.1	<b>Objetivo Geral</b>	14
1.3.2	<b>Objetivos Específicos</b>	14
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>16</b>
2.1	MINERAÇÃO	16
2.1.1	<b>Panorama mundial e a importância brasileira na indústria mineral</b>	18
2.1.2	<b>O impacto ambiental da mineração</b>	19
2.2	RESÍDUO DE MINÉRIO DE COBRE	21
2.2.1	<b>Composição química e características do resíduo de minério de Cobre</b>	22
2.3	ESCÓRIA DE FERRO GUSA	24
2.3.1	<b>Reaproveitamento</b>	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>26</b>
3.1	MATERIAIS	27
3.1.1	<b>Cimento</b>	27
3.1.2	<b>Água de amassamento</b>	27
3.1.3	<b>Agregado miúdo</b>	27
3.1.4	<b>Agregado graúdo</b>	27
3.1.5	<b>Aditivo Plastificante</b>	28
3.1.6	<b>Resíduo de cobre</b>	28
3.1.7	<b>Escória de ferro gusa</b>	29
3.2	MÉTODOS	30
3.2.1	<b>Caracterização dos materiais</b>	30
3.2.2	<b>Dosagem do Concreto de Referência</b>	30
3.2.3	<b>Avaliação das Propriedades Mecânicas</b>	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>34</b>
4.1	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS E ALTERNATIVOS</b>	34
4.2	<b>PROPRIEDADES DOS CONCRETOS OBTIDOS COM A SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS</b>	35

<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>41</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>42</b>
	<b>ANEXO – Curvas granulométricas.....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A crescente preocupação com os impactos ambientais da construção civil tem incentivado a busca por materiais alternativos que promovam a sustentabilidade, como a incorporação de resíduos de mineração de cobre e da produção de ferro gusa, na produção de concreto, surge como uma alternativa promissora (Souza *et al.*, 2022).

Nesse contexto, a região de Canaã dos Carajás, no estado do Pará, destaca-se pela intensa atividade mineradora, especialmente na extração de cobre e ferro, o que tem gerado impactos econômicos significativos e desafios ambientais relacionados ao manejo dos resíduos gerados por essa atividade, por isso a incorporação desses material na construção civil, alinhada às políticas de desenvolvimento sustentável e responsabilidade socioambiental, podem contribuir para a sustentabilidade do setor (Nascimento *et al.*, 2015; Pinheiro *et al.*, 2024).

Nascimento *et al.* (2015) realizaram um estudo detalhado sobre os resíduos da barragem da Mina do Sossego, identificando a presença de minerais como actinolita, albita, biotita, clinocloro e quartzo, demonstrando um potencial para uso como agregados no concreto, devido às suas propriedades físicas e químicas favoráveis.

Pinheiro *et al.*, (2024) investigou a substituição de até 45% da areia por rejeito de cobre e observou um aumento na consistência do concreto, além de melhorias na resistência à compressão e demonstrou que o rejeito de cobre pode atuar como um filler, preenchendo os vazios entre os grãos de cimento e agregados, o que contribui para uma matriz mais densa e resistente.

Paralelamente, a produção de ferro gusa gera subprodutos, como a escória de alto-forno, que possuem potencial para aplicação na construção civil, como avaliado por Souza (2019) que realizou um estudo sobre a utilização de escória de ferro gusa como agregado graúdo (brita) no concreto e demonstrou que a substituição parcial da brita por escória, em proporções de até 50%, é viável e não compromete as propriedades mecânicas do concreto. Além disso, a escória contribui para a melhoria da durabilidade e da resistência a agentes agressivos, devido à sua composição rica em óxidos de cálcio, silício e alumínio (Ferreira *et al.*, 2024).

Sendo assim, a substituição parcial de agregados naturais por resíduos de mineração pode trazer benefícios ambientais e econômicos, no entanto, é necessário

avaliar cuidadosamente as proporções de substituição e realizar ensaios laboratoriais para garantir que as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto não sejam comprometidas (Lage et al., 2020).

A desses resíduos na produção de concreto está em consonância com as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que incentiva a reciclagem e o reaproveitamento de materiais, visando à redução dos impactos ambientais e à promoção da sustentabilidade, além disso, essa prática, diminuindo a necessidade de extração de recursos naturais (Brasil, 2010; Barboza *et al.*, 2019).

Embora promissora, essa abordagem requer rigor técnico, por isso, a NBR 6118 (ABNT, 2023), determina que as estruturas de concreto devem ser projetadas com base nos limites de resistência especificados, assegurando a estabilidade e a segurança das edificações.

Desse modo, a composição química dos resíduos de mineração pode impactar negativamente sobre as propriedades do concreto, tornando indispensável a realização de testes laboratoriais para garantir segurança e desempenho (Hentges *et al.*, 2022). Assim, é fundamental investir em pesquisas que avaliem os limites de uso desses materiais.

## 1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A busca por alternativas sustentáveis na construção civil tem sido uma prioridade frente às crescentes preocupações ambientais e à necessidade de inovação tecnológica, em vista de conciliar desempenho técnico, viabilidade econômica e menor impacto ambiental (Silva *et al.*, 2024).

Nesse contexto, a investigação sobre a incorporação de resíduos da indústria mineral, como o resíduo de cobre e a escória de ferro gusa, na formulação do concreto, representa uma abordagem promissora e alinhada às necessidades ambientais.

Na mineração, esses resíduos são gerados em grandes volumes e quando mal geridos, acarretam graves impactos ambientais (Ahmari e Zhang, 2012). Por isso, a reutilização desses materiais na construção civil contribui para a redução de resíduos, bem como promove o desenvolvimento de concretos mais econômicos.

Do ponto de vista técnico, a escória de ferro gusa apresenta características que podem melhorar o desempenho mecânico do concreto, como maior resistência à compressão e durabilidade (Reschke, 2003). Além disso, Dias (2023), destaca que o

resíduo de cobre, quando adequadamente tratado, pode melhorar propriedades como densidade e resistência à abrasão, ampliando as possibilidades de aplicação em diversas obras de engenharia.

Na perspectiva econômica, a substituição parcial de agregados naturais por resíduos de minério pode resultar em reduções nos custos de produção devido a diminuição do consumo de recursos primários e os custos associados à extração e transporte de matérias-primas, tornando o concreto um material ainda mais acessível (Segundo Zhao; Fan; Sun, 2014).

Por isso, este estudo contribui para o avanço da ciência ao ampliar o conhecimento sobre o uso do resíduo de cobre e a escória de ferro gusa, na formulação de concretos, ao fornecer dados sobre as propriedades mecânicas desses materiais, ajudando a fundamentar a pesquisa acadêmica sobre alternativas sustentáveis e tecnicamente viáveis para a produção de concreto.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da substituição parcial dos agregados miúdo e graúdo por resíduo de cobre e escória de ferro-gusa, respectivamente, nas propriedades do concreto.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar física e quimicamente os resíduos de resíduo de cobre e escória de ferro-gusa.
- Estudar as proporções de dosagens de concretos, substituindo frações do agregado natural por resíduos de cobre e escória de ferro gusa;
- Comparar as propriedades dos concretos obtido com a substituição de agregados por resíduos em relação às propriedades do concreto convencional.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em cinco seções principais, estruturadas de maneira a proporcionar uma compreensão clara e sequencial do tema proposto. Na primeira seção, “Considerações Iniciais”, são apresentadas a contextualização do



estudo, a justificativa para sua realização e os objetivos que orientam esta pesquisa. Além disso, esta seção inclui a descrição da estrutura do trabalho, oferecendo um panorama geral do desenvolvimento da dissertação.

A segunda seção da “Fundamentação teórica” abordados assuntos como a evolução do concreto e sua relevância na engenharia civil, os impactos ambientais da produção de cimento, o papel da mineração no fornecimento de materiais e as características químicas e físicas dos resíduos de cobre e da escória de ferro gusa, destacando suas potenciais aplicações na construção civil.

A terceira seção, “Metodologia”, descreve detalhadamente os métodos utilizados na pesquisa para avaliar a resistência mecânica de concretos modificados com resíduos de minério. Na quarta seção, dos “Resultados e discussão”, os dados obtidos são analisados e interpretados à luz da fundamentação teórica, ao comparar os resultados com estudos anteriores e avaliar a viabilidade técnica e econômica das substituições propostas.

Por fim, a quinta seção, “Conclusão”, sintetiza os principais achados do estudo, reforça o cumprimento dos objetivos traçados e sugere novas direções para pesquisas futuras. A seção destaca as contribuições do trabalho para a área de materiais de construção, com foco na aplicação sustentável de resíduos industriais.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MINERAÇÃO

A mineração desempenha um papel estratégico no desenvolvimento econômico global, fornecendo matérias-primas indispensáveis para diversos setores, como construção civil, tecnologia e produção industrial. Gomes *et al.* (2022) definem a mineração como a extração de minerais ou materiais geológicos para aplicações variadas, desde a construção de infraestrutura até a fabricação de dispositivos eletrônicos.

Apesar de relevante, essa atividade é acompanhada por desafios relacionados à sustentabilidade e aos impactos ambientais, visto que suas técnicas se mostram altamente prejudiciais ao meio ambiente. Entre elas, o método de mineração à céu aberto se destaca por ser amplamente utilizado na extração de minerais como ferro, cobre e ouro, e por seu impacto destrutivo ao meio ambiente, provocando desmatamento, alterações topográficas e contaminação hídrica (Ghazi; Jamshidi-Zanjani; Nejati, 2022).

Além do método supracitado, a mineração subterrânea, comumente utilizada para a extração de materiais sedimentados em altas profundidades, como carvão, zinco e níquel, causa danos ambientais como subsidência do solo e contaminação de aquíferos, o que demanda monitoramento geotécnico e iniciativas de recuperação ambiental (Andrade, 2014).

Outro método relevante é a mineração aluvial, voltada à extração de minerais em leitos de rios e bacias aluviais, que, embora tenha menor impacto ao solo, se comparado com as outras técnicas mencionadas, os danos ao ecossistema aquático são severos, com destaque para a contaminação por mercúrio, que afetam a saúde humana e a fauna aquática e a erosão e o assoreamento, que alteram o leito dos rios, prejudicam o fluxo natural da água e destroem habitats aquários (Carvalho *et al.*, 2019).

Sendo assim, a gestão de resíduos minerais é um aspecto central na busca por práticas mais sustentáveis, visto que o Brasil possui mais de 900 barragens de rejeitos catalogadas, sendo 43 classificadas como de alto risco e a destinação inadequada desses resíduos pode resultar em tragédias socioambientais, como o rompimento das barragens de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), que causaram severos danos ambientais e a morte de centenas de pessoas (ANM, 2023).

Nesse contexto, planos de gestão de resíduos sólidos (PGRS) tornam-se essenciais para reduzir os impactos negativos da mineração. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) estabelece diretrizes para a destinação correta de rejeitos e estimula práticas de economia circular, como a reciclagem e a reutilização de subprodutos na construção civil. A escória de alto-forno, subproduto da siderurgia, já é amplamente utilizada como substituto do cimento Portland, reduzindo a pegada de carbono da construção civil em até 30% (Faleschini *et al.*, 2015).

Além da gestão de resíduos, o monitoramento ambiental contínuo é uma ferramenta indispensável para mitigar os impactos da mineração. Estudos demonstram que a poluição do ar em áreas mineradoras pode levar ao aumento da incidência de doenças respiratórias em populações próximas, devido à emissão de material particulado e gases tóxicos, como dióxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio (Silva; Oliveira; Santos, 2020). Programas de monitoramento da qualidade do ar e da água são fundamentais para evitar a degradação ambiental e garantir a segurança das comunidades afetadas.

No Brasil, algumas empresas mineradoras têm adotado práticas mais sustentáveis, como o reuso de água nos processos produtivos e a revegetação de áreas degradadas. A mineradora Vale, por exemplo, implementou um sistema de filtragem que permite a disposição a seco de rejeitos, reduzindo significativamente o risco de colapso de barragens (Vale, 2023).

A legislação ambiental desempenha um papel fundamental no controle das atividades mineradoras. No entanto, a fiscalização e a aplicação de penalidades para infrações ambientais ainda enfrentam desafios no Brasil. Dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2023) mostram que, entre 2019 e 2022, apenas 38% das multas ambientais aplicadas a mineradoras foram efetivamente pagas, evidenciando fragilidades no cumprimento das normas vigentes.

Nesse contexto, subprodutos dessa atividade, frequentemente descartados, podem ser reciclados e utilizados na construção civil, promovendo a sustentabilidade ao reduzir a pressão sobre recursos naturais, contribuindo para um modelo produtivo mais responsável e para redução nos custos de produção integrando um modelo de economia circular (Acordi *et al.*, 2023; Segui *et al.*, 2023)

Por isso, a regulamentação ambiental é fundamental para garantir que a mineração ocorra de forma sustentável e a colaboração entre governos, empresas mineradoras e comunidades locais é indispensável para a criação de políticas eficazes

e para o cumprimento das normas ambientais e garantia dos benefícios econômicos e sociais (Mehta, 2001).

Embora a mineração seja essencial para o progresso tecnológico e econômico, ela exige práticas que priorizem a sustentabilidade e a justiça intergeracional. Sobre isso, Chen et al. (2010) reforçam que, ao equilibrar a exploração de recursos naturais com a preservação ambiental, é possível assegurar um modelo produtivo sustentável, que beneficie tanto a sociedade atual quanto as gerações futuras.

### **2.1.1 Panorama mundial e a importância brasileira na indústria mineral**

A mineração é um dos setores mais relevantes da economia global, tendo países como China, Austrália, Rússia e Brasil entre os principais produtores desses recursos. No contexto nacional, o estado do Pará destaca-se por ser um dos maiores responsáveis pela produção e exportação de minério de ferro e bauxita, posicionando o país como um importante ator no comércio internacional de minerais (IBRAM, 2022).

O Pará contribui com 38% da produção nacional de minério de ferro, segundo o Boletim da Mineração 2022. Além disso, é líder na extração de bauxita, com mais de 35 milhões de toneladas produzidas em 2023, destinadas principalmente à exportação para a China, Canadá e Europa. Esse desempenho coloca o estado na liderança das exportações minerais brasileiras, com o setor mineral representando mais de 90% do valor exportado pelo Pará (FAPESPA, 2023).

Com essa atividade o Pará arrecadou cerca de R\$ 10 bilhões por meio da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) em 2021, consolidando-se como o maior arrecadador do país nessa categoria. Esses recursos são fundamentais para investimentos públicos, embora existam questionamentos sobre sua distribuição e aplicação em regiões impactadas pela mineração (IBRAM, 2022).

Apesar da relevância econômica, a mineração no Pará enfrenta desafios relacionados aos impactos socioambientais ocasionados pela atividade. De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o estado foi responsável por 15% do desmatamento registrado na Amazônia entre 2020 e 2021, sendo parte deste índice associado à expansão de áreas mineradoras (Brasil, 2021). Além disso, a contaminação de cursos d'água por resíduos minerais compromete a qualidade de vida das populações locais (Souza; Silva; Guedes, 2020).

Um estudo conduzido pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2022) indicou que menos de 40% das empresas mineradoras no Brasil possuem planos efetivos de recuperação ambiental. Isso evidencia a importância de políticas públicas que exigem contrapartidas ambientais das empresas, garantindo a preservação de áreas naturais e a recuperação de ecossistemas degradados.

Nesse contexto, a automação de processos e o uso de tecnologias de ponta, como o monitoramento remoto por satélites e drones, são implementados em projetos no Pará. Na mina de Carajás, por exemplo, a Vale utiliza caminhões autônomos, reduzindo emissões de gases de efeito estufa e otimizando a eficiência operacional (Costa *et al.*, 2022). Esses modelos tecnológicos tornam a mineração menos dependente de intervenções manuais e mais alinhada a padrões internacionais de sustentabilidade.

Outro ponto relevante é a diversificação mineral. Além do minério de ferro e da bauxita, o Brasil possui potencial para explorar minerais estratégicos, como terras raras, utilizadas na fabricação de tecnologias renováveis e eletrônicos. De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral, o país detém 22 milhões de toneladas de reservas de terras raras, principalmente na região amazônica. No entanto, a falta de políticas específicas para o aproveitamento sustentável desses recursos limita a exploração comercial (DNPM, 2022).

Apesar de avanços, como a atualização do Código de Mineração em 2018, há fragilidades na fiscalização e no cumprimento de condicionantes ambientais. A descentralização do controle ambiental entre União e estados muitas vezes resulta em sobreposição de competências e dificuldade na aplicação de penalidades (Silva *et al.*, 2024). Isso compromete o combate a práticas ilegais e a adoção de medidas preventivas.

### **2.1.2 O impacto ambiental da mineração**

O impacto ambiental da mineração é um tema de grande relevância e preocupação, uma vez que esta atividade, embora essencial para o desenvolvimento econômico e tecnológico, pode causar alterações na paisagem, contaminação dos recursos hídricos, emissões atmosféricas, desafios na gestão de resíduos, além de exigir esforços contínuos para a reabilitação de áreas mineradas. As regulamentações ambientais desempenham um papel crucial na mitigação desses impactos,

demandando das empresas do setor uma adaptação constante às normas e padrões estabelecidos (Antunes, 2008).

A mineração, seja a céu aberto ou subterrânea, altera a paisagem, envolvendo a remoção de cobertura vegetal e a formação de cavas e pilhas de estéril. Conforme apontado por Monjezi *et al.* (2009), essa alteração não apenas muda o aspecto físico da região, mas também afeta a biodiversidade local, reduzindo o habitat disponível para a fauna e a flora. A criação de grandes cavas e pilhas de estéril pode levar à fragmentação de ecossistemas e à perda de biodiversidade.

A contaminação de recursos hídricos é outro impacto da mineração, com a lixiviação de metais pesados e a acidificação de cursos d'água sendo mecanismos comuns de poluição. Segundo Punia e Singh (2021), a drenagem ácida de mina, resultante da exposição de sulfetos minerais ao oxigênio e à água, pode liberar quantidades de metais pesados e ácido sulfúrico nos ecossistemas aquáticos, afetando a qualidade da água e a vida aquática.

As emissões atmosféricas na mineração, incluindo a queima de combustíveis fósseis por equipamentos e a geração de poeira, são fontes importantes de poluição do ar. Oluwoye *et al.* (2017) destaca que as atividades de mineração podem emitir partículas finas e gases nocivos, como dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio, contribuindo para problemas ambientais e de saúde, como poluição do ar e doenças respiratórias.

No que diz respeito à gestão de resíduos sólidos, a mineração gera grandes quantidades de estéréis e resíduos, cujo manejo inadequado pode levar à contaminação do solo e da água. Segundo Borma e Soares (2002), a disposição responsável desses materiais, incluindo a estabilização de pilhas de estéril e a segurança de barragens de resíduos, é essencial para prevenir impactos ambientais adversos.

A reabilitação de áreas mineradas é fundamental para a recuperação ambiental e a reintegração dessas áreas à paisagem natural ou ao uso econômico alternativo. A implementação de técnicas de reabilitação, como a revegetação e a reconstrução de solos, pode ajudar a restaurar a funcionalidade ecológica e promover a biodiversidade. Além disso, a reabilitação pode facilitar a reutilização econômica dessas áreas, transformando-as em espaços para agricultura, recreação ou conservação (Gule, 2021).

Desse modo, a legislação e as normas ambientais são fundamentais para garantir que a mineração seja realizada de forma responsável. Conforme apontado por Kulshrestha *et al.* (2024), as regulamentações ambientais em nível nacional e internacional desempenham um papel crucial na minimização dos impactos ambientais da mineração. As empresas do setor precisam adaptar-se constantemente a essas normas, implementando práticas de mineração sustentável e tecnologias de mitigação de impactos.

A mineração possui um potencial de impacto ambiental, afetando a paisagem, a qualidade da água, o ar e a gestão de resíduos, além de exigir esforços de reabilitação de áreas mineradas. No entanto, com a aplicação de práticas sustentáveis, a adoção de tecnologias adequadas e o cumprimento rigoroso das legislações ambientais, é possível mitigar esses impactos e garantir que a mineração contribui positivamente para o desenvolvimento econômico sem comprometer a sustentabilidade ambiental.

## 2.2 RESÍDUO DE MINÉRIO DE COBRE

O cobre, elemento químico de símbolo Cu e número atômico 29, é um metal de transição caracterizado por sua condutividade elétrica e térmica elevada, maleabilidade e ductilidade. A sua coloração avermelhada única e o brilho metálico fazem dele um material facilmente reconhecível. Conforme Coelho e Busson (2022a), o cobre possui uma densidade de aproximadamente 8,96 g/cm<sup>3</sup> a 20°C e um ponto de fusão de cerca de 1.085°C, sendo estes atributos essenciais para sua aplicabilidade em diversas indústrias.

A extração do cobre normalmente ocorre em grandes depósitos de minério, onde ele se encontra na forma de minerais como calcopirita, bornita e malaquita. Esses depósitos são explorados em minas a céu aberto ou subterrâneas, dependendo da profundidade e da natureza do mineral. Segundo Coelho e Busson (2022b) a mineração de cobre é mais intensiva nos cinturões de cobre da África Central, no sudoeste dos Estados Unidos e no Chile, sendo este último o maior produtor mundial do metal. A importância comercial do cobre é indiscutível, uma vez que ele é utilizado em uma variedade de setores, incluindo construção civil, fabricação de veículos, eletrônicos e geração de energia.

O resíduo de minério de cobre, por outro lado, é composto pelos materiais que sobram após a extração e processamento do metal, sendo compostos por uma

mistura de minerais não aproveitáveis, água, agentes químicos utilizados na flotação (processo de separação de minério) e pequenas quantidades de cobre que não foram recuperadas.

De acordo com Slack e Voulvoulis (2006), a composição química exata dos resíduos pode variar consideravelmente, mas geralmente inclui sílica, alumina, cálcio e outros elementos em proporções variáveis e a estrutura física dos resíduos é frequentemente fina e lamacenta, o que pode causar desafios para o armazenamento seguro e a gestão ambiental.

Os processos de geração de resíduos de cobre começam com a britagem e moagem do minério extraído, seguidos pela flotação e outros processos de concentração. Ao longo desses processos, quantidades substanciais de resíduos são produzidas. As abordagens de disposição desses materiais incluem a formação de barragens de resíduos, pilhas de estéril ou até mesmo sua utilização como material de preenchimento em minas desativadas (Boger, 2009).

A gestão desses resíduos é um aspecto crítico da mineração sustentável, exigindo estratégias que minimizem o impacto ambiental e riscos associados, como o rompimento de barragens de resíduos. A comunidade científica e a indústria mineradora continuam a buscar maneiras de reprocessar os resíduos de cobre para recuperar metais residuais e reduzir a quantidade de resíduos gerados (Coelho; Busson, 2022a).

### **2.2.1 Composição química e características do resíduo de minério de Cobre**

A mineração de cobre, essencial para a economia global devido à ampla utilização do metal em setores cruciais, gera considerável quantidade de resíduos, cuja composição química, estrutura física e propriedades mecânicas apresentam desafios tanto para a gestão ambiental quanto para a reutilização eficaz. Os resíduos de minério de cobre são provenientes das etapas de processamento nas quais o metal é separado do material bruto extraído.

A composição química dos resíduos varia dependendo do tipo de minério processado e dos métodos de processamento empregados. Tipicamente, esses resíduos contêm quantidades substanciais de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), além de vários outros óxidos, como óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), e podem ainda conter sulfetos residuais e produtos químicos utilizados no processo de flotação, como xantatos e ácido sulfúrico (Slack; Voulvoulis, 2006). Importantes



também são as quantidades traço de metais pesados, o que pode resultar em preocupações ambientais devido ao potencial de lixiviação e contaminação (Samir *et al.*, 2018)

A estrutura física dos resíduos de cobre é caracterizada por partículas finas que, ao serem depositadas em barragens de resíduos ou pilhas, formam um material com características semelhantes a um sedimento. O comportamento desses materiais é fortemente influenciado pela granulometria, com partículas mais finas levando a uma maior retenção de água e redução da permeabilidade. Essa estrutura pode resultar em desafios quanto à estabilidade física dos depósitos de resíduos (Boger, 2009).

As propriedades mecânicas dos resíduos de minério de cobre são cruciais para o projeto e a manutenção das estruturas de armazenamento. Essas propriedades incluem a resistência ao cisalhamento, a compressibilidade e a permeabilidade, que são determinadas pela composição mineralógica e pelo teor de umidade dos resíduos. A resistência ao cisalhamento dos resíduos é um fator crítico na prevenção do colapso das barragens de resíduos e na garantia da integridade estrutural dos depósitos (Vick, 1990). Além disso, a compressibilidade afeta o assentamento dos resíduos ao longo do tempo, enquanto a permeabilidade impacta a movimentação da água através do material, o que é relevante para o controle de erosão e para o gerenciamento de águas superficiais e subterrâneas (Rico *et al.*, 2008).

O conhecimento detalhado dessas características é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de gestão que minimizem os impactos ambientais e maximizem a recuperação de recursos. O reprocessamento dos resíduos para extrair metais residuais e a sua utilização em outras aplicações, como materiais de construção, são áreas de pesquisa em expansão que visam não só reduzir o volume de resíduos gerados, mas também recuperar valor econômico desses materiais (Thompson, 2001).

A gestão dos resíduos de minério de cobre representa um desafio multidisciplinar e multifacetado que requer uma abordagem integrada, fundamentada em conhecimento científico sólido e práticas de engenharia responsáveis, garantindo não apenas a segurança operacional, mas também a proteção do meio ambiente e a sustentabilidade a longo prazo da indústria de mineração (Adamo *et al.*, 2021).

## 2.3 ESCÓRIA DE FERRO GUSA

A escória de ferro gusa, A escória de ferro gusa, também conhecida como escória de alto-forno, é um subproduto inerente à produção de ferro e aço, emerge da fusão de minérios em altos-fornos ou fornos elétricos. Essa fusão é um processo complexo que envolve altas temperaturas e a reação de sílica presente nos minérios com aditivos, como cal ou dolomita, formando uma massa vitrificada de resíduos. Segundo Proctor *et al.* (2000), a escória é composta majoritariamente por óxidos de cálcio, silício, magnésio, alumínio e ferro, apresentando propriedades físicas como densidade, granulometria, e dureza variáveis que dependem da sua origem e do processo de resfriamento pelo qual passa.

A importância da escória de ferro gusa é multifacetada dentro da indústria siderúrgica e se estende a outros setores. Como discutido por Das *et al.* (2007), suas propriedades físico-químicas únicas capacitam-na a ser um recurso valioso para aplicações como agregados em materiais de construção, fabricação de cimento, e até mesmo na recuperação de terras (Shen; Forssberg, 2003).

O processo de formação da escória de ferro gusa é elucidado pelos trabalhos de Yildirim e Prezzi (2011) que explicam que, durante a produção de ferro e aço, a escória é formada pela combinação de óxidos fundidos provenientes dos minérios de ferro e dos fundentes adicionados para facilitar a fusão. A composição e as propriedades da escória podem variar substancialmente, influenciadas por fatores como a natureza do minério de ferro, o tipo de fundente utilizado e o processo de resfriamento adotado.

Entretanto, apesar de suas utilidades, a escória de ferro gusa representa desafios no que tange à gestão ambiental e ao tratamento. Como observado por Shi; Meyer e Behnood, (2008), a disposição inadequada de resíduo de cobre pode resultar em impactos ambientais negativos, tais como a contaminação do solo e da água. Além disso, os custos associados à sua manipulação e tratamento são não negligenciáveis. No entanto, esses desafios abrem portas para oportunidades de reciclagem e reaproveitamento. Luo *et al.* (2013) argumentam que a adoção de práticas de economia circular para a escória de ferro gusa não só mitigar esses impactos ambientais, mas também contribui para a eficiência dos recursos na indústria.

### 2.3.1 Reaproveitamento

O reaproveitamento da escória de ferro gusa é uma prática fundamental para mitigar os impactos ambientais e econômicos associados à produção desse material. A reutilização da escória de ferro gusa em diferentes setores industriais tem se mostrado uma abordagem eficaz para reduzir a quantidade de resíduos gerados e promover a sustentabilidade. Diversas aplicações têm sido exploradas, como na construção civil, na fabricação de cimento e na indústria de fertilizantes (Yildirim e Prezzi, 2011).

Os benefícios do reaproveitamento da escória de ferro gusa são tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. Ao utilizar a escória como substituto de matérias-primas convencionais, é possível reduzir a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários, minimizar a extração de recursos naturais e diminuir os custos de produção (Das *et al.*, 2007).

Os processos de reaproveitamento da escória de ferro gusa envolvem uma série de etapas que visam beneficiar, tratar e reciclar esse material de forma a torná-lo apto para novas aplicações. Técnicas de beneficiamento, como a moagem e a separação magnética, são frequentemente empregadas para melhorar as propriedades da escória e adequá-la aos diferentes usos (Shen; Forssberg, 2003)

Em síntese, o reaproveitamento da escória de ferro gusa representa uma estratégia crucial para a promoção da sustentabilidade na indústria, ao mesmo tempo em que oferece benefícios ambientais e econômicos substanciais. A contínua pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de reaproveitamento são essenciais para maximizar o potencial desse material como um recurso valioso em diversas aplicações industriais.

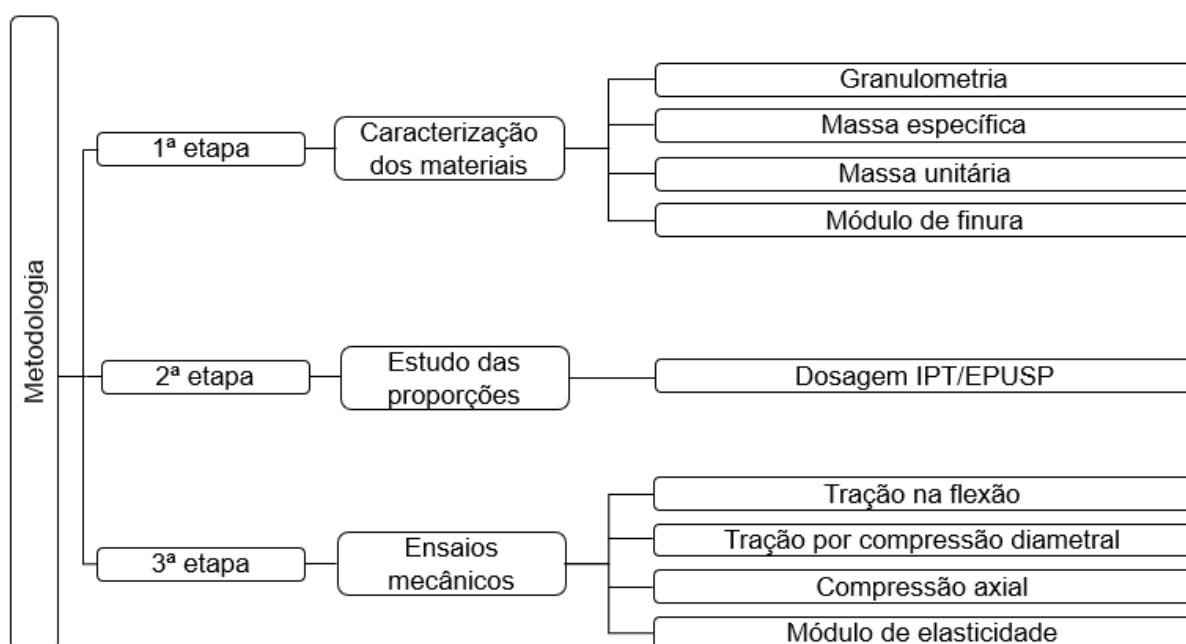
### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os materiais e os métodos utilizados na pesquisa. Toda a preparação, armazenagem, tratamento e instrumentação para a moldagem dos corpos de prova analisados foram realizadas no laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

A pesquisa foi dividida em três etapas, a primeira consiste no estudo preliminar de caracterização dos materiais utilizados, visando avaliar as características físicas e químicas dos constituintes do concreto, a segunda etapa se deu com o estudo de proporções e determinação da dosagem do concreto de referência segundo o método IPT/EPUSP.

A terceira etapa se deu com a avaliação das propriedades mecânicas da mistura, caracterizado pela produção de corpos de prova de concreto prismáticos com dimensões de 10 x 10 x 30 cm para ensaio de tração na flexão e corpos de prova cilíndricos com diâmetro ( $\varnothing$ ) de 15 cm e comprimento de 30 cm para ensaio de compressão axial e compressão diametral (Figura 1).

Figura 1- Fluxograma das etapas da pesquisa



Fonte: Autora, 2024

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 Cimento

O Cimento Portland do tipo CP II-E-32 foi selecionado por sua ampla disponibilidade e utilização no Brasil, sendo sua produção regulamentada pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018). As características do cimento estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1- Caracterização do cimento

Densidade	Massa específica aparente	Índice de finura	Início e fim de pega
3,12 g/cm <sup>3</sup>	1,3	2,43%	13:18 (início) 17:48 (fim)

#### 3.1.2 Água de amassamento

A água de amassamento utilizada nesta pesquisa para a produção do concreto é proveniente da rede de distribuição de água fornecida pela Companhia de Saneamento do Estado do Pará – COSANPA.

#### 3.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo foi composto por areia fina, extraída tipicamente na região nordeste do estado do Pará, proveniente dos leitos de rios próximo da cidade Belém-Pa. Após o recebimento do material, foram feitas coletas para amostragem e identificação do agregado segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), que estabelece os requisitos mínimos para recepção e produção dos agregados para concreto de cimento Portland. Com módulo de finura 1,57, massa unitária igual a 1,47 g/cm<sup>3</sup> e massa específica seca igual a 2,59 g/cm<sup>3</sup>, e massa específica aparente igual a 2,71 g/cm<sup>3</sup> valores de caracterização obtidos de acordo com os ensaios previstos na NBR 17054 (ABNT, 2022), NBR 16972 (ABNT, 2021) e NBR 16916 (ABNT, 2021).

#### 3.1.4 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi o seixo rolado de quartzo, que foi extraído de jazida localizada no município de Ourém-PA. Trata-se de um agregado encontrado em maior disponibilidade na região nordeste do estado do Pará e o mais utilizado na fabricação de concreto para a região. De acordo com a caracterização, o agregado

gráudo foi enquadrado com diâmetro máximo semelhante a brita 1, a partir da distribuição granulométrica preconizada pela NBR 17054 (ABNT, 2022), apontou o diâmetro máximo de 12,7 mm e módulo de finura de 6,11. Além disso, a massa unitária foi de 1,56 g/cm<sup>3</sup>, conforme a NBR 16972 (ABNT, 2021) a massa específica seca obtida foi igual a 2,63 g/cm e a massa específica aparente igual a 2,61 g/cm<sup>3</sup> conforme NBR 16917 (ABNT, 2021)

### 3.1.5 Aditivo Plastificante

O aditivo plastificante utilizado foi utilizado o Sika® ViscoCrete®-6900, um aditivo superplastificante líquido de terceira geração, projetado para concretos de alto desempenho, incluindo concreto auto-adensável (CAA) e concretos com alta resistência inicial e seu uso proporciona diversas vantagens, como a redução da água de amassamento, aumento da fluidez e da densidade, melhoria no comportamento na retração, e redução da permeabilidade à água. Além disso, ele possibilita ganhos rápidos de resistência inicial, o que favorece a desforma antecipada em pré-fabricados. As informações do produto aditivo disponibilizadas pelo fabricante estão apresentadas na tabela 2.

Tabela 2- Informações disponibilizadas pelo fabricante do produto.

<b>Base química</b>	Solução de policarboxilato em meio aquoso
<b>Aspecto / Cor</b>	Líquido marrom claro
<b>Densidade</b>	1,07 ± 0,02 g/cm <sup>3</sup>
<b>Valor do pH</b>	3,7 ± 1,0
<b>Teor de íons cloreto</b>	Sika® ViscoCrete®-6900 não contém cloretos ou outros ingredientes que causam corrosão do aço
<b>Dosagem recomendada</b>	0,3 à 1,5% sobre o peso de aglomerantes (cimento e adições, se houver)

Fonte: SIKSA SA, 2020

### 3.1.6 Resíduo de cobre

Os resíduos de minério de cobre utilizados nesta pesquisa foram coletados na Barragem do Sossego, situada em Canaã dos Carajás, sudeste do Pará. Para o experimento, o resíduo de cobre foi utilizado como um substituto parcial dos agregados miúdos, sendo coletado em diferentes pontos da barragem, incluindo a prainha e as encostas. De acordo com a caracterização, o resíduo (Figura 2) apresenta módulo de finura igual a 1,25, massa unitária de 1,33 g/cm<sup>3</sup>, massa específica seca de 2,38 g/cm<sup>3</sup> e massa específica aparente igual a 2,49 g/cm<sup>3</sup>. Todas

as caracterizações foram realizadas conforme previsto na NBR 17054 (ABNT, 2022), NBR 16972 (ABNT, 2021) e NBR 16916 (ABNT, 2021).

Figura 2- Resíduo de cobre.



Fonte: Autora, 2024.

### 3.1.7 Escória de ferro gusa

A escória de ferro gusa (Figura 3), utilizada neste experimento como substituto parcial dos agregados graúdos, foi coletada em uma indústria siderúrgica no município de Marabá, estado do Pará. Os resíduos coletados provêm do alto-forno, um processo de produção de ferro gusa. Na indústria em questão, esse material é resfriado rapidamente ao ser mergulhado em um tanque de água, resultando em um material granular com diversas porosidades.

Figura 3- Escória de ferro



Fonte: Autora, 2024.

A caracterização deste material resultou nas seguintes características: módulo de finura igual a 5,23, massa unitária de 1,61 g/cm<sup>3</sup>, massa específica seca de 2,73 g/cm<sup>3</sup> e massa específica aparente igual a 2,71 g/cm<sup>3</sup>, conforme previsto na NBR 17054 (ABNT, 2022), NBR 16972 (ABNT, 2021) e NBR 16917 (ABNT, 2021).

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Caracterização dos materiais

#### 3.2.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland foi caracterizado de acordo com os requisitos estabelecidos na norma NBR 16697 (ABNT, 2018), que define as especificações técnicas para esse material. Essa caracterização foi realizada com base na determinação da massa específica e do índice de finura, parâmetros fundamentais para avaliar a qualidade e o desempenho do cimento.

A determinação da massa específica seguiu os procedimentos descritos na norma NBR 16605 (ABNT, 2017), intitulada Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.

Por sua vez, o índice de finura foi avaliado conforme a norma NBR 11579 (ABNT, 2012), que estabelece os métodos para medir a granulometria do cimento. A finura influencia diretamente propriedades como a reatividade e a resistência do material, sendo, portanto, um aspecto crucial na caracterização.

#### 3.2.1.2 Agregados naturais e resíduos

Os agregados naturais e os resíduos foram avaliados conforme sua composição granulométrica (NBR 17054 - ABNT, 2022), massa específica, massa específica aparente e a absorção de água (NBR 16916 - ABNT, 2021).

### 3.2.2 Dosagem do Concreto de Referência

#### 3.2.2.1 Variáveis de controle

Para execução dos corpos de prova, foram fixados os seguintes parâmetros:

- Relação água/cimento igual a 0,38
- Abatimento de tronco de cone de  $90 \pm 20$  mm, prescrita na NBR 8953 (ABNT, 2015), para concretos de classe S100, aplicados em elementos estruturais com lançamento convencional do concreto.
- Dosagem 1:1,97:2,53:0,38, ou seja: 1:4,5
- Rico (1:3,5), Médio (1:5,0) e Pobre (1:6,5).



As idades de cura foram definidas em 28 dias, e os percentuais de substituição da areia pelo resíduo de cobre (RC) e do seixo pelo resíduo de ferro gusa (RF) foram adotados como 25%, 50% e 75%. Estes valores foram baseados em estudos prévios, como Ramos et al. (2024a e 2014b), que exploraram a viabilidade técnica de substituir agregados naturais por resíduos minerais C0C25RF, C25RC0, C0RC50RF C50RC0RF e C0RC75RF e C75RC0RF).

A Tabela 3 apresenta a composição de cada traço produzido, especificando as proporções de materiais utilizados para cada mistura. O concreto de referência (CRef) foi produzido sem substituições, enquanto as amostras modificadas (C25RC25RF, C50RC50RF e C75RC75RF) apresentam substituições parciais de areia por resíduo de cobre (RC) e de brita por resíduo de ferro gusa (RF) em 25%, 50% e 75%, respectivamente.

Tabela 3- Composição de Cada Dosagem

Concreto	Cimento (kg/m³)	Areia (kg/m³)	Seixo (kg/m³)	Água (kg/m³)	Substituição RC (%)	Substituição RF (%)
<b>CRef</b>	350	750	1000	133	0	0
<b>C25RC25RF</b>	350	562,5	750	133	25	25
<b>C50RC50RF</b>	350	375	500	133	50	50
<b>C75RC75RF</b>	350	187,5	250	133	75	75

Fonte: Autora, 2024

Essas proporções foram ajustadas para manter a relação água/cimento inalterada, garantindo a consistência da mistura e possibilitando a comparação direta dos resultados mecânicos entre os diferentes traços.

### 3.2.2.2 Variáveis de resposta

Nesta pesquisa adotaram-se como variáveis de resposta a execução dos ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral, flexão e módulo de elasticidade. A escolha pela execução desses ensaios justifica-se por serem os principais testes que avaliam a capacidade do material em resistir esforços mecânicos. A Tabela 4 elenca todo o programa experimental desta pesquisa através de suas variáveis.

Tabela 4- Programa experimental do estudo

Concreto a ser produzido	Relação a/c	Ensaio			
		Compressão axial	Tração por compressão diametral	Flexão	Módulo de elasticidade
C <sub>Ref.</sub>	0,38	3	3	3	3
C <sub>25RC25RF</sub>	0,38	3	3	3	3
C <sub>50RC50RF</sub>	0,38	3	3	3	3
C <sub>75RC75RF</sub>	0,38	3	3	3	3
Quantidade de CP's por Ensaio		12	12	12	12
Quantidade Total de CP's		48			

Fonte: Autora, 2024

### 3.2.2.3 Método IPT/EPUSP

O método IPT foi escolhido por sua confiabilidade em determinar proporções adequadas para os componentes do concreto. Inclui a caracterização detalhada dos materiais, como análises granulométricas e de absorção de água (NBR16916- ABNT, 2021 e NBR16917- ABNT, 2021). O ensaio de abatimento de tronco de cone foi realizado conforme a NBR16889 (ABNT, 2020) para verificar a trabalhabilidade.

### 3.2.3 Avaliação das Propriedades Mecânicas

Foram realizados 5 ensaios no concreto, sendo eles: ensaio de compressão axial, ensaio de tração por compressão diametral, ensaio de flexão, módulo de elasticidade do concreto e ensaio de abatimento do concreto

O ensaio de compressão axial, regulamentado pela NBR 5739 (ABNT, 2018), mediu a resistência à compressão do concreto, relacionando a carga máxima aplicada à área da seção transversal do corpo de prova. Já o ensaio de tração por compressão diametral, normatizado pela NBR 7222 (ABNT, 2011), avaliou a resistência à tração indireta do concreto, considerando os parâmetros de carga, diâmetro e comprimento do corpo de prova.

O ensaio de flexão, descrito pela NBR 12142 (ABNT, 2010), mede a resistência do concreto à tração na flexão, um parâmetro importante para elementos estruturais, como vigas, levando em conta a carga máxima, a distância entre apoios, a largura e altura do corpo de prova.

O módulo de elasticidade do concreto, regulamentado pela NBR 8522-1 (ABNT, 2021), avaliou a rigidez do material, a partir da relação entre a variação de tensão e a

deformação correspondente no trecho linear da curva tensão-deformação, sendo um indicador fundamental para prever o comportamento do concreto sob esforços diversos. Por fim, o ensaio de abatimento do concreto (*Slump Test*), normatizado pela NBR 16889 (ABNT, 2020), verificou a trabalhabilidade do concreto no estado fresco.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS E ALTERNATIVOS

Na Tabela 5, estão apresentadas as propriedades físicas dos agregados naturais (areia fina e seixo fino) e alternativos (resíduo de cobre e escória de ferro).

Tabela 5- Propriedades físicas dos agregados naturais (areia fina e seixo fino) e alternativos (resíduo de cobre e escória de ferro)

Descrição do material	Areia Fina	Resíduo de cobre	Seixo fino	Escória de ferro
Tipo de agregado	Miúdo	Miúdo	Graúdo	Graúdo
Módulo de finura	1,57	1,25	6,11	5,23
Massa específica seca	2,59 g/cm <sup>3</sup>	2,38 g/cm <sup>3</sup>	2,63 g/cm <sup>3</sup>	2,73 g/cm <sup>3</sup>
Massa específica saturada com superfície seca	2,63 g/cm <sup>3</sup>	2,42 g/cm <sup>3</sup>	2,62 g/cm <sup>3</sup>	2,72 g/cm <sup>3</sup>
Massa específica aparente	2,71 g/cm <sup>3</sup>	2,49 g/cm <sup>3</sup>	2,61 g/cm <sup>3</sup>	2,71 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	---	---	0,27%	0,30%
Massa unitária	1,47 g/cm <sup>3</sup>	1,33 g/cm <sup>3</sup>	1,56 g/cm <sup>3</sup>	1,61 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Autora, 2024.

Esse comportamento é corroborado por Sousa (2019), que relatou massa específica de 2,37 g/cm<sup>3</sup> para resíduos de cobre, destacando que a menor densidade está relacionada à presença de óxidos residuais. Adicionalmente, Zhao, Fan e Sun (2014) encontraram valores semelhantes ao utilizarem o mesmo resíduos como substituto de areia, encontrando uma massa específica de 2,4 g/cm<sup>3</sup>.

O módulo de finura deste material também foi inferior ao mesmo parâmetro observado para a areia fina. Essa diferença está alinhada com os dados de Sousa (2019), que verificou o valor de 1,22 para esses resíduos, afirmando que o menor módulo de finura pode aumentar a demanda de água no concreto. Krishna *et al.* (2023) também relataram que resíduos com módulo de finura inferior à areia convencional melhoram a coesão da mistura, mas podem reduzir a trabalhabilidade.

Entre os agregados graúdos, o seixo fino registrou módulo de finura de 6.11, enquanto a escória de ferro apresentou 5,23. As massas específicas secas foram de 2,63 g/cm<sup>3</sup> para o seixo fino e 2,73 g/cm<sup>3</sup> para a escória de ferro, com absorção de água de 0,27% e 0.30%, respectivamente. De modo similar Thomas e Harilal (2015), que observaram uma massa específica de 2,75 g/cm<sup>3</sup> para resíduos de ferro, associando essa característica a uma maior densidade mineralógica. Souza, Silva e

Guedes (2020) também encontraram massas específicas superiores a  $2,7 \text{ g/cm}^3$  no mesmo resíduo.

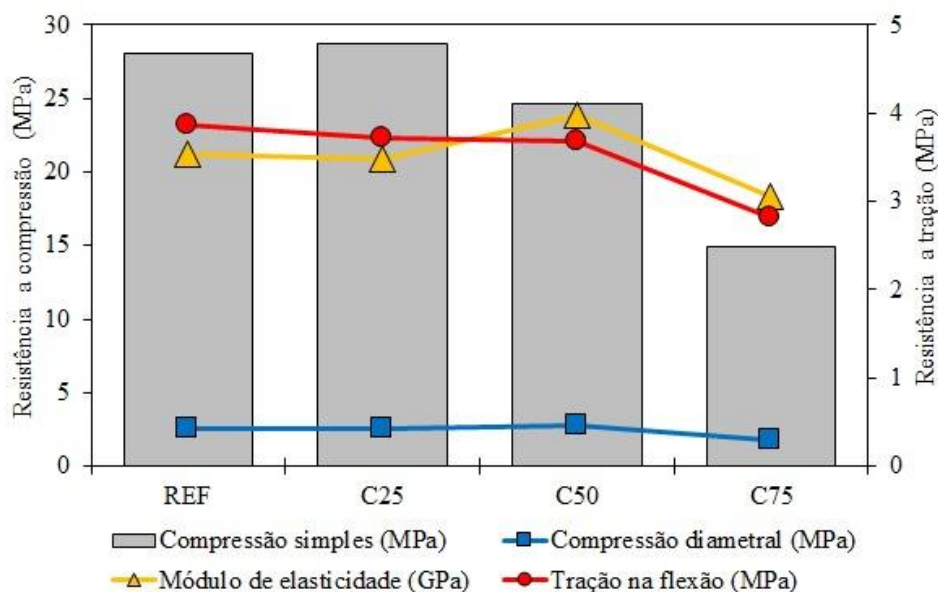
A absorção de água foi superior para a escória de ferro, resultado semelhante ao apresentado por Singh, Gupta e Haque (2022), que mensuraram absorções de 0,32%, sugerindo que esse nível de absorção não compromete a durabilidade da matriz cimentícia.

As curvas granulométricas dos agregados utilizados neste estudo estão apresentadas em anexo, permitindo uma análise detalhada da distribuição dos tamanhos das partículas nos materiais naturais e nos resíduos industriais incorporados.

#### 4.2 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS OBTIDOS COM A SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS

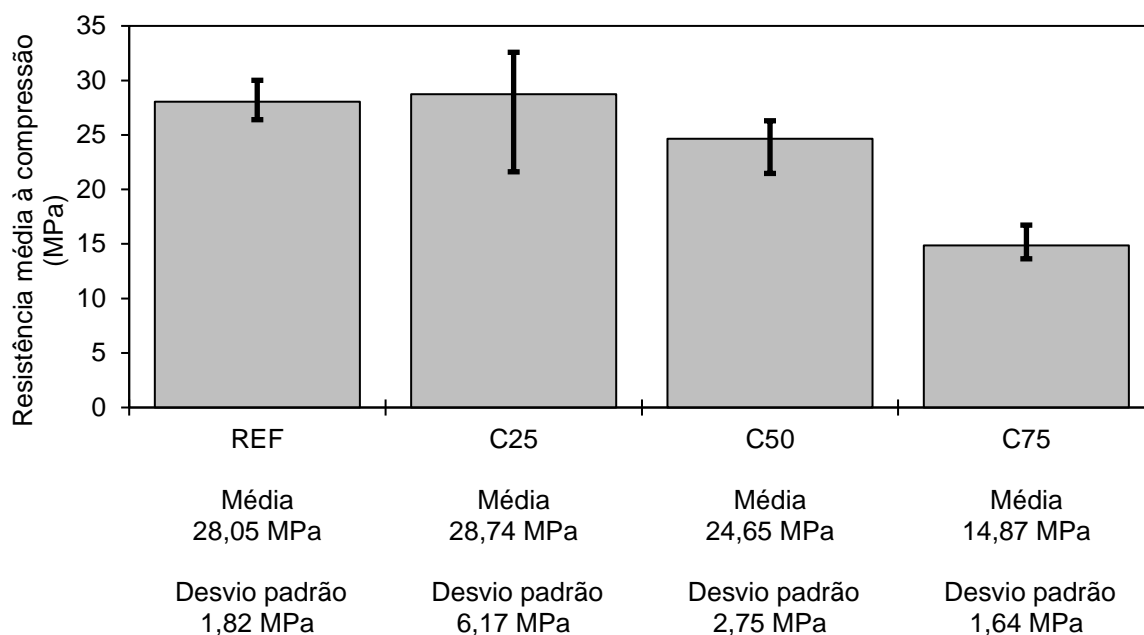
A Figura 4 apresenta a comparação dos resultados dos ensaios mecânicos realizados nos concretos produzidos com diferentes percentuais de substituição de agregados naturais por resíduos industriais, demonstrando a resistência à especificação simples, a resistência à especificação diametral, a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade, permitindo uma visão geral do comportamento estrutural das misturas.

Figura 4- Comparação das propriedades mecânicas dos concretos com diferentes percentuais de substituição de agregados



A Figura 5 apresenta os resultados da resistência à compressão de concretos com substituição parcial de agregados naturais por resíduo de cobre e escória de ferro-gusa, após 28 dias de cura.

Figura 5- Resistência à compressão de concretos com substituição parcial de agregados naturais por resíduo de cobre e escória de ferro-gusa.



Fonte: Autora, 2024.

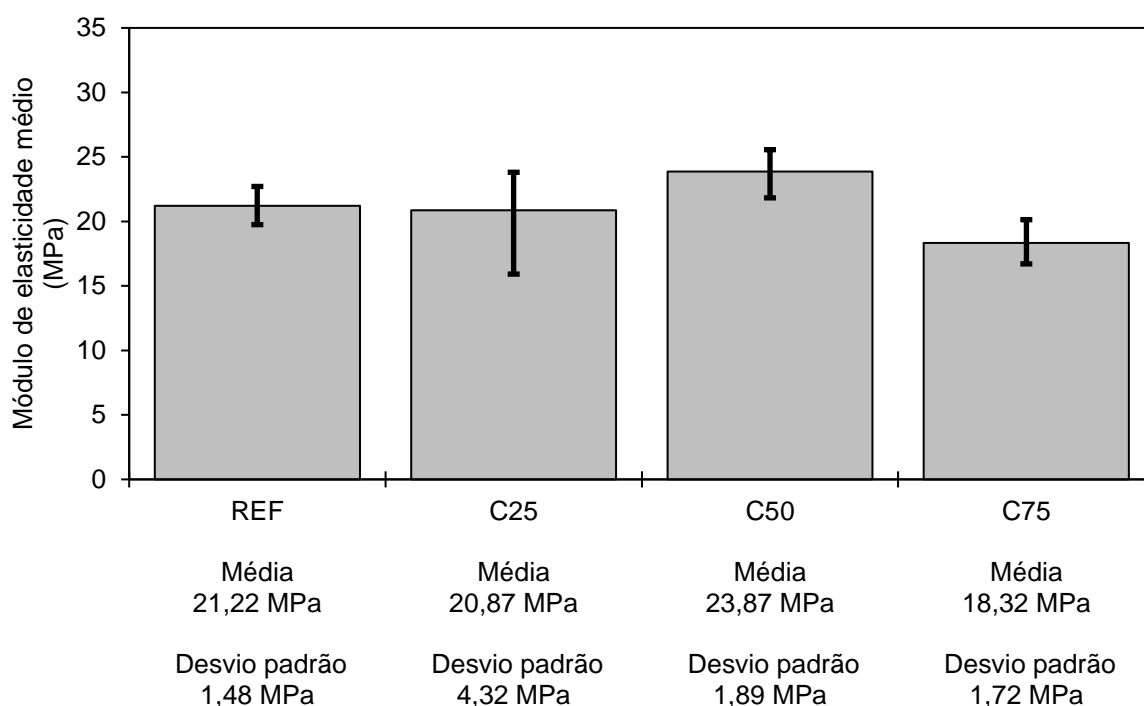
Sousa (2018) também constatou um aumento na resistência à compressão de concretos com 15% de substituição por resíduo de cobre, atribuindo esse comportamento à interação positiva entre as partículas de resíduo e a matriz cimentícia. Sousa (2019) também encontrou que substituições de até 20% por resíduo de cobre mantiveram ou melhoraram a resistência, confirmando o potencial do material para substituir parcialmente os agregados.

Com 50% de substituição, a resistência reduziu se comparada a amostra de REF e a C25. Esse comportamento também foi descrito por Franco *et al.* (2014) em concretos com 50% de resíduos de ferro. Da mesma forma, Thomas e Harilal (2015) relataram queda na resistência em substituições superiores a 30%, devido ao aumento da porosidade.

A substituição de 75% apresentou a menor resistência, sendo consistente com o estudo de Silva, Pereira e Oliveira (2024) que demonstrou que em substituições acima de 50% afetam a resistência do concreto.

A Figura 6 apresenta os valores médios do módulo de elasticidade para o concreto de referência (REF) e para as misturas com substituição parcial de agregados.

Figura 6- Módulo de elasticidade de concretos com substituição parcial de agregados naturais por resíduo de cobre e escória de ferro-gusa



Fonte: Autora, 2024.

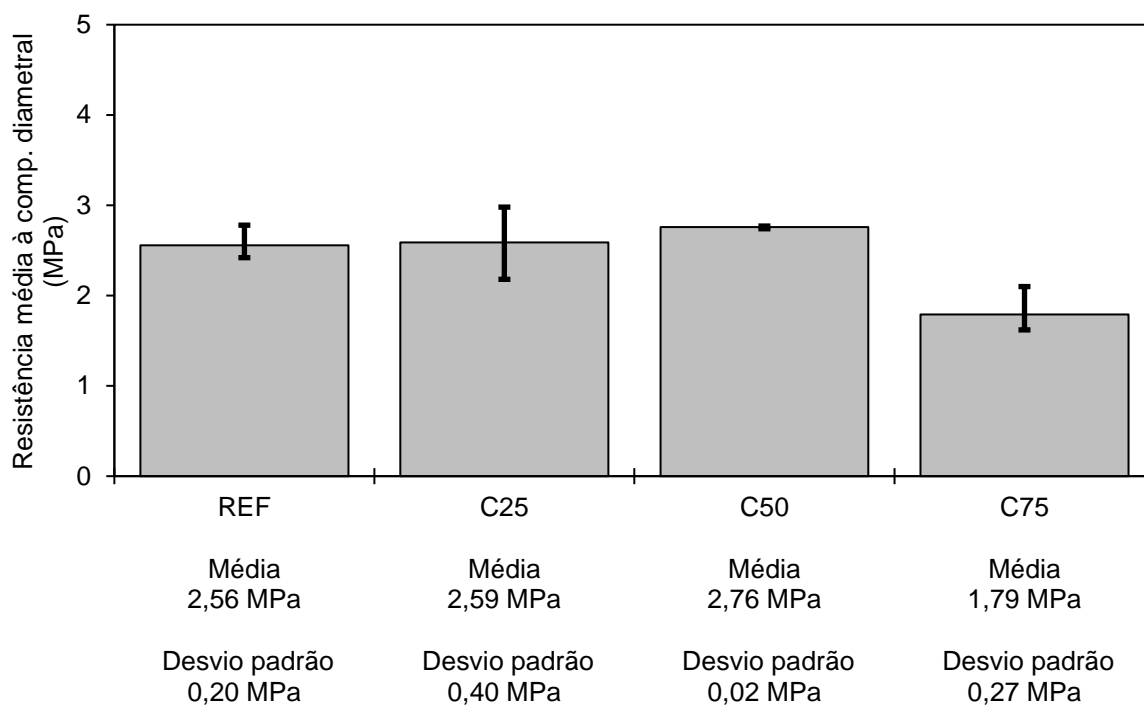
Resultados semelhantes foram observados por Santos e Alves (2020), ao verificarem que a substituição de até 20% de agregados por resíduos de cobre manteve o módulo de elasticidade equivalente ao concreto convencional.

O aumento apresentado no C50 está alinhado com os achados de Bahar, Hameed e Metha (2021), que associaram o incremento no módulo de elasticidade à maior compacidade e melhoria na ligação entre os materiais em misturas contendo até 40% de substituição por resíduo de cobre .

Em contrapartida, o desempenho inferior do C75 reforça as observações de Thomas e Harilal (2015), que identificaram que substituições superiores a 50% de agregados naturais por resíduos de minério de ferro resultaram em aumento da porosidade e redução da coesão interna do concreto, comprometendo sua elasticidade.

A Figura 7 apresenta os resultados da resistência média à compressão diametral dos concretos com substituição parcial de agregados.

Figura 7- Resistência média à compressão diametral de concretos com substituição parcial de agregados naturais por resíduo de cobre e escória de ferro-gusa



Fonte: Autora, 2024.

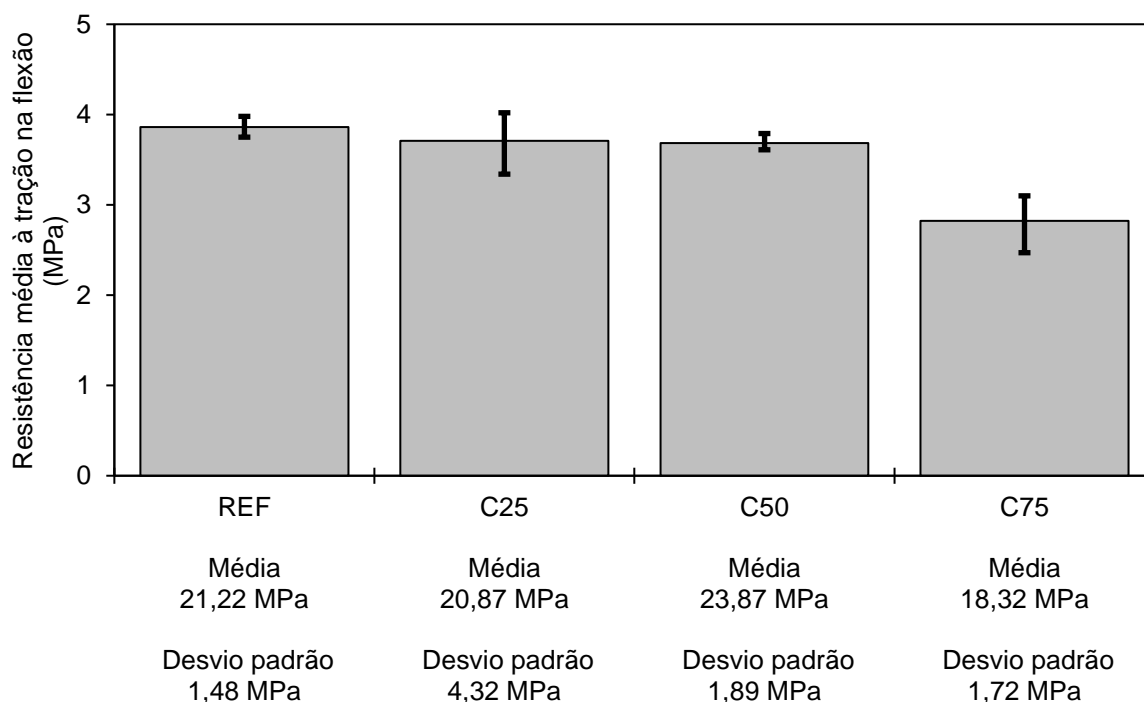
Esse comportamento está alinhado aos achados de Franco *et al.* (2014), que observaram manutenção do desempenho mecânico em concretos com até 50% de substituição de agregados miúdos por resíduos de mineração, destacando que essa proporção não compromete a integridade estrutural do material.

Resultados similares foram reportados por Thomas e Harilal (2015), que verificaram redução na resistência à compressão em substituições acima de 50% de areia por resíduos de minério de ferro, atribuída ao aumento da porosidade e menor interação entre os componentes do concreto.

A Figura 8 apresenta os resultados da resistência média à tração na flexão dos concretos com substituição parcial de agregados.



Figura 8- Resistência média à tração na flexão de concretos com substituição parcial de agregados naturais por resíduo de cobre e escória de ferro-gusa



Fonte: Autora, 2024.

Nesse sentido, Esmaeili e Aslani (2019) observaram que concretos com até 30% de substituição de cimento por resíduos de cobre mantiveram a resistência à tração devido à boa interação entre os materiais e à integridade da matriz cimentícia, comprovada por análise microestrutural.

O concreto C50 apresentou um pequeno aumento em relação a amostra de referência, possivelmente relacionado à maior compactação e à interação entre os agregados e a matriz. Bahar, Hameed e Metha (2021) constataram comportamento semelhante ao substituir até 40% de areia por resíduo de cobre, identificando ganhos de resistência atribuídos à redução de vazios e à melhor distribuição das partículas na mistura.

Já o concreto C75 registrou a menor resistência média à tração, evidenciando que substituições acima de 50% comprometem o desempenho. Wu *et al.* (2022) relataram comportamento similar em concretos com pó de resíduo de ferro, onde substituições superiores a essa mesma proporção reduziram a resistência devido ao aumento da porosidade e à pior interação entre os componentes da mistura.

A tabela 6 apresenta os resultados do ensaio de abatimento do concreto (Slump Test).

Tabela 6- Ensaio de abatimento do concreto (Slump Test)

CREF	95 mm
C25	80 mm
C50	70 mm
C75	77 mm

Fonte: Autora, 2024.

Os valores obtidos demonstraram que o concreto de referência (CREF), apresentou o maior valor de abatimento, 95 mm. Esmaeili e Aslani (2019) observaram que concretos contendo resíduos de cobre mantiveram alta trabalhabilidade, de 91 mm em substituição de 10%, mas com reduções à medida que o teor de resíduos aumentava.

Na amostra C25, o abatimento reduziu para 80 mm, no concreto C50, o abatimento caiu consideravelmente para 70 mm. Singh, Gupta e Haque (2022) relataram comportamento similar em misturas com até 20% de resíduos de cobre, atribuindo a manutenção da trabalhabilidade à compatibilidade do material alternativo com o cimento.

A amostra C75, apresentou um valor de abatimento de 77 mm. Bahar, Hameed e Metha (2021) também observaram perda de trabalhabilidade em concretos com substituições acima de 40% por resíduo de cobre, sugerindo a necessidade de ajustes na relação água/cimento

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo analisou a viabilidade da substituição parcial de agregados naturais por resíduos de cobre e escória de alto-forno na produção de concreto, com foco na avaliação das propriedades mecânicas e na sustentabilidade do material.

Os resultados indicam que substituições de até 25% mantêm ou melhoram a resistência à compressão, a tração na flexão e o módulo de elasticidade, evidenciando uma boa interação entre os resíduos e a matriz cimentícia. Já substituições superiores a 50% resultaram em redução do desempenho mecânico, sugerindo que há um limite para a incorporação desses materiais sem comprometer a integridade estrutural do concreto.

O estudo também reforça a importância de estratégias de reaproveitamento de resíduos industriais, alinhadas à Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), que incentiva práticas de economia circular e o desenvolvimento de materiais alternativos para a construção civil.

Apesar das contribuições apresentadas, aspectos como durabilidade e interação microestrutural dos resíduos com a matriz cimentícia precisam ser mais investigados. Sugere-se que estudos futuros explorem o uso da escória como substituto parcial do cimento e analisem o comportamento do material sob diferentes condições ambientais. A adoção dessas soluções pode reduzir impactos ambientais e promover avanços na engenharia de materiais sustentáveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 11579: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)**. 2012.
- ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 12142: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. 2010.
- ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 12655: Concreto – Preparo, controle e recebimento**. Rio de Janeiro, 2015.
- ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó- Determinação da massa específica**. 2017.
- ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. 2018.
- ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 16889: Concreto- Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. 2020.
- ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 5739: Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos**. 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. 2023
- ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. 2011.
- ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 8522-1: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão**. 2021
- ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. 2015
- ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR11768-1: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1: Requisitos**. 2019
- ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR16917: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. 2021
- ABRAMSON, Daniel M. Concrete and Culture: A Material History. **Journal of Architectural Education**, v. 67, n. 2, p. 314-315, 2013.
- ACORDI, J. et al. Waste valorization of coal mining waste from a circular economy perspective: A Brazilian case study based on environmental and physicochemical features. **Resources Policy**, v. 80, p. 103243, 2023.

- ADAMO, Nasrat et al. Dam safety: Monitoring of tailings dams and safety reviews. **Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering**, v. 11, n. 1, p. 249-289, 2021.
- AHMARI, Saeed; ZHANG, Lianyang. Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization. **Construction and building materials**, v. 29, p. 323-331, 2012.
- AHMED, Hassan Y.; OTHMAN, Ayman M.; MAHMOUD, Afaf A. Effect of using waste cement dust as a mineral filler on the mechanical properties of hot mix asphalt. **Ass. Univ. Bull. Environ. Res**, v. 9, n. 1, p. 51-60, 2006.
- ANBURUVEL, Arulanantham; NIRUBAN SUBRAMANIAM, Daniel. Investigation of the effects of compaction on compressive strength and porosity characteristics of pervious concrete. **Transportation Research Record**, v. 2676, n. 9, p. 513-525, 2022.
- ANDRADE, Jairo José et al. Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 70-83, 2018.
- ANDRADE, Luana Caetano Rocha de. **Caracterização de resíduos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. 112 f. Tese (Doutorado) apresentada à Universidade Federal de Viçosa, 2014.
- ANDREW, Robbie M. Global CO 2 emissions from cement production. **Earth System Science Data**, v. 10, n. 1, p. 195-217, 2018.
- ANM. Agência Nacional De Mineração. **Cadastro Nacional de Barragens de Mineração**. Brasília: ANM, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anm>. Acesso em: 10 fev. 2025.
- ANTUNES, Paulo. **Direito ambiental**. Editora Lumen Juris, 2008.
- BABOR, Dan; PLIAN, Diana; JUDELE, Loredana. Environmental impact of concrete. **Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura**, v. 55, n. 4, p. 27, 2009.
- BAHAR, Ramesh.; HAMEED, Raghu; MEHTA, Povindar Kumar. A Study of Concrete Using Copper Slag as a Partial Replacement of Fine Aggregate. **Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol**, v. 5, n. 11, 2021.
- BARBOZA, Douglas Vieira et al. Aplicação da economia circular na construção civil. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 7, p. e9871102-e9871102, 2019.
- BARBUDO, Miguel Ángel et al. **Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland**. Universidad de Alicante, 2014.
- BATISTA, Bruna Caroline Campos et al. Influência da adição de RCD misto na resistência à compressão e na porosidade de argamassa. **Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v. 59, n. 3, p. 934-946, 2022.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. Uma breve história do cimento Portland. **Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo**, 2009.

BIERNACKI, Joseph . et al. Cements in the 21st century: Challenges, perspectives, and opportunities. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 100, n. 7, p. 2746-2773, 2017.

BOGER, David. Rheology and the resource industries. **Chemical Engineering Science**, v. 64, n. 22, p. 4525-4536, 2009.

BORMA, Laura de Simone; SOARES, Paulo Sergio Moreira. Drenagem ácida e gestão de resíduos sólidos de mineração. In: **Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente**. Cap.10. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p.253-276, 2002.

BRASIL. Lei n. 10.257, de 10 de julho de 2001. **Estatuto da Cidade: diretrizes gerais da política urbana**. Brasília, 2001.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, 2010.

BRUNE, Jürgen. Preface to the MME Special Issue on Emerging Technologies/Fourth Industrial Revolution in Mining. **Mining, Metallurgy & Exploration**, v. 36, n. 4, p. 589-590, 2019.

CAMPOS, Paula Anunciação Matias. **Cimento de baixo impacto ambiental produzido com resíduos industriais e de mineração**. 2017.

CARVALHO, José Maria et al. Low environmental impact cement produced entirely from industrial and mining waste. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 2, p. 04018391, 2019.

CHAUHAN, Surender Singh. Mining, development and environment: a case study of Bijolia mining area in Rajasthan, India. **Journal of human ecology**, v. 31, n. 1, p. 65-72, 2010.

CHEN, Chanratana et al. Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. **Journal of cleaner production**, v. 18, n. 5, p. 478-485, 2010.

CHOI, Yun Wang et al. Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 8, p. 2829-2835, 2009.

COELHO, Jéssica Azevedo; BUSON, Marcio Albuquerque. Avaliação do desempenho à compressão de tijolos de adobe incorporados com resíduo da mineração de cobre e ouro. In **4º Congresso Luso-Brasileiro De Materiais De Construção Sustentáveis**, 2022a.

COELHO, Jéssica Azevedo; BUSON, Marcio Albuquerque. Impactos ambientais e gestão de resíduos na mineração. **Revista Gestão Sustentável**, v. 4, n. 2, p. 77-85, 2022b.

COLLIVIGNARELLI, Maria Cristina et al. The production of sustainable concrete with the use of alternative aggregates: A review. **Sustainability**, v. 12, n. 19, p. 7903, 2020.

COSTA, Jaime Henrique Barbosa da. **Panorama dos Estudos de Aproveitamento de Rejeitos de Mineração do Estado do Pará de 2010 a 2020**. 59 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso - TCC) apresentado à Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), 2022.

DEBIEB, Farid; KENAI, Said. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. **Construction and building materials**, v. 22, n. 5, p. 886-893, 2008.

DEHWAH, H. A. F. Effect of sulfate concentration and associated cation type on concrete deterioration and morphological changes in cement hydrates. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 1, p. 29-39, 2007.

DIAS, Tiago Monteiro. **Análise de desempenho de sistemas sustentáveis em edificações residenciais unifamiliares: estudo aplicado ao semiárido brasileiro**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2023. Disponível em: [https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/16915/2/JAMES\\_MONTEIRO\\_DIAS.pdf](https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/16915/2/JAMES_MONTEIRO_DIAS.pdf). Acesso em: 12 dez. 2024.

DUNUWEERA, Shashiprabha Punyakantha.; RAJAPAKSE, Rajapakse Mudiyansele Gamini. Cement types, composition, uses and advantages of nanocement, environmental impact on cement production, and possible solutions. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, p. 1-11, 2018.

ESMAEILI, Jamshid; ASLANI, Hossein. Use of copper mine tailing in concrete: strength characteristics and durability performance. **Journal of material cycles and waste management**, v. 21, n. 3, p. 729-741, 2019.

FAPESPA. Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas. **Boletim de Mineração**. 2023. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.fapespa.pa.gov.br/sites/default/files/Boletim%20da%20Minera%C3%A7%C3%A3o%202023%20\(vers%C3%A3o%2017.04.2023\)%20EXPEDIENTE.PUBLICA%C3%87%C3%83O.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.fapespa.pa.gov.br/sites/default/files/Boletim%20da%20Minera%C3%A7%C3%A3o%202023%20(vers%C3%A3o%2017.04.2023)%20EXPEDIENTE.PUBLICA%C3%87%C3%83O.pdf). Acessado em out. de 2024

FERREIRA, Hélius de Castro Bicalho *et al.* Análise das propriedades do concreto com uso de rejeito de minério de ferro. In **1º Congresso Brasileiro de Estruturas Mistas (CBEM24) Maringá/PR, Brasil, 15-17, Abril, 2024**.

FRANCO, Luiza Carvalho et al. Aplicação de rejeito de mineração como agregado para a produção de concreto. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**. p. 01-15, 2014.

FRÍAS, Moisés et al. Effect of activated coal mining wastes on the properties of blended cement. **Cement and concrete composites**, v. 34, n. 5, p. 678-683, 2012.

FROTTÉ, Camila *et al.* Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 2, p. e11811, 2017.

GARCIA, Francisco Javier Meneses. **Design of concrete structures**. 2012.

GHANI, Abdul *et al.* Experimental study on the mechanical behavior of concrete incorporating fly ash and marble powder waste. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 19147, 2024.

GHAZI, Ahad Barzegar; JAMSHIDI-ZANJANI, Ahmad; NEJATI, Hamidreza. Utilization of copper mine tailings as a partial substitute for cement in concrete construction. **Construction and Building Materials**, v. 317, p. 125921, 2022.

GOMES, Ana Cláudia Franca *et al.* Aplicação de resíduo de mineração em pequena escala de ouro na produção de tijolo de solo-cimento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, p. e13141, 2022.

GULE, Nontobeko. **Factors contributing to unsuccessful rehabilitation: a case study investigating the rehabilitation practices in Opencast Coal Mines in the Mpumalanga Province, South Africa**. 98 f. Tese (Doutorado) apresentada à Universidade da Cidade do Cabo, 2021.

HABERT, Guillaume *et al.* Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 11, p. 559-573, 2020.

HASANBEIGI, Ali; PRICE, Lynn; LIN, Elina. Emerging energy-efficiency and CO2 emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 8, p. 6220-6238, 2012.

HE, Zhen *et al.* Use of sandstone powder as a mineral additive for concrete. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 276-286, 2018.

HEALY, Frances *et al.* When and why? The chronology and context of flint mining at Grime's Graves, Norfolk, England. In: **Proceedings of the Prehistoric Society**. Cambridge University Press, 2018. p. 277-301.

HENTGES, Tatiane Isabel *et al.* Circular economy in Brazilian construction industry: Current scenario, challenges and opportunities. **Waste Management & Research**, v. 40, n. 6, p. 642-653, 2022.

IBRAM. Instituto Brasileiro De Mineração. **Panorama da Mineração no Brasil**. Brasília: IBRAM, 2022. Disponível em: <https://www.ibram.org.br>. Acesso em: 10 fev. 2025.

IBRAN. Instituto Brasileiro de Mineração. **Políticas públicas para a Indústria Mineral**. Brasília, 2022



JENKINS, Heledd; YAKOVLEVA, Natalia. Corporate social responsibility in the mining industry: Exploring trends in social and environmental disclosure. **Journal of cleaner production**, v. 14, n. 3-4, p. 271-284, 2006.

JESUS, Sara et al. Reduction of the cement content by incorporation of fine recycled aggregates from construction and demolition waste in rendering mortars. **Infrastructures**, v. 6, n. 1, p. 11, 2021.

JUAREZ, Roberto Ivan Cruz; FINNEGAN, Stephen. The environmental impact of cement production in Europe: A holistic review of existing EPDs. **Cleaner Environmental Systems**, v. 3, p. 100053, 2021.

KOU, Shi-Cong; POON, Chi-Sun; ETXEBERRIA, Miren. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 2, p. 286-291, 2011.

KRISHNA, Yelisetty Murali *et al.* Effect of iron ore tailings as partial replacement to fine aggregate on the performance of concrete. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 9, n. 1, p. 8, 2023.

KULSHRESTHA, Sony et al. Legal Framework and Regulatory Compliance in Metal Mining-An Analysis of Environmental and Operational Standards. **Journal of Mines, Metals and Fuels**, p. 1035-1047, 2024.

LAGE, Fabiana Lopes et al. Utilização dos resíduos de minério de ferro na construção civil: uma análise cienciométrica. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 4, p. e94942871-e94942871, 2020.

LI, Yao et al. Environmental impact analysis of blast furnace slag applied to ordinary Portland cement production. **Journal of Cleaner Production**, v. 120, p. 221-230, 2016.

LING, Tung-Chai; POON, Chi-Sun; WONG, Hau-Wing. Management and recycling of waste glass in concrete products: Current situations in Hong Kong. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 70, p. 25-31, 2013.

MACGREGOR, James Grierson et al. **Reinforced concrete: Mechanics and design**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.

MACLAREN, Douglas C.; WHITE, Mary Anne. Cement: Its chemistry and properties. **Journal of Chemical Education**, v. 80, n. 6, p. 623, 2003.

MAIER, Raina M. et al. Mineração socialmente responsável: a relação entre mineração e pobreza, saúde humana e meio ambiente. **Resenhas sobre saúde ambiental**, v. 29, n. 1-2, pág. 83-89, 2014.

MAPBIOMAS. **Relatório Anual de Desmatamento por Mineração**. Brasília: MapBiomass, 2023. Disponível em: <https://mapbiomas.org>. Acesso em: 10 fev. 2025.

MEHTA, Povinda Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 704 p

MEHTA, Povindar Kumar. Reducing the environmental impact of concrete. **Concrete international**, v. 23, n. 10, p. 61-66, 2001.

MEHTA, Povindar Kumar. Sustainable cements and concrete for the climate change era—a review. In: **Proceedings of the second international conference on sustainable construction materials and technologies, Aneona, Italy**. 2010. p. 28-30.

MMA. Ministério Do Meio Ambiente (MMA). **Relatório de Fiscalização Ambiental: Monitoramento de Infrações no Setor Minerário**. Brasília: MMA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma>. Acesso em: 10 fev. 2025.

MOHAMAD, Nabilla et al. Environmental impact of cement production and Solutions: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 48, p. 741-746, 2022.

MONJEZI, Masoud et al. Environmental impact assessment of open pit mining in Iran. **Environmental geology**, v. 58, p. 205-216, 2009.

NAGROCKIENĖ, Džigita; GIRSKAS, Giedrius; SKRIPKIŪNAS, Gintautas. Properties of concrete modified with mineral additives. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 37-42, 2017.

NALULE, Victoria R.; NALULE, Victoria R. Social and environmental impacts of mining. **Mining and the Law in Africa: Exploring the social and environmental impacts**, p. 51-81, 2020.

NASCIMENTO, J. C. et al. Caracterização de resíduos sólidos da barragem de rejeitos da mina do sossego (Canaã dos Carajás-PA). **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 7586-7593, 2015.

NKOGATSE, Thato; GARBERS-CRAIG, Andrie. Evaluation of iron ore concentrate and micropellets as potential feed for sinter production. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 43, n. 3, p. 300-312, 2022.

OLUWOYE, Ibukun et al. Atmospheric emission of NO<sub>x</sub> from mining explosives: A critical review. **Atmospheric Environment**, v. 167, p. 81-96, 2017.

PINHEIRO, Joana Claudia Zandonadi et al. Caracterização química de resíduos de cobre e ferro gusa como agregado miúdo e graúdo no concreto. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 10, p. e9992-e9992, 2024.

POON, C. Shui; SHUI, Z. H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and building materials**, v. 18, n. 6, p. 461-468, 2004.

PROCTOR, D. M. et al. Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags. **Environmental science & technology**, v. 34, n. 8, p. 1576-1582, 2000.

PUNIA, Anita; SINGH, Saurabh Kumar. Contamination of water resources in the mining region. In: **Contamination of water**. Academic Press, 2021. p. 3-17.

RAMOS, Lucas Tadeu da Silva et al. Análise das propriedades do concreto com uso de rejeito de minério de ferro. **Revista Tecnológica-Universidade Estadual de Maringá-ISSN**, v. 1517, p. 8048, 2024a.

RAMOS, Lucas Thadeu et al. Durabilidade de concretos produzidos com substituição de areia por rejeito de minério de ferro. **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, v. 20, p. 1-15, 2024b.

REHAN, Rashid; NEHDI, Moncef. Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry. **Environmental Science & Policy**, v. 8, n. 2, p. 105-114, 2005.

RESCHKE, Juliana Soares. **Escória Granulada de Fundição Utilizada como Substituição ao Cimento em Concretos: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade**. 174 f. Dissertação (Mestrado) apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

REYNOLDS, Terry. Medieval roots of the industrial revolution. **Scientific American**, v. 251, n. 1, p. 122-131, 1984.

RICO, Mayte et al. Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context. **Journal of hazardous materials**, v. 152, n. 2, p. 846-852, 2008.

SAMIR, Mourad et al. Disposal of mining waste: Classification and international recycling experience. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2018. p. 02012.

SCRIVENER, Karen et al. (Ed.). **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. Boca Raton, FL, USA.: Crc Press, 2016.

SCRIVENER, Karen. Options for the future of cement. **Indian Concr. J**, v. 88, n. 7, p. 11-21, 2014.

SCRIVENER, Karen; JOHN, Vanderley; GARTNER, Ellis. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. **Cement and concrete Research**, v. 114, p. 2-26, 2018.

SEGUI, Pauline et al. Mining wastes as road construction material: A review. **Minerals**, v. 13, n. 1, p. 90, 2023.

SHAYAN, Ahmad; XU, Aimin. Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate. **Materials Journal**, v. 100, n. 5, p. 371-380, 2003.

SHEN, Huiting; FORSSBERG, Eric. An overview of recovery of metals from slags. **Waste management**, v. 23, n. 10, p. 933-949, 2003.

SHI, Caijun; MEYER, Christian; BEHNOOD, Ali. Utilization of copper slag in cement and concrete. **Resources, Conservation and recycling**, v. 52, n. 10, p. 1115-1120, 2008.

SIKA SA **Ficha técnica do produto: Sika® Concreto Forte**. Versão 01.03. Osasco: Sika, 2020. Disponível em : <https://bra.sika.com> . Acesso em: 16 dez. 2024

SILVA, Gustavo Ritter et al. Redução do impacto ambiental na construção civil com o uso do tijolo solo-cimento. **Nativa–Revista de Ciências Sociais do Norte de Mato Grosso**, v. 13, n. 1, 2024

SILVA, João; PEREIRA, Ana; OLIVEIRA, Carlos. Uso de materiais sustentáveis na construção civil: uma análise teórica da viabilidade técnica para aplicações práticas. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 15, n. 3, p. 45-60, 2023. Disponível em: <https://rdu.unicesumar.edu.br/handle/123456789/10099>. Acesso em: 12 dez. 2024.

SILVA, R. T.; OLIVEIRA, M. P.; SANTOS, F. J. Efeitos da mineração na qualidade do ar: análise dos impactos respiratórios em populações próximas a áreas de extração. **Revista Brasileira de Saúde Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 50-72, 2020.

SINGH, Navdeep; GUPTA, Akshit; HAQUE, Md Marghoobul. A review on the influence of copper slag as a natural fine aggregate replacement on the mechanical properties of concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 3624-3637, 2022.

SLACK, Rebeca; VOULVOULIS, Nikolaos. Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts Bernd G. Lottermoser, **Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg**, New York, 2003, ISBN: 3-540-00526-9 (277 pp., Hardback). 2006.

SOUSA, Douglas Martins Pereira de. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de argamassas com adição de rejeito de minério de cobre da província mineral de Carajás. In: **A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Civil 4**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2018. p. 388–416.

SOUSA, Douglas Martins Pereira de. **Utilização de rejeito de minério do cobre como agregado miúdo na produção de concreto**. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético) - Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019

SOUSA, Douglas Martins. **Utilização de rejeito de minério do cobre como agregado miúdo na produção de concreto**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019. Disponível em: [https://repositorio.ufpa.br/bitstream/2011/12604/1/Dissertacao\\_UtilizacaoRejeitoMineiro.pdf](https://repositorio.ufpa.br/bitstream/2011/12604/1/Dissertacao_UtilizacaoRejeitoMineiro.pdf). Acesso em: 10 fev. 2025.

SOUZA, João Vitor Silveira; SILVA, Juliana; GUEDES, Mascarenhas. O rejeito de minério de ferro e suas aplicações na construção civil. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 12, p. 104064-104074, 2020.

STREZOV, Vladimir et al. Structural deterioration of iron ore particles during thermal processing. **International Journal of Mineral Processing**, v. 100, n. 1-2, p. 27-32, 2011.

THOMAS, Job; HARILAL, Bob. Properties of cold bonded quarry dust coarse aggregates and its use in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 62, p. 67-75, 2015.

THOMPSON, David T. **Cyanide: Social, industrial and economic aspects**. 2001.

TOPCU, Ilker Bekir; BILIR, Turhan; UYGUNOĞLU, Tayfun. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. **Construction and building Materials**, v. 23, n. 5, p. 1947-1953, 2009.

USP. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. **Cimento: a produção mundial pode dobrar sem aumentar CO2**. 2021. Disponível em: <https://www.poli.usp.br/noticias/1527-cimento-producao-mundial-pode-dobrar-sem-aumentar-co2.html>. Acesso em: 12 dez. 2024.

VALE S.A. **Relatório de Sustentabilidade: Gestão de Rejeitos e Barragens**. Rio de Janeiro: Vale, 2023. Disponível em: <https://www.vale.com>. Acesso em: 10 fev. 2025.

VARELA, Noel; VIEIRA, Fernando Sales. Cimento: Uma matéria-prima essencial no fabrico de argamassas. In: **1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa**. 2005.

VASCONCELLOS, M. L.; FREITAS, R. P.; COSTA, J. C. Poluição por mercúrio na Amazônia: impactos na saúde pública e estratégias de mitigação. **Revista Brasileira de Ecotoxicologia**, v. 34, n. 2, p. 89-107, 2021.

VICK, Steven G. **Planning, design, and analysis of tailings dams**. BiTech Publishers Ltd., 1990.

WMC. World Mining Congress. **Global Mining Outlook 2023**. Bruxelas: WMC, 2023. Disponível em: <https://www.worldminingcongress.org>. Acesso em: 10 fev. 2025.

WU, Ruidong *et al.* Enhancement effect and mechanism of iron tailings powder on concrete strength. **Journal of Building Engineering**, v. 57, p. 104954, 2022.

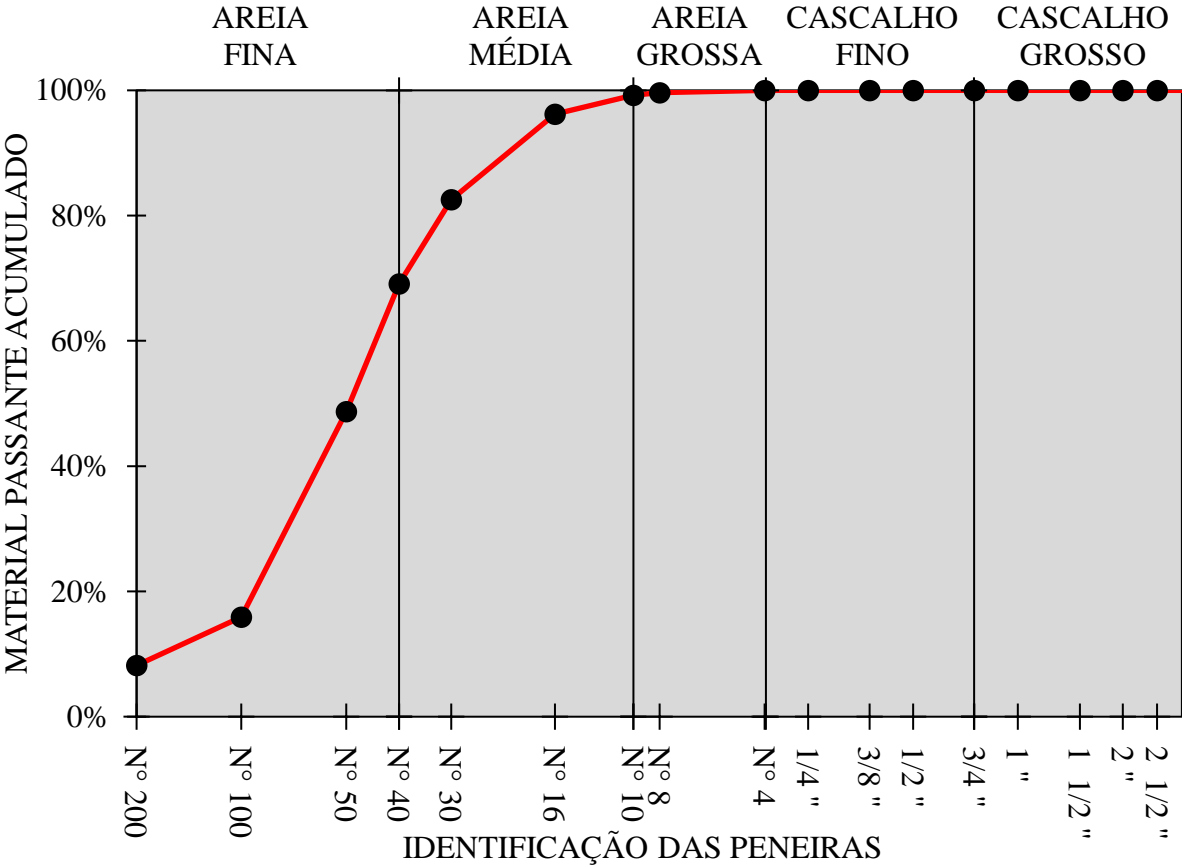
YILDIRIM, Irem Zeynep; PREZZI, Monica. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. **Advances in civil engineering**, v. 2011, n. 1, p. 463638, 2011.

YORO, Kelvin O.; DARAMOLA, Michael O. CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. In: **Advances in carbon capture**. Woodhead Publishing, 2020. p. 3-28.

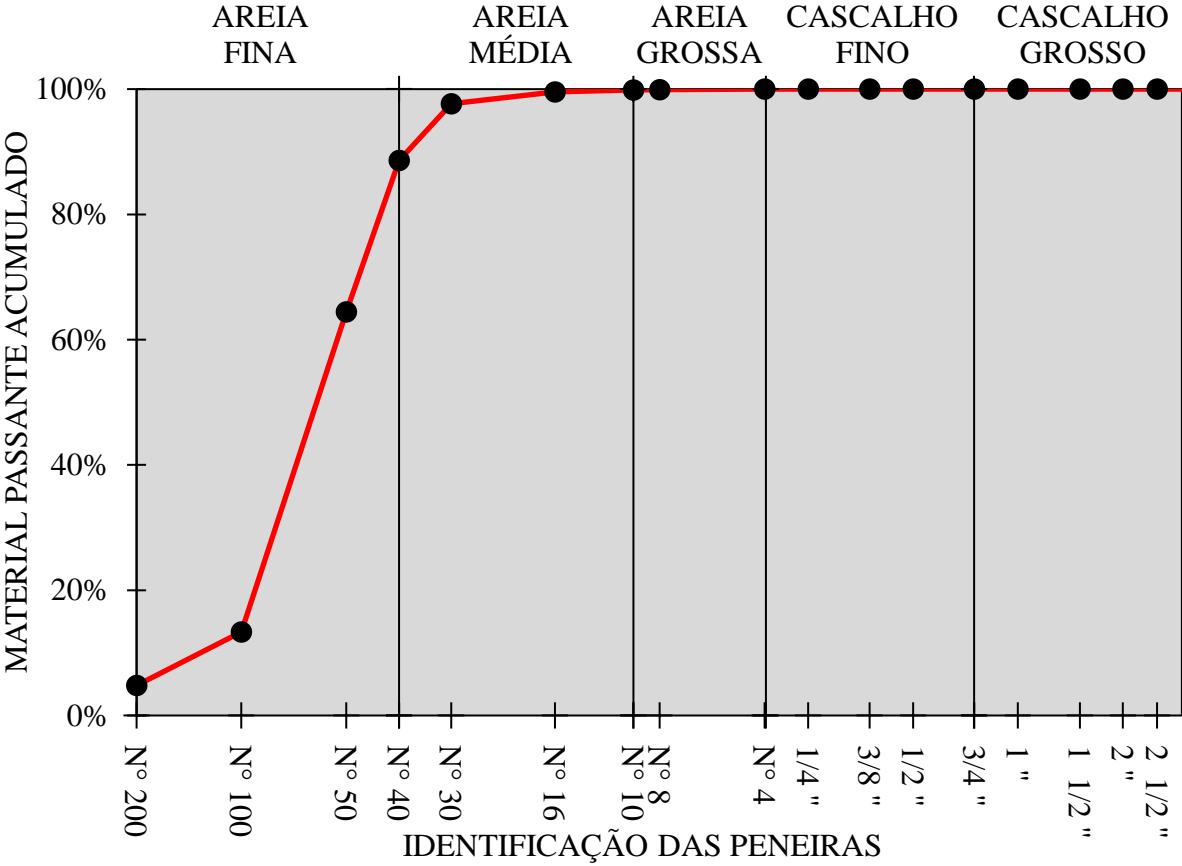
ZHAO, Sujing; FAN, Junjiang; SUN, Wei. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 540-548, 2014.

ANEXO – Curvas granulométricas

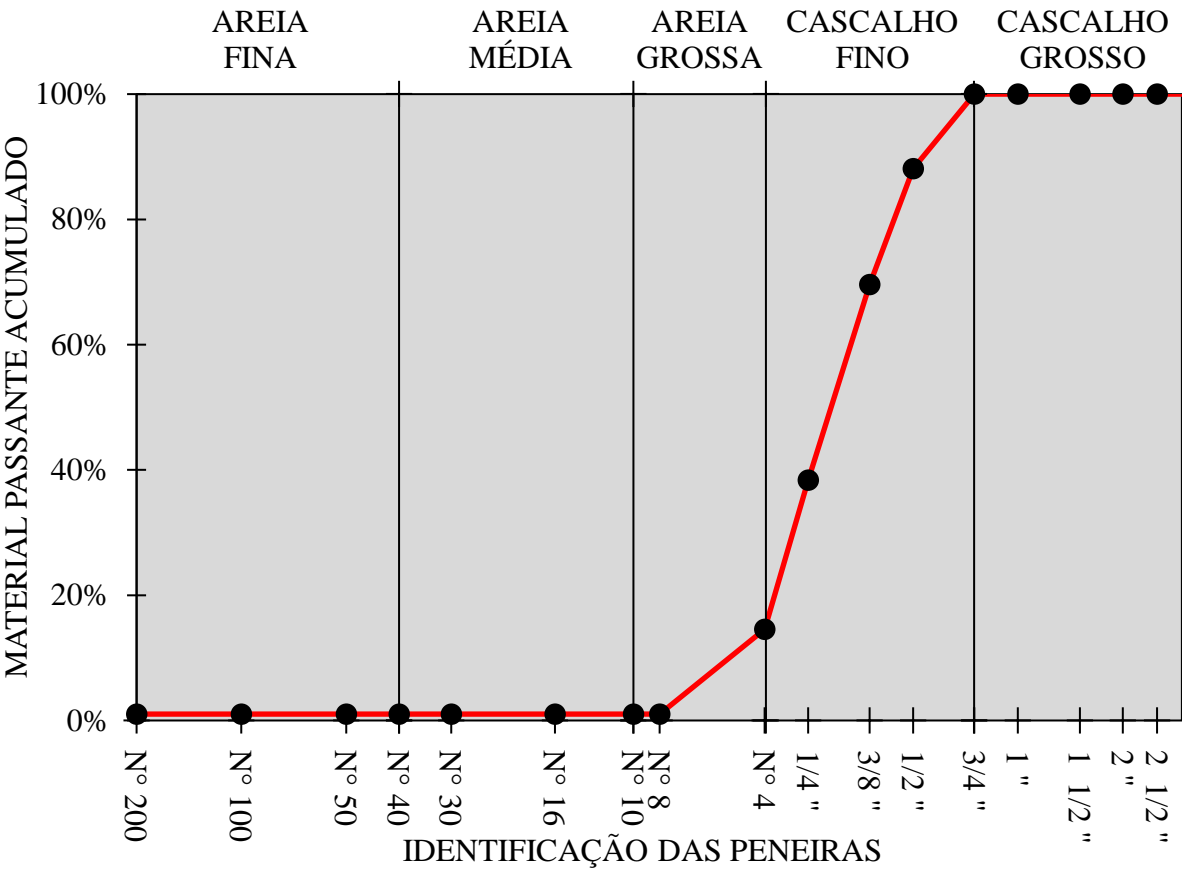
AMOSTRA DE AREIA FINA



# AMOSTRA DE REJEITO DE COBRE



# AMOSTRA DE SEIXO FINO





# AMOSTRA DE ESCORIA DE FERRO

