



CENTRO UNIVERSITÁRIO FAEMA – UNIFAEMA

BRUNA BARBOSA DA SILVA

**APROVEITAMENTO DO REJEITO DE CASSITERITA PARA PRODUÇÃO DE
CONCRETO**

**ARIQUEMES - RO
2025**

BRUNA BARBOSA DA SILVA

**APROVEITAMENTO DO REJEITO DE CASSITERITA PARA PRODUÇÃO DE
CONCRETO**

Artigo científico apresentado ao Centro Universitário FAEMA (UNIFAEMA), como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Civil.

Orientador(a): Profa. Ma. Silênia Priscila da Silva Lemes

**ARIQUEMES - RO
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Centro Universitário Faema - UNIFAEMA

Gerada mediante informações fornecidas pelo(a) Autor(a)

S586a SILVA, Bruna Barbosa da

Aproveitamento do rejeito de cassiterita para produção de concreto:
estudo de desempenho em Ariquemes-RO/ Bruna Barbosa da Silva –
Ariquemes/ RO, 2025.

34 f. il.

Orientador(a): Profa. Ma. Silênia Priscila da Silva Lemes

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)
– Centro Universitário Faema - UNIFAEMA

1.Rejeito de mineração. 2.Concreto sustentável. 3.Resíduos da mineração.
4.Construção civil. I.Lemes, Silênia Priscila da Silva. II.Título.

CDD 624

Bibliotecário(a) Isabelle da Silva Souza

CRB 11/1148

BRUNA BARBOSA DA SILVA

APROVEITAMENTO DO REJEITO DE CASSITERITA PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO

Artigo científico apresentado ao Centro Universitário FAEMA (UNIFAEMA), como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof. Ma. Silênia Priscila da Silva Lemes

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ma. Silênia Priscila da Silva Lemes (orientadora)
Centro Universitário FAEMA – UNIFAEMA

Prof. Dr. Roemir Peres Machado Moreira (examinador)
Centro Universitário FAEMA – UNIFAEMA

Prof. Esp. Dhione Marcos da Silva (examinador)
Centro Universitário FAEMA - UNIFAEMA

Dedico este trabalho aos meus pais, familiares e amigos, que me apoiaram e incentivaram a seguir em frente com meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, fonte de toda força, sabedoria e coragem que me sustentou ao longo dessa caminhada. Em meio aos momentos de incerteza, foi Ele quem me mostrou que era possível seguir em frente, mesmo quando tudo parecia difícil. Cada conquista, cada passo dado até aqui, carrega a graça e a misericórdia de Deus na minha vida.

Aos meus professores, minha profunda gratidão por cada ensinamento compartilhado e por todo o apoio durante a formação. Em especial, à professora Priscila, que gentilmente aceitou me orientar neste trabalho. Sua dedicação e disponibilidade foram fundamentais para que eu pudesse desenvolver este projeto com segurança e confiança, ela é a melhor, guardei cada conselho que me deu.

Com todo amor e saudade, agradeço ao meu pai, que partiu logo no início da minha graduação. Ele foi, e sempre será, minha maior inspiração. Foi ele quem me incentivou a entrar na faculdade, quem acreditou em mim mesmo antes que eu acreditasse. Escolhi o curso de Engenharia Civil porque cresci vendo a paixão com que ele atuava como mestre de obras, com olhos que brilhavam diante de cada projeto, com mãos que transformam sonhos em estruturas reais. Tínhamos tantos planos juntos... e, embora a vida tenha seguido um caminho diferente, sinto que ele esteve comigo em cada etapa, em cada desafio superado. Tenho certeza de que, se ele estivesse aqui, estaríamos comemorando esta conquista lado a lado, com o orgulho de quem sonhou junto. Porque esta vitória não é apenas minha, é nossa. É o nosso sonho que hoje se concretiza.

À minha mãe, minha eterna fortaleza, agradeço por nunca ter largado a minha mão. Obrigada por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis, por me incentivar a continuar mesmo quando a dor parecia paralisar, e por cuidar do meu filho com tanto amor, permitindo que eu me dedicasse aos estudos.

Ao meu marido, minha gratidão mais sincera por me apoiar incondicionalmente. Obrigada por me incentivar constantemente, por não me deixar desistir nos dias mais duros, por ouvir meu choro e minhas dúvidas, e por acreditar em mim quando eu mesma hesitava. Sem você, essa conquista não teria o mesmo sentido.

Aos amigos que caminharam comigo nesta jornada, Adrielison, Matheus, Luis e Eoaks, obrigado pelas experiências trocadas, pelas risadas e pela leveza que trouxeram a esses cinco anos. A convivência de vocês tornou essa trajetória mais leve e cheia de bons momentos.

Agradeço também às minhas amigas Aline e Andressa, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo apoio, compreensão e presença verdadeira em todos os momentos.

Agradeço aos meus irmãos Eduardo e Junior, por fazerem parte da minha base e por compartilharem comigo cada etapa desta jornada, por sempre estarem ao meu lado.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste sonho, deixo aqui minha eterna gratidão.

Por fim, eu não poderia deixar de agradecer aos meus colegas que me ajudaram nos experimentos em laboratório, Adrielison, Edvilson, Matheus e em especial ao Samuel que esteve comigo no laboratório todos os dias colocando a mão na massa junto comigo, obrigada, vocês foram primordiais para que eu conseguisse finalizar essa etapa.

*"Ensina-nos a contar os nossos dias
para que o nosso coração alcance
sabedoria."*

Salmos 90:12.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1. MINERAÇÃO E GERAÇÃO DE REJEITOS	13
2.2. TIPOS DE REJEITOS E CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS	14
2.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA: INFLUÊNCIA REGIONAL	14
2.4. IMPACTOS AMBIENTAIS DO DESCARTE INADEQUADO	15
2.5. REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	15
2.6. LIMITAÇÕES TÉCNICAS, BARREIRAS E NORMATIZAÇÃO	16
3 MATERIAIS E MÉTODO	17
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS E ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	17
3.1.1 Insumos Utilizados	17
3.1.2 Processamento e Origem Do Rejeito	17
3.1.3 Ensaios Físicos De Caracterização	19
3.1.4 Análise Mineralógica Por Difração De Raios X (DRX)	20
3.2 DOSAGEM E PLANEJAMENTO DOS TRAÇOS EXPERIMENTAIS	21
3.3 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS	22
3.4 ENSAIO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO – ABATIMENTO DO CONCRETO	22
3.5 ENSAIO DE CAPILARIDADE	23
3.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À AÇÃO DE SULFATOS SÓDIO	24
3.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	25
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	26
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
REFERÊNCIAS	33
ANEXO A - DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO DE PLÁGIO	36

APROVEITAMENTO DO REJEITO DE CASSITERITA PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO

UTILIZATION OF CASSITERITE TAILINGS FOR CONCRETE PRODUCTION

Bruna Barbosa da Silva¹
 Silênia Priscila da Silva Lemes²

RESUMO

O Brasil gera anualmente bilhões de toneladas de rejeitos de mineração, realidade que reforça a urgência de estratégias de economia circular capazes de mitigar impactos ambientais e reduzir a pressão sobre jazidas de agregados naturais. Nesse cenário, o rejeito de cassiterita, abundante na região mineradora de Rondônia, surge como um material promissor para aplicações na construção civil. Este estudo avaliou a viabilidade técnica de sua utilização como substituto parcial do agregado miúdo em concretos estruturais. Foram desenvolvidos quatro traços: um traço de referência e três traços experimentais contendo 20%, 40% e 60% de substituição do agregado miúdo por rejeito de cassiterita, em massa. A caracterização física incluiu ensaios de granulometria, massa específica e massa unitária, evidenciando que o rejeito apresenta comportamento granulométrico semelhante ao da areia natural, o que reforça seu potencial de reaproveitamento. Na etapa de avaliação do concreto endurecido, foram realizados ensaios de resistência à compressão 7, 14, 21 e 28 dias, absorção por capilaridade e durabilidade frente ao ataque por sulfato de sódio. O traço com 20% de substituição apresentou desempenho mecânico satisfatório, alcançando 25,07 MPa aos 28 dias, uma redução de apenas 1,18% em relação ao concreto convencional 25,37 MPa. Em contrapartida, os teores de 40% e 60% resultaram em perdas mais significativas 16,87% e 18,76%, associadas ao aumento da demanda de água e à maior porosidade das misturas, evidenciadas pela redução do abatimento 12,00 cm para apenas 2,50 cm no traço de 60%. Quanto à durabilidade, todos os traços foram classificados como adequados segundo os critérios de Helene 1993. Ainda assim, a substituição de 20% se mostrou a alternativa mais equilibrada, apresentando a menor perda de resistência após exposição ao sulfato quida de apenas 0,27%. De modo geral, o estudo demonstra que o rejeito de cassiterita possui elevado potencial de reaproveitamento, oferecendo uma solução sustentável e tecnicamente viável para a construção civil de Rondônia, ao mesmo tempo em que contribui para a redução do passivo ambiental da atividade mineradora.

¹ Acadêmica de Engenharia Civil, Centro Universitário- UNIFAEMA. bruna.44037@unifaema.edu.br

² Ma. Silênia Priscila da Silva Lemes, Professora no Centro Universitário- UNIFAEMA. silenia.lemes@unifaema.edu.br

Palavras-chave: rejeito de mineração; concreto sustentável; resíduos da mineração; construção civil.

ABSTRACT

Brazil annually generates billions of tons of mining tailings, a reality that reinforces the urgency of circular economy strategies capable of mitigating environmental impacts and reducing pressure on natural aggregate reserves. In this scenario, cassiterite tailings, which are abundant in the mining region of Rondônia, emerge as a promising material for applications in civil construction. This study evaluated the technical viability of utilizing it as a partial substitute for fine aggregate in structural concrete. Four mixes were developed: one reference mix and three experimental mixes containing 20%, 40%, and 60% fine aggregate substitution with cassiterite tailings, by mass. The physical characterization included tests for granulometry, specific mass, and unit mass, showing that the tailings exhibit granulometric behavior similar to natural sand, which reinforces their potential for reuse. In the hardened concrete evaluation stage, tests were performed for compressive strength at 7, 14, 21, and 28 days, capillary water absorption, and durability against sodium sulfate attack. The mix with 20% substitution demonstrated satisfactory mechanical performance, reaching 25.07 MPa at 28 days, a reduction of only 1.18% compared to the conventional concrete 25.37 MPa. In contrast, the 40% and 60% contents resulted in more significant losses 16.87% and 18.76%, associated with an increased water demand and higher porosity of the mixtures, as evidenced by the slump reduction from 12.00 cm to just 2.50 cm in the 60% mix. Regarding durability, all mixes were classified as adequate according to the criteria of (Helene, 1993). Nevertheless, the 20% substitution proved to be the most balanced alternative, presenting the lowest strength loss after sulfate exposure, a drop of only 0.27%. Overall, the study demonstrates that cassiterite tailings have a high potential for reuse, offering a sustainable and technically viable solution for the civil construction sector in Rondônia, while simultaneously contributing to the reduction of the mining activity's environmental liability.

Keywords: mining waste; sustainable concrete; mining residues; civil construction.

1 INTRODUÇÃO

A atividade mineradora, embora essencial ao desenvolvimento econômico e ao abastecimento de setores como a construção civil, gera grandes volumes de rejeitos provenientes das etapas de extração e beneficiamento, geralmente depositados em barragens, bacias de decantação ou pilhas a céu aberto, representando um desafio crescente para a gestão ambiental (SILVA;OLIVEIRA,2020). Entre 2010 e 2019, estima-se que tenham sido geradas aproximadamente 3,4 bilhões de toneladas de rejeitos de mineração no Brasil, evidenciando a magnitude desse passivo (ANM,2020). Na região Norte, esse cenário é ainda mais expressivo devido à forte produção de estanho, especialmente nos estados do Amazonas e de Rondônia, que concentraram em 2017 cerca de 43% e 35% da produção nacional de concentrado, respectivamente, posicionando Rondônia como o segundo maior produtor do país e reforçando a relevância da gestão dos rejeitos associados à lavra de cassiterita na região (ANM,2018).

No Brasil, o aproveitamento de rejeitos minerais para fins construtivos tem sido reconhecido como uma alternativa promissora. Isso se deve, em parte, ao fato de que a construção civil é um dos setores que mais consome recursos naturais, como areia e brita, e é responsável por parcela significativa dos impactos ambientais relacionados à exploração de agregados. A intensa exploração desses materiais naturais tem provocado esgotamento de jazidas, desequilíbrio ambiental e aumento dos impactos associados à extração. Nesse contexto, a incorporação de resíduos provenientes de outras atividades produtivas, como os rejeitos de mineração, surge como estratégia sustentável capaz de reduzir a demanda por agregados naturais e, simultaneamente, favorecer o desenvolvimento de novos materiais com desempenho satisfatório (LAGE,2020).

No estado de Rondônia, especialmente na região do Vale do Jamari, a atividade de garimpo para extração de cassiterita gera grandes volumes de rejeitos, os quais apresentam características granulométricas semelhantes às da areia natural. Quando descartados de forma inadequada, esses materiais podem causar sérios impactos ambientais, como assoreamento de corpos d'água, degradação do solo e intensificação de processos erosivos. Contudo, quando devidamente caracterizados e aplicados como substitutos de agregados, apresentam potencial de aproveitamento técnico e ambientalmente viável (IBRAM,2016). Nesse contexto, o reaproveitamento de rejeitos minerais como agregados alternativos apresenta-se como alternativa promissora, integrando princípios de economia circular e mitigando impactos ambientais.

Estudos recentes indicam que rejeitos de mineração, sobretudo os de granulometria arenosa, podem ser incorporados a concretos e argamassas sem prejuízo significativo ao desempenho mecânico, desde que avaliados aspectos como granulometria, composição química, absorção de água

e durabilidade (Simonsen et al., 2019; Martins et al., 2021; Arbili et al., 2022). No entanto, a cassiterita, apesar de amplamente explorada em Rondônia, ainda é pouco investigada quanto ao seu potencial de aplicação como agregado miúdo. A variabilidade mineralógica regional e a presença de partículas finas e pulverulentas tornam necessária uma avaliação técnica, sobretudo quanto à resistência mecânica e ao comportamento frente a agentes agressivos, como sulfatos (Costa, 2015).

Diante desse cenário, surge a necessidade de investigar se o rejeito de cassiterita gerado no Vale do Jamari, Rondônia, apresenta propriedades compatíveis com sua utilização em concretos. Assim, este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade técnica da substituição parcial do agregado miúdo natural pelo rejeito de cassiterita. Para isso, são avaliados ensaios de resistência mecânica, e de durabilidade, de modo a verificar se concretos com rejeito de minério podem manter desempenho semelhante ao do concreto convencional.

A relevância deste estudo reside na possibilidade de transformar um rejeito abundante e sem valor econômico em um recurso útil, contribuindo simultaneamente para a redução de impactos ambientais e para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis na construção civil.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. MINERAÇÃO E GERAÇÃO DE REJEITOS

A mineração é uma atividade fundamental para o desenvolvimento econômico, fornecendo matérias-primas essenciais para diversos setores industriais e para a construção civil. No entanto, ela é também uma das principais responsáveis pela geração de resíduos sólidos em grande escala. Durante o processo de beneficiamento mineral, apenas uma fração do material extraído corresponde ao minério de interesse econômico, enquanto o restante é descartado como estéril ou rejeito. Os rejeitos, também chamados de *tailings*, são compostos principalmente por partículas finas resultantes da moagem e concentração do minério, além de frações minerais sem valor comercial imediato. Estima-se que, globalmente, mais de 14 bilhões de toneladas de rejeitos sejam geradas anualmente, e a tendência é de crescimento à medida que minérios de menor teor são explorados (El Machi et al., 2024).

No Brasil, a situação é ainda mais crítica devido à predominância de minérios como o ferro, o ouro, a bauxita e a cassiterita, cuja exploração resulta em grandes volumes de rejeitos. Historicamente, esses materiais são dispostos em barragens de rejeito e bacias de decantação, estruturas de contenção que, quando não bem geridas, podem trazer riscos elevados. Os desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019) evidenciaram a vulnerabilidade desse modelo de disposição e reforçaram a necessidade de soluções alternativas, incluindo o reaproveitamento dos rejeitos na construção civil (Rotta et al., 2020).

2.2. TIPOS DE REJEITOS E CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS

A granulometria é um dos principais parâmetros para caracterizar os rejeitos de mineração, uma vez que define o comportamento físico e mecânico do material. Em linhas gerais, os rejeitos podem apresentar-se como materiais lamicentes, com predominância de partículas extremamente finas (menores que 0,075 mm), ou como materiais de aspecto arenoso, quando há predominância de partículas grossas entre 0,075 mm e 4,75 mm. Essa classificação tem implicações diretas na possibilidade de uso em concretos, argamassas ou blocos, visto que rejeitos muito finos tendem a aumentar a demanda de água e a reduzir a fluidez, enquanto rejeitos arenosos se aproximam mais do comportamento da areia natural (Simonsen et al., 2019).

A influência da granulometria é marcante: partículas finas, quando bem distribuídas, podem atuar como material de preenchimento, reduzindo a porosidade e aumentando a densidade do concreto. No entanto, quando em excesso, podem comprometer a trabalhabilidade e gerar fissuração por retração. Já partículas mais grossas contribuem para a resistência mecânica, mas podem resultar em concretos mais permeáveis se não houver equilíbrio na composição do traço. Dessa forma, o estudo granulométrico é indispensável para definir a viabilidade de uso de cada rejeito.

2.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA: INFLUÊNCIA REGIONAL

Além da granulometria, a composição química e mineralógica dos rejeitos influencia diretamente na sua classificação e no seu comportamento quando reutilizados. Rejeitos de minério de ferro são geralmente constituídos por quartzo, hematita e magnetita, com altas porcentagens de sílica (SiO_2) e óxidos de ferro (Fe_2O_3). Essa composição faz com que sejam materiais de elevada densidade e cor avermelhada, características que impactam tanto a estética quanto a trabalhabilidade dos concretos produzidos com sua incorporação (LI et al., 2023).

Já os rejeitos de cassiterita, abundantes em Rondônia, apresentam características distintas. Estudos de (Akinola et al. 2022) demonstraram que rejeitos desse minério podem conter teores expressivos de sílica (~45%), ferro (~25%) e titânio (~15%), além de minerais pesados como zircão e ilmenita. Essa diversidade mineralógica explica a variação encontrada em diferentes regiões: em alguns locais, os rejeitos apresentam aspecto mais lamicente, rico em partículas ultrafinas; em outros, predominam frações arenosas, com maior teor de quartzo. Essa variabilidade regional e até mesmo local, entre diferentes pilhas de rejeitos, é resultado da composição geológica das jazidas e das técnicas de beneficiamento empregadas, reforçando a necessidade de caracterização caso a caso antes de propor seu reutilização.

2.4. IMPACTOS AMBIENTAIS DO DESCARTE INADEQUADO

O descarte inadequado de rejeitos é uma das principais preocupações ambientais relacionadas à mineração. Barragens e pilhas de rejeito podem liberar contaminantes para o solo e a água, especialmente quando há minerais sulfetados que oxidam e produzem drenagem ácida, capaz de mobilizar metais pesados como ferro, manganês, chumbo e arsênio. Além da contaminação química, há efeitos físicos como o assoreamento de cursos d'água, o aumento da turbidez e a alteração do equilíbrio ecológico. (Silva et al., 2023) destacam que áreas de intensa atividade mineral frequentemente apresentam parâmetros de qualidade da água acima dos limites legais, como cor aparente e turbidez, mesmo em condições naturais, devido à mineralização da região.

Além dos impactos ambientais diretos, o descarte inadequado compromete a segurança das comunidades próximas. Estudos apontam que a mineração gera danos ambientais significativos e, muitas vezes, irreversíveis, como disposição inadequada de rejeitos, escorregamentos, assoreamento de corpos hídricos e degradação da paisagem (Portella, 2015). Esses impactos têm repercussões sociais e econômicas duradouras, reforçando a necessidade de prevenir falhas em estruturas de contenção e aprimorar o gerenciamento de rejeitos, conforme discutido pelo autor, ao tratar dos desafios da atividade de mineração no Brasil.

2.5. REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O reaproveitamento de rejeitos da mineração na construção civil tem ganhado destaque como alternativa sustentável para redução de passivos ambientais e diminuição da dependência de areia natural. Entre as aplicações mais investigadas, destaca-se a substituição parcial do agregado miúdo em concretos, argamassas e blocos. Estudos mostram que rejeitos de minério de ferro podem substituir entre 25% e 50% da areia, mantendo desempenho mecânico satisfatório quando ajustados parâmetros como relação água/cimento e uso de aditivos superplastificantes (SILVA et al., 2023). Em pesquisas com concretos de ultra alto desempenho (UHPC), observou-se que teores moderados de rejeito não comprometem a resistência à compressão, e em aplicações para pavimentação, (FANG, 2025) identificou desempenho adequado em resistência, durabilidade e comportamento sob cargas repetidas.

No caso específico dos rejeitos de cassiterita, ainda há menos estudos aplicados, mas análises mineralógicas e granulométricas indicam potencial de uso, especialmente das frações arenosas resultantes do beneficiamento. Essas partículas apresentam características compatíveis com agregados miúdos e podem ser incorporadas em concretos, argamassas e blocos, contribuindo para reduzir a extração de areia natural e agregar valor a materiais antes classificados como resíduos

(FANG et al,2025). Além disso, novas pesquisas vêm explorando o uso desses refeitos em cimentos de ativação alcalina e geopolímeros. Devido ao teor de sílica e alumina, esses materiais podem atuar como precursores de ligantes alternativos ao cimento Portland, oferecendo menor emissão de CO₂, e proporcionando destinação mais nobre e eficiente aos resíduos (ARAÚJO et al,2024).

Dessa forma, o reaproveitamento de rejeitos minerais representa uma estratégia tecnicamente promissora, capaz de reduzir impactos ambientais, valorizar resíduos e ampliar possibilidades de inovação na construção civil, desde que acompanhado de caracterização adequada e de ajustes no processo de dosagem.

2.6. LIMITAÇÕES TÉCNICAS, BARREIRAS E NORMATIZAÇÃO

Apesar dos avanços na área, ainda persistem limitações que dificultam a adoção de rejeitos minerais em escala industrial na construção civil. Uma das principais barreiras é a heterogeneidade desses materiais, pois granulometria, mineralogia e composição química podem variar significativamente entre regiões e até mesmo entre pilhas de rejeito de uma mesma mina. Essa variabilidade compromete a padronização dos procedimentos e dificulta o estabelecimento de parâmetros técnicos uniformes. Soma-se a isso o fato de que, no Brasil, ainda não há normas específicas que regulamentem o uso de rejeitos de mineração como agregado, o que gera insegurança regulatória e reduz o interesse de aplicação em projetos reais. Aspectos econômicos também representam obstáculos importantes, especialmente os custos envolvidos nas etapas de secagem, peneiramento e transporte, que podem inviabilizar o aproveitamento dependendo da distância e da logística necessária (ARAÚJO et al,2022).

Além dessas barreiras técnicas e normativas, existem lacunas científicas que reforçam a necessidade de novas pesquisas. Entre elas, destaca-se a ausência de estudos de durabilidade em longo prazo envolvendo rejeitos de cassiterita, a falta de padronização nos métodos de caracterização granulométrica e química dos rejeitos e a carência de análises ambientais integradas, como avaliações de ciclo de vida (ACV). Também são limitados os estudos que investigam a influência da variabilidade regional na qualidade dos produtos finais, bem como pesquisas que comparem rejeitos de diferentes origens em concretos e argamassas. Tais lacunas representam oportunidades importantes para aprofundar o conhecimento sobre o tema, contribuindo para uma aplicação mais segura, eficiente e alinhada às práticas de sustentabilidade e economia circular no setor mineral e na construção civil.

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS E ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

3.1.1 Insumos Utilizados

Os materiais empregados neste estudo incluíram cimento Portland CP V-ARI, areia natural de granulometria e brita nº 2 de origem granítica. Esses materiais foram caracterizados de acordo com as normas técnicas vigentes, conforme detalhado adiante.

3.1.2 Processamento e Origem Do Rejeito

O Rejeito de cassiterita utilizado nesta pesquisa foi coletado na Mina Fazendinha, em Rio Crespo-RO. Esse rejeito, proveniente do beneficiamento do minério de estanho, consiste em uma fração arenosa descartada após a separação gravimétrica da cassiterita. A figura 01 mostra o local de coleta do rejeito.

Figura 1 - Mina Fazendinha (Rio Crespo)



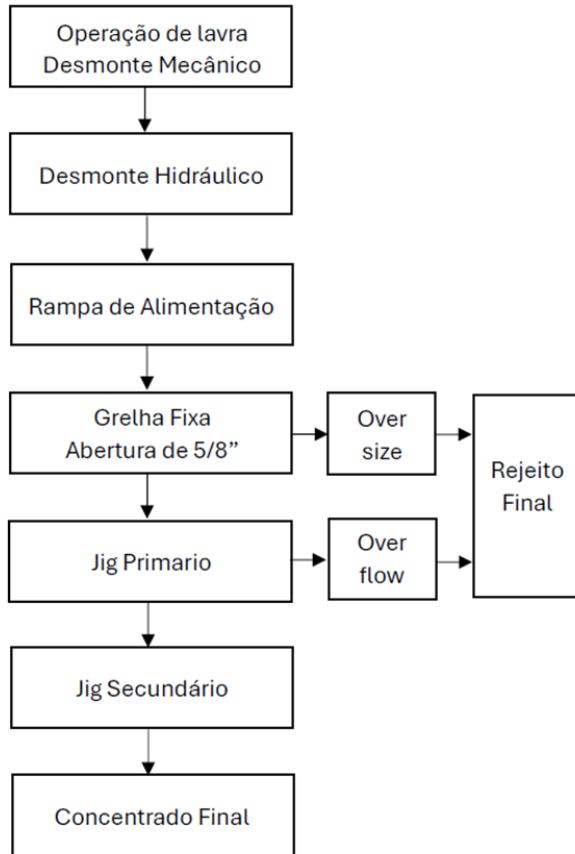
Fonte: Elaboração Própria (2025).

A cassiterita (SnO_2) é o minério-base para a obtenção do estanho, e seu beneficiamento é o processo que origina o resíduo que compõe o agregado alternativo. Este material é gerado após a exploração do minério, que é realizada por métodos de desmonte semi mecânico ou hidráulico, resultando em uma polpa mineralizada. O processo-chave na planta de beneficiamento é a concentração gravimétrica, tipicamente por jigagem. Nesse estágio, a cassiterita, que é mais densa, é separada e encaminhada como concentrado, enquanto a fração leve e fina composta predominantemente por quartzo e outros silicatos é descartada como rejeito.

O material resultante é, portanto, caracteristicamente de granulometria fina, o que o classifica como um agregado miúdo e justifica sua qualificação como potencial substituto da areia natural na produção de concreto. Esse rejeito, submetido a um novo processo de lavagem, não apresenta mais viabilidade econômica para aproveitamento pelos garimpeiros, uma vez que a quantidade de cassiterita residual nessa fase do beneficiamento já não é suficiente para fins de comercialização. A

Figura 02 a seguir, ilustra o fluxograma simplificado do processo de beneficiamento, indicando o ponto exato de geração do rejeito.

Figura 2 - Fluxograma simplificado do processo de beneficiamento



Fonte: Elaboração própria (2025).

Considerando essa limitação, o material, que usualmente não recebe destinação produtiva, foi selecionado para investigação quanto ao seu potencial de aplicação na construção civil. Para isso, foram implementadas substituições parciais do agregado miúdo natural pelo rejeito de cassiterita nas proporções de 20%, 40% e 60%. Além disso, o material foi submetido a testes de caracterização em laboratório.

3.1.3 Ensaios Físicos De Caracterização

Para consolidar a caracterização dos materiais, a tabela 01 apresenta os ensaios realizados, bem como as normas técnicas correspondentes. Esses ensaios foram fundamentais para definir as dosagens e garantir a qualidade dos traços de concreto.

Tabela 1 - Ensaios realizados e normas técnicas aplicadas

MATERIAIS	DESCRÍÇÃO	ENSAIO	NORMA
Cimento CP V-ARI	Cimento de alta resistência inicial	-	-
Areia Natural (média)	Agregado miúdo natural (padrão)	Granulometria, Massa Unitária, Massa Específica	NBR 17054/2022; NBR 16972/2021; NBR 52/2009;
Rejeito de Cassiterita	Substituição parcial de areia (20%, 40%, 60%)	Granulometria, Massa Unitária, Massa Específica	NBR 17054/2022; NBR 16972/2021; NBR 52/2009;
Brita nº 2	Agregado graúdo granítico	Granulometria, Massa Unitária, Massa Específica	NBR 17054/2022; NBR 16972/2021; NBR 53/2009;

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Após a caracterização inicial, foram obtidos os resultados dos ensaios realizados em cada material. A Tabela 02 a seguir apresenta de forma consolidada os valores de granulometria, massa específica e massa unitária para a areia, brita, rejeito de cassiterita e as diferentes proporções de substituição.

Material	Granulometria (módulo de finura)	Massa Específica	Massa Unitária
Areia	2,36	2,778 g/cm ³	1,51 kg/dm ³
Brita nº 2	6,66	2,611 g/cm ³	1,45 kg/dm ³
Rejeito de Cassiterita	2,02	2,633 g/cm ³	1,39 kg/dm ³
Mistura 20%	2,11	2,775 g/cm ³	1,53 kg/dm ³
Mistura 40%	2,06	2,646 g/cm ³	1,47 kg/dm ³
Mistura 60%	2,08	2,640 g/cm ³	1,46 kg/dm ³

Tabela 2 - Resultados dos ensaios

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Como esses resultados foi possível avaliar as propriedades físicas dos materiais e definir os parâmetros para a composição dos traços de concreto, garantindo a consistência e o desempenho desejado nas misturas.

3.1.4 Análise Mineralógica Por Difração De Raios X (DRX)

A análise mineralógica do rejeito de cassiterita foi realizada por difração de raios X (DRX), conduzida pela equipe da White Solder. Esse ensaio identifica os minerais presentes no material e auxilia na interpretação de seu comportamento no concreto. Os resultados são apresentados a seguir na tabela 03.

Tabela 3 - Resultados análise raio-x

Nº	Fórmula	Nome químico	Elemento principal	Resultados	Nome comum / tipo de óxido
1	MgO	Óxido de magnésio	Magnésio	1.0164	Presente em dolomita e magnesita
2	Al2O3	Óxido de alumínio	Alumínio	18.1846	Também chamado alumina
3	SiO2	Dióxido de silício	Silício	54.2866	Sílica (areia e quartzo)
4	P2O5	Pentóxido de fósforo	Fósforo	<0.0001	Usado em fertilizantes
5	SO3	Trióxido de enxofre	Enxofre	0.7068	Componente de sulfatos
6	K2O	Óxido de potássio	Potássio	6.6268	Presente em feldspatos
7	CaO	Óxido de cálcio	Cálcio	6.743	Cal viva
8	Sc2O3	Óxido de escândio	Escândio	<0.0001	Elemento raro
9	TiO2	Dióxido de titânio	Titânio	1.2048	Pigmento branco (rutilo)
10	V2O5	Pentóxido de vanádio	Vanádio	0.0865	Usado em ligas metálicas
11	Cr2O3	Óxido de cromo(III)	Cromo	0.0252	Pigmento verde, resistente
12	MnO	Óxido de manganês(II)	Manganês	0.1905	Minérios de manganês
13	Fe2O3	Óxido de ferro(III)	Ferro	14.6408	Hematita, ferrugem
14	Co2O3	Óxido de cobalto(III)	Cobalto	0.0088	Pigmento azul
15	CuO	Óxido de cobre(II)	Cobre	0.0061	Mineral tenorita
16	NiO	Óxido de níquel	Níquel	0.0149	Usado em baterias
17	ZnO	Óxido de zinco	Zinco	0.0417	Usado em cerâmicas e cosméticos
18	Ga2O3	Óxido de gálio	Gálio	0.0039	Semicondutor
19	As2O3	Trióxido de arsênio	Arsênio	<0.0001	Tóxico, subproduto de minérios
20	Rb2O	Óxido de rubídio	Rubídio	0.1351	Elemento raro
21	SrO	Óxido de estrôncio	Estrôncio	0.0114	Usado em pirotecnia
22	Y2O3	Óxido de ítrio	Ítrio	0.0380	Usado em LEDs e cerâmicas
23	ZrO2	Óxido de zircônio	Zircônio	1.4846	Zircônia, cerâmica resistente
24	Nb2O5	Pentóxido de nióbio	Nióbio	0.1358	Usado em ligas metálicas
25	SnO2	Dióxido de estanho	Estanho	0.1067	Cassiterita (minério de Sn)
26	BaO	Óxido de bário	Bário	0.1797	Usado em vidros e cerâmicas
27	Ta2O5	Pentóxido de tântalo	Tântalo	0.0814	Usado em eletrônicos
28	ReO2	Dióxido de rênio	Rênio	0.0127	Elemento raro
29	Ir2O3	Óxido de irídio	Irídio	0.0033	Metal nobre
30	PtO2	Dióxido de platina	Platina	0.0035	Catalisadores
31	Au2O	Óxido de ouro	Ouro	0.0048	Raro, instável
32	PbO	Óxido de chumbo(II)	Chumbo	0.0110	Usado em vidros e cerâmicas

33	Bi2O3	Óxido de bismuto	Bismuto	0.0019	Usado em materiais eletrônicos
34	CeO2	Dióxido de cério	Cério	0.0716	Usado em catalisadores e polimento

Fonte: Elaboração Própria (2025).

A análise química do rejeito mostrou predomínio de SiO_2 (54,37%), seguido por Al_2O_3 (18,18%) e Fe_2O_3 (14,64%), confirmando sua natureza silicosa e semelhante à areia natural. Pequenas quantidades de minerais pesados, como TiO_2 , Nb_2O_5 e ZrO_2 , também foram identificadas, contribuindo para a maior densidade do material e influenciando a demanda de água e a porosidade nos traços com maiores teores de substituição.

3.2 DOSAGEM E PLANEJAMENTO DOS TRAÇOS EXPERIMENTAIS

A dosagem dos materiais foi definida a partir de um traço de referência e dos traços experimentais com substituição parcial do agregado miúdo. As quantidades de cada componente foram calculadas com base nos resultados de massa específica e massa unitária da areia, rejeito e brita, permitindo converter corretamente os volumes para massa.

O traço de referência adotado foi 1:2:3, com relação água/cimento de 0,55, fundamentado em (Silva,2019), servindo como base comparativa. A partir dele, foram definidos os traços com substituição parcial da areia natural pelo rejeito de cassiterita nos teores de 20%, 40% e 60%, considerando a massa específica resultante da combinação entre areia e rejeito em cada proporção. A Tabela 04 apresenta as quantidades de insumos utilizados em cada traço.

Tabela 4 - Dosagem para os traços

TRAÇO	CIMENTO (KG)	BRITA (KG)	AREIA (KG)	REJEITO (KG)	ÁGUA
TRAÇO Ref.	9,40	28,20	18,80	0,00	6,03
TRAÇO 20%	9,40	28,19	15,03	3,76	6,03
TRAÇO 40%	9,28	27,84	11,14	7,42	6,11
TRAÇO 60%	9,28	27,84	7,42	11,14	6,11
TOTAL (Kg)	37,36	112,07	52,39	22,32	24,28
TOTAL (g)	37356,87	112070,60	52392,96	22320,78	24281,96

Fonte: Elaboração própria (2025).

No total, quatro traços foram estabelecidos. Para todos eles, foi prevista quantidade suficiente para moldar 15 corpos de prova cilíndricos por traço, garantindo volume adequado para os ensaios no estado endurecido.

3.3 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

A moldagem e a cura dos corpos de prova cilíndricos foram realizadas conforme a ABNT NBR 5738:2015. Antes da concretagem, os moldes foram preparados com uma fina camada de óleo

mineral e posicionados sobre base rígida e nivelada. Para cada traço, foram moldados 15 corpos de prova destinados aos ensaios no estado endurecido.

O concreto foi adensado manualmente em camadas de volumes semelhantes, utilizando a haste de adensamento para garantir a compactação adequada. Após o preenchimento, a superfície do concreto foi nivelada com régua metálica, concluindo a moldagem. A Figura 03 ilustra o procedimento de moldagem e cura adotado.

Figura 3 - Moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos de concreto



Fonte: Elaboração Própria (2025).

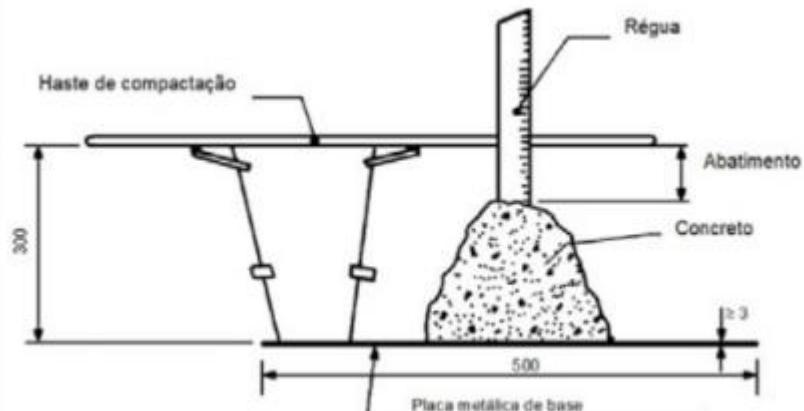
Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram nos moldes durante a cura inicial, protegidos contra a perda de umidade. Em seguida, foram desmoldados e colocados em caixa de água saturada com cal, onde permaneceram até as idades de ensaio definidas.

3.4 ENSAIO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO – ABATIMENTO DO CONCRETO

A trabalhabilidade do concreto no estado fresco é um fator importante para garantir um bom lançamento, adensamento e acabamento da mistura. Quando o abatimento é muito baixo, o concreto fica seco e difícil de acomodar nas formas; já valores muito altos deixam a mistura mais fluida do que o ideal, podendo causar segregação e exsudação. Por isso, avaliar essa consistência é fundamental para manter a homogeneidade e evitar problemas futuros na estrutura.

O ensaio de abatimento do tronco de cone foi realizado seguindo a NBR 16889 (ABNT, 2020). O molde metálico tronco-cônico foi preenchido em três camadas iguais, cada uma adensada com 25 golpes de haste, conforme o procedimento padrão. Depois de nivelar a superfície, o molde foi levantado verticalmente e mediu-se imediatamente o abatimento do concreto em centímetros. Na figura 04 é demonstrado o ensaio de abatimento do tronco de cone.

Figura 4 - Modelo de ensaio de abatimento do tronco de cone



Fonte: NBR NM 16889 (ABNT, 2020).

Esse procedimento foi realizado para todos os traços, tanto para o concreto de referência quanto para aqueles com substituição parcial da areia pelo rejeito. Assim, foi possível comparar a consistência entre as misturas e observar como cada proporção se comportou no estado fresco.

3.5 ENSAIO DE CAPILARIDADE

A absorção de água por capilaridade foi determinada conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012). Corpos de prova cilíndricos (10×20 cm), após 28 dias de cura, foram secos em estufa a $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ até a massa constante e, posteriormente, resfriados em dessecador. Em seguida, cada corpo de prova foi apoiado sobre suporte rígido, mantendo contato com uma lâmina d'água de 5 mm apenas pela face inferior. A Figura 05 apresenta o procedimento adotado no ensaio.

Figura 5 - Corpo de prova em ensaio



Fonte: Elaboração Própria (2025).

As pesagens foram realizadas nos tempos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas, registrando o ganho de massa para calcular a absorção por capilaridade. A relação entre o aumento de massa e a raiz quadrada do tempo permitiu determinar o coeficiente de capilaridade, conforme estabelecido pela norma. A absorção por capilaridade de cada tempo foi calculada conforme a equação 2, onde é expressa em g/cm^2 .

$$C = \frac{A - B}{S}$$

Onde:

C: absorção de água por capilaridade (g/cm^2);

A: massa do CP úmido (g);

B: massa do CP seco em estufa (g);

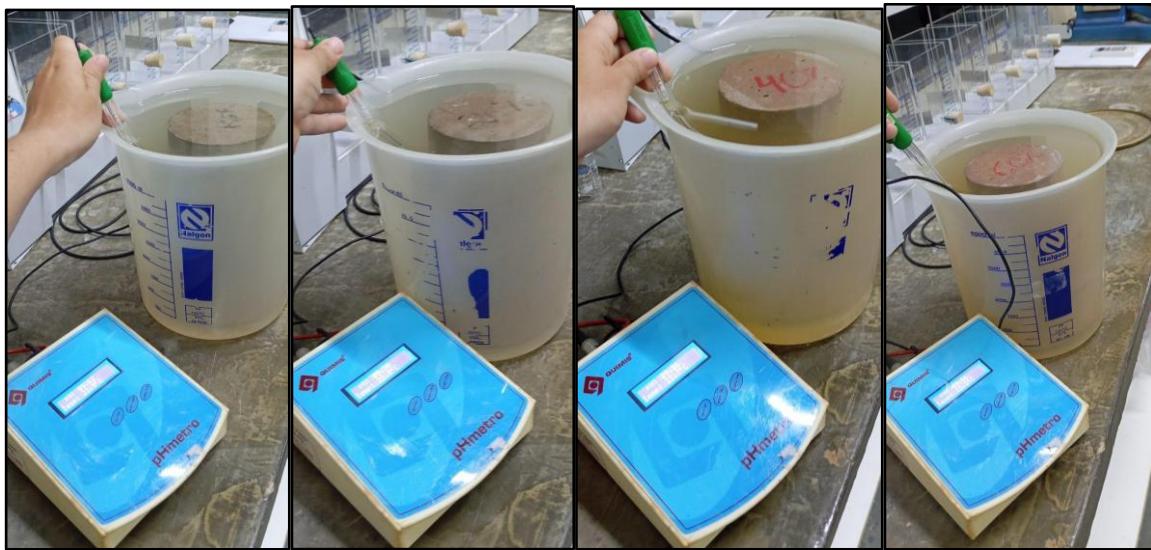
S: área da seção transversal do CP (cm^2);

3.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À AÇÃO DE SULFATOS SÓDIO

A avaliação da durabilidade do concreto frente à agressão por sulfato foi conduzida utilizando o método de agressão por imersão em solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4), procedimento que se baseou na metodologia estabelecida na dissertação de Da Silva Filho (1994). Este ensaio visa simular condições de exposição agressivas, avaliando o desempenho dos concretos com rejeito de cassiterita.

Os corpos de prova foram imersos em uma solução aquosa de 5% de sulfato de sódio diluído em água potável por um período de 28 dias, garantindo a submersão contínua em caixas apropriadas. O controle da agressividade da solução foi mantido por meio do monitoramento contínuo do pH, utilizando um pHmetro digital. Conforme a metodologia de Da Silva Filho (1994), o pH da solução foi mantido na faixa entre 8 e 9. Na figura 06 é demonstrado a medição do pH com o pHmetro.

Figura 6 - Medição de pH



Fonte: Elaboração Própria (2025).

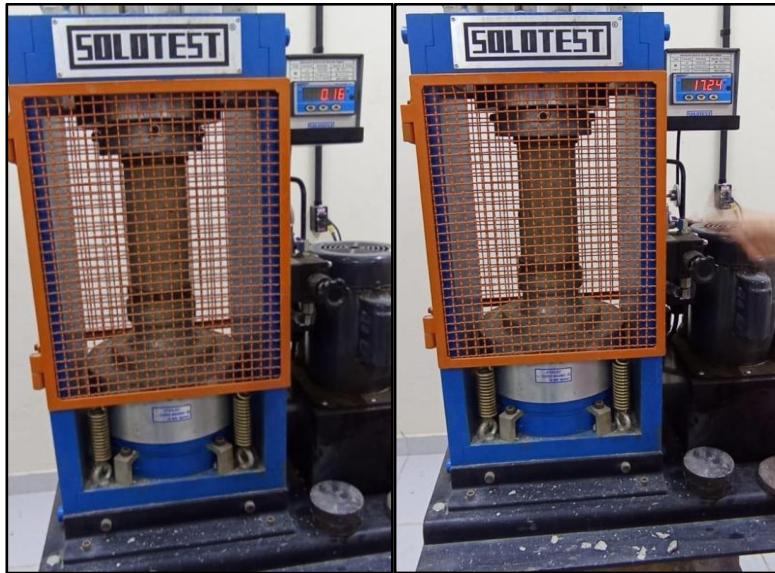
Para a avaliação do desempenho, foram utilizados três corpos de prova cilíndricos para cada traço. Ao final do período total de 28 dias, as amostras foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão (ABNT NBR 5739). O ensaio foi complementado pela avaliação visual dos corpos de prova, com o registro de possíveis deteriorações, oxidação ou degradação superficial, para uma análise completa do impacto da agressão química.

3.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão axial foi conduzido conforme a NBR 5739 (ABNT 2018), utilizando corpos de prova moldados de acordo com a NBR 5738 (ABNT 2015). Foram confeccionados cilindros de 10×20 cm para todos os traços estudados, seguindo o procedimento normativo de moldagem em camadas e adensamento com golpes de haste metálica. Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram em câmara úmida a $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ até as idades de ensaio.

As rupturas foram realizadas em prensa hidráulica com aplicação contínua de carga até a falha completa. As idades avaliadas foram de 7, 14, 21 e 28 dias, utilizando três corpos de prova por idade e por traço, sendo o valor final obtido pela média das resistências individuais. A Figura 07 apresenta o procedimento de ruptura adotado.

Figura 7 - Ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Elaboração Própria (2025).

Esse ensaio permitiu avaliar o efeito da substituição parcial da areia natural pelo rejeito de cassiterita no desempenho mecânico do concreto ao longo do tempo.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais e do concreto produzido, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A análise é realizada à luz das normas técnicas vigentes e de referências da literatura, visando avaliar a viabilidade da utilização do rejeito de cassiterita como substituição parcial do agregado miúdo.

4.1 ENSAIO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO – ABATIMENTO DO CONCRETO

O ensaio de abatimento do tronco de cone foi conduzido conforme a ABNT NBR 16889:2020. Os resultados, detalhados na Tabela 05, indicaram uma redução progressiva da consistência à medida que a porcentagem de rejeito de cassiterita aumenta obtendo-se valores de 12 cm para o traço de referência, 10,12 cm para o traço com 20% de rejeito, 4,5 cm para o traço com 40% e 2,5 cm para o traço com 60% de rejeito. Observou-se uma redução progressiva da consistência à medida que aumentava a substituição da areia natural pelo rejeito de cassiterita. Essa tendência pode ser atribuída à maior absorção de água e à textura mais áspera das partículas do rejeito, que exigem maior quantidade de água de amassamento para manter a mesma mobilidade da mistura.

Tabela 5 - Resultados redução progressiva da consistência

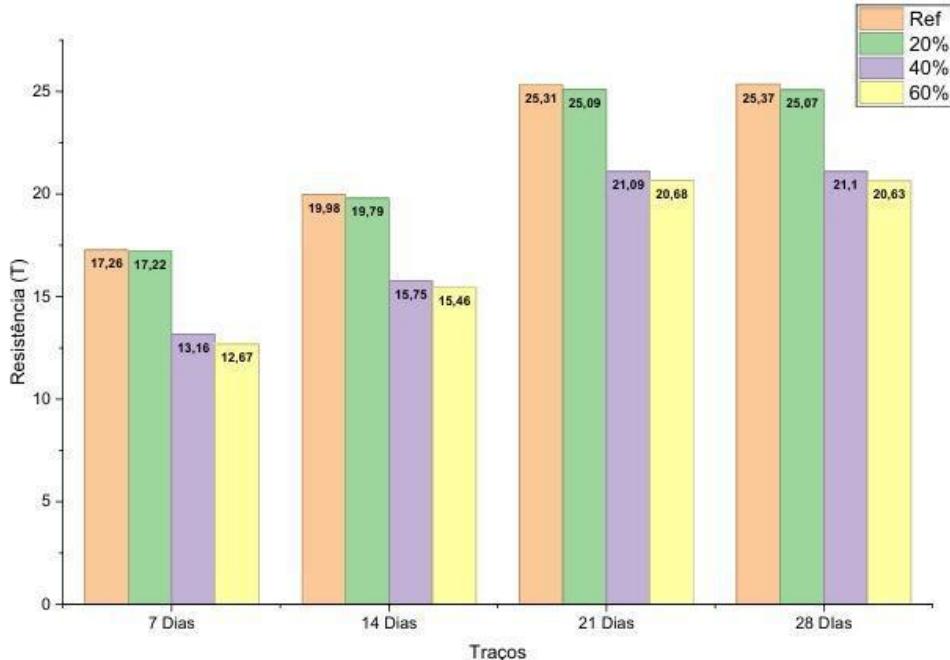
Traço	Abatimento
Ref.	12,00 cm
20%	10,12 cm
40%	4,50 cm
60%	2,50 cm

Fonte: Elaboração própria (2025)

4.2 ENSAIO A COMPRESSÃO

A avaliação da resistência à compressão se mostrou crucial para determinar o limite de substituição do agregado miúdo natural pelo rejeito de cassiterita. O desempenho mecânico dos concretos foi analisado nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias, conforme apresentado no Gráfico 01.

Gráfico 1 - Desempenho mecânico dos concretos



Fonte: Elaboração Própria (2025).

O concreto de referência (Ref), que não continha rejeito, atingiu 25,37 MPa aos 28 dias, servindo como padrão de desempenho para a avaliação. O traço com 20% de substituição apresentou resultados notavelmente próximos aos do concreto de referência, confirmando a viabilidade do aproveitamento do rejeito nessa proporção. A resistência final aos 28 dias foi de 25,07 MPa. A diferença percentual entre o traço de 20% e o de referência foi de apenas 1,18%, um desvio considerado insignificante em termos de engenharia estrutural. Este resultado indica que a incorporação do rejeito de cassiterita a 20% mantém o desempenho mecânico do concreto em um nível totalmente aceitável, não comprometendo a segurança ou a durabilidade exigida para fins construtivos.

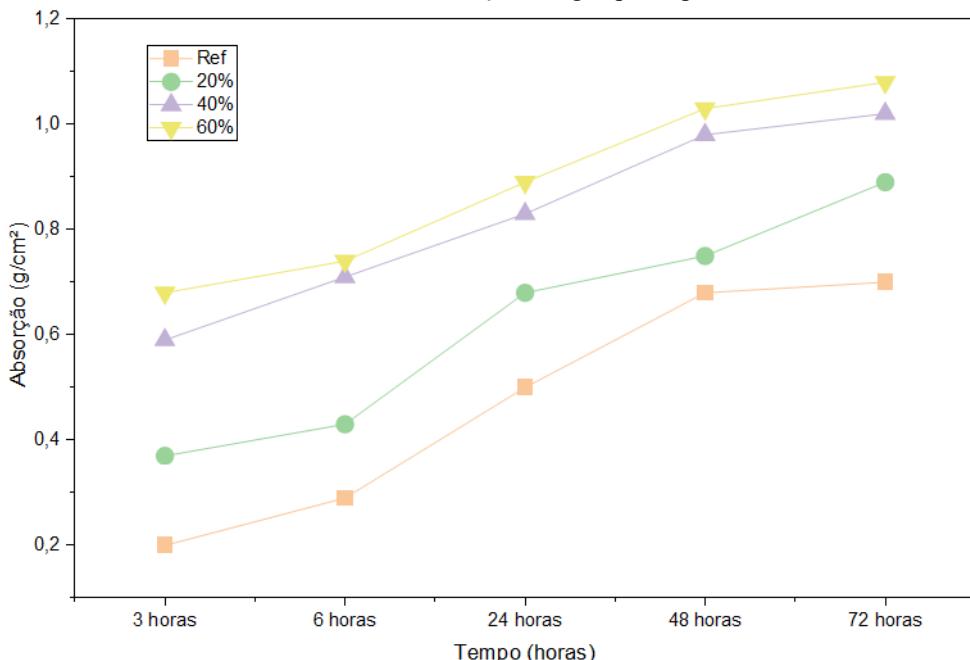
Em contrapartida, as proporções de 40% e 60% de rejeito de cassiterita provocaram uma redução maior. Aos 28 dias, os traços de 40% e 60% alcançaram, respectivamente, 21,1 MPa e 20,63 MPa. Essas resistências representam quedas de, aproximadamente, 16,87% e 18,76% em comparação com o traço de referência.

Esta redução de desempenho é diretamente atribuída à característica do rejeito em sua interação com a água. A presença de fração argilosa ou material pulverulento na composição do rejeito confere à mistura uma característica argilosa quando em altas proporções. Essa condição causa um aumento expressivo da demanda de água para manter a trabalhabilidade mínima, o que eleva a relação água/cimento (a/c) efetiva do concreto. O aumento da a/c efetiva, por sua vez, fragiliza a matriz cimentícia, gerando maior porosidade e comprometendo a resistência à compressão final do material.

4.3 ENSAIO POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado para avaliar a capacidade dos concretos de resistir à penetração de água por succção, um mecanismo chave de transporte de agentes agressivos no concreto. Os resultados obtidos aos 28 dias estão apresentados nos Gráficos 02.

Gráfico 2 - Absorção de água por capilaridade



Fonte: Elaboração própria (2025).

Conforme o Gráfico 01, observa-se que o aumento do teor de rejeito resultou em um crescimento direto e progressivo da absorção aos 28 dias. O padrão é claro: quanto maior a substituição de agregado natural pelo rejeito de cassiterita, maior a quantidade de água absorvida. O traço de referência demonstrou o melhor desempenho, com absorção de 0,70 g/cm² às 72 horas. Em

contraste, o traço com 20% de substituição apresentou 0,89 g/cm², enquanto os traços com maiores teores atingiram 1,02 g/cm² (40%) e 1,08 g/cm² (60%).

Para complementar a avaliação de desempenho aos 28 dias, a classificação dos concretos foi realizada conforme os critérios de durabilidade propostos por (Helene,1993). Na tabela 06 mostra o critério que a mesma utilizou.

Tabela 6 –
concretos

Classificação	Porosidade	Absorção de Água
Concretos duráveis	< 10%	<4,2%
Concretos normal	Entre 10% e 15%	Entre 4,2% e 6,3%
Concretos deficientes	> 15%	>6,3%

Classificação dos

Fonte: Helene,1993.

Os resultados da absorção total em percentual foram obtidos a partir dos dados de massa dos corpos de prova saturados e secos, e as respectivas porcentagens estão detalhadas na Tabela 07.

Tabela 7

Resultado da absorção total	Traço	Peso médio (g)	Absorção (g/cm ²)	Absorção (%)
Referência		3460	0,7	2,02
20% Rejeito		3360	0,89	2,64
40% Rejeito		3390	1,02	3,00
60% Rejeito		3355	1,08	3,21

Fonte:Elaboração própria (2025).

Conforme os valores presentes na Tabela 07, e aplicando-se os critérios de classificação de (Helene,1993) na tabela 06, que define concretos duráveis como aqueles com absorção de água total menor que 4,2%, todos os traços experimentais se enquadram na categoria de concretos duráveis, uma vez que os valores de absorção em percentual ficaram abaixo desse limite.

Ao final do ensaio de capilaridade, os corpos de prova foram submetidos à ruptura. Este procedimento foi realizado com o intuito de inspecionar visualmente as alturas de penetração alcançadas pela frente de água na seção transversal dos corpos de prova. Ao analisar a Figura 08, o resultado foi que as alturas de penetração não foram significativas. Isso está em plena consonância com os baixos valores de absorção total, indicando que a saturação de água na matriz cimentícia permaneceu em um nível controlado.

Figura 8 - Resultado absorção total



Fonte: Elaboração Própria (2025).

4.4 AÇÃO DE SULFATO

O ensaio de durabilidade por imersão em solução de sulfato de sódio, com exposição de 28 dias, foi realizado para analisar a resistência à compressão após a agressão química, baseando-se na metodologia (Filho, 1994). Os resultados deste ensaio, combinados com a avaliação visual e o monitoramento do pH, foram cruciais para a análise da longevidade dos concretos com rejeito de cassiterita.

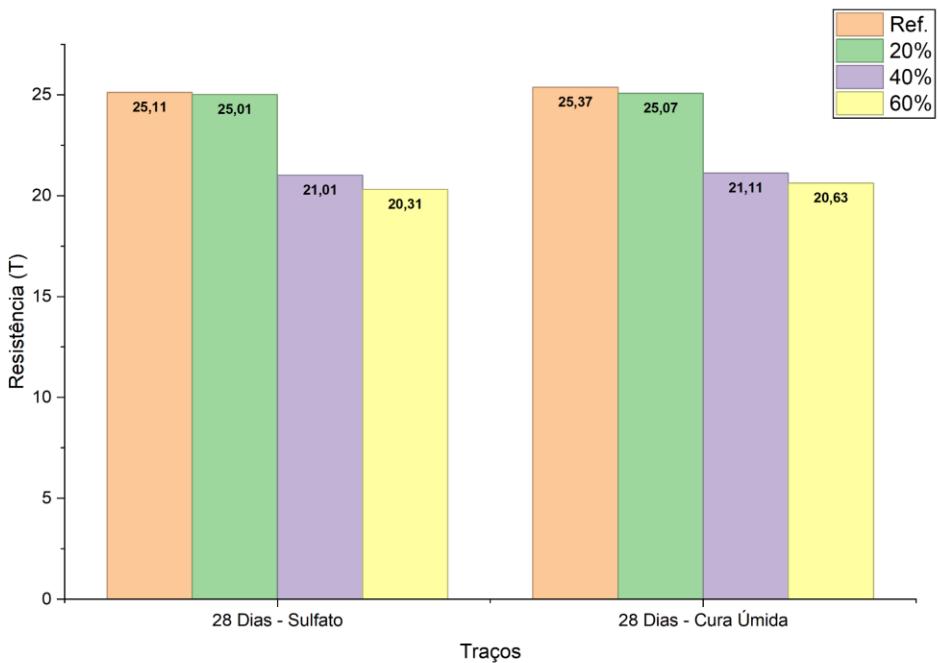
Durante o período de exposição, o pH da solução de sulfato foi mantido na faixa entre 8 e 9, sendo registrado um pH estável entre 9,2 e 9,43, o que confirma um meio alcalino. O impacto da agressão química na resistência à compressão final (ABNT NBR 5739) confirmou o padrão de desempenho. A Tabela 08 e o Gráfico 03 abaixo demonstram a comparação das resistências dos corpos de prova expostos ao sulfato com aqueles mantidos em cura úmida contínua.

Tabela 8

de à (T)	Traço	Resis. 28d - Sulfato	Resis. 28d - Cura Úmida	Diferença em %	Comparação resistências compressão
	Referência	25,10	25,37	1,05%	
	20% de Rej.	25,00	25,07	0,27%	
	40% de Rej.	21,01	21,10	0,43%	
	60% de Rej.	20,30	20,63	1,62%	

Fonte: Elaboração própria (2025).

Gráfico 3 – Comparação de resistências à compressão (T)



Fonte: Elaboração própria (2025).

A análise da resistência após a agressão por sulfato mostrou que todos os traços apresentaram redução de resistência em relação aos corpos de prova mantidos em cura úmida, indicando que o ataque químico provocou algum nível de deterioração da matriz cimentícia. Entre as misturas avaliadas, o traço com 20% de rejeito apresentou o comportamento mais estável, mantendo valores mais próximos do traço de referência. Contudo, é importante destacar que não foi realizada análise estatística para determinar se as diferenças observadas são significativas. Da mesma forma, o período de exposição ao sulfato foi relativamente curto, o que limita conclusões mais profundas sobre o desempenho em longo prazo.

Os traços com 40% e 60% registraram as maiores reduções de resistência, porém, devido à ausência de análises estatísticas e ao tempo reduzido de ensaio, esses resultados devem ser interpretados com cautela. É necessário realizar estudos complementares, com maior período de exposição e avaliações adicionais, para verificar se essas quedas realmente comprometem a viabilidade dos traços com maiores teores de rejeito.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo avaliou a viabilidade de aproveitamento do rejeito de cassiterita, subproduto da mineração na região de Rio Crespo (RO), como substituto parcial do agregado miúdo natural na produção de concreto. Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização, desempenho mecânico e durabilidade indicam que o resíduo possui potencial de aplicação na construção civil, desde que respeitados limites adequados de substituição.

A proporção de 20% mostrou-se a mais promissora, mantendo o desempenho mecânico em níveis equivalentes ao traço de referência, com redução de apenas 1,18% na resistência à compressão aos 28 dias. Esse comportamento confirma que pequenas substituições podem ser incorporadas sem prejuízo relevante às propriedades estruturais do concreto.

Por outro lado, os teores de 40% e 60% apresentaram reduções mais acentuadas nos resultados mecânicos, possivelmente relacionadas ao aumento da demanda de água e à maior porosidade observada nas misturas. No entanto, como não foi realizada análise estatística para comparação entre os traços, não se pode afirmar a significância dessas diferenças de forma conclusiva. Assim, os resultados devem ser interpretados como indícios de tendência, reforçando a necessidade de estudos mais aprofundados.

Ainda assim, a avaliação de durabilidade baseada na classificação de Helene (1993) indicou que todos os traços foram considerados duráveis, embora os teores mais elevados de rejeito tenham apresentado maior absorção de água, fator que demanda atenção em estruturas sujeitas à exposição prolongada.

De modo geral, o estudo demonstra que o rejeito de cassiterita — um material que já não possui viabilidade econômica para reprocessamento no garimpo e que representa um passivo ambiental crescente — pode ser transformado em um recurso útil para a construção civil. A substituição de 20% contribui para a redução do passivo gerado pela atividade mineradora e oferece uma alternativa sustentável e tecnicamente viável para a região de Rondônia.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação do comportamento desse rejeito em concretos de maior resistência, a avaliação do efeito de aditivos superplastificantes para mitigar a perda de trabalhabilidade nos teores mais altos de substituição e a ampliação do estudo para rejeitos com diferentes composições mineralógicas e granulométricas, possibilitando identificar novas oportunidades de reaproveitamento de resíduos provenientes da atividade mineradora.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Análise de Impacto Regulatório – Aproveitamento de Estéril e Rejeitos da Mineração.** Brasília, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/governanca-regulatoria/analise-de-impacto-regulatorios-air/air-realizados/air_aproveitamento-de-esteril-rejeitos_02-2.pdf

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Sumário Mineral Brasileiro 2018 – Estanho.** Brasília: ANM, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral-brasileiro-2018-/estanho>

ARAÚJO, F. S. M.; TABORDA-LLANO, I.; NUNES, E. B.; SANTOS, R. M. **A comprehensive review on mine tailings as a raw material in the alkali activation process.** Applied Sciences, v. 14, n. 12, p. 5127, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/12/5127>

ARAÚJO, F. S. M.; TABORDA-LLANO, I.; NUNES, E. B.; SANTOS, R. M. **Recycling and reuse of mine tailings: a review of advancements and their implications.** Geosciences, v. 12, n. 9, art. 319, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/geosciences12090319>

ARBILI, M. M.; ALQURASHI, M.; MAJDI, A.; AHMAD, J.; DEIFALLA, A. F. **Concrete made with iron ore tailings as a fine aggregate: a step towards sustainable concrete.** Materials, v. 15, n. 18, p. 6236, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15186236>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16889:2020 — Concreto fresco – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16972:2021 — Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 17054:2022 — Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738:2015 — Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211:2009 — Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9779:2012 — Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52:2009 — Agregado miúdo – Determinação da massa específica e da absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

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

COSTA, C. N. **Resíduos na construção civil: aproveitamento em materiais alternativos.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/items/cb3ec38b-6546-474f-a6df-bc2a2477a770>

EL MACHI, A.; EL AMRANI, A.; EL AMRANI, I.; et al. **Recycling of mining wastes in the concrete industry: a review.** Buildings, v. 14, n. 5, e1508, 2024. Disponível em: <https://orbit.dtu.dk/files/367161633/buildings-14-01508.pdf>

FANG, Y.; QIAO, L.; HU, T.; et al. **Characteristics of Iron Ore Tailings Sand and Properties of Iron Ore Tailings Sand Concrete: A Review.** International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 19, 2025. Disponível em: <https://ijcsm.springeropen.com/articles/10.1186/s40069-025-00784-2>.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 1993. Tese (Livre-docência em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000738379>

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações e análises da economia mineral brasileira.** Brasília, IBRAM, 2016. Disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes>.

LAGE, F. L.; SOUZA, D. R.; ALMEIDA, F. M.; MELO, R. P. **Utilização dos rejeitos de minério de ferro na construção civil.** 2020. Revista Research, Society and Development, v. 9, n. 8, p. 1-15. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/download/2871/2252/12325>

LI, H.; CHEN, Z.; LI, X.; et al. **Basic characteristics and environmental impact of iron ore tailings:** Frontiers in Earth Science, v. 11, Art. 1181984, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2023.1181984/full>.

MARTINS, N. P.; HAGEMANN, S. G.; CHEN, W.; CHEN, L. **Exploring the potential for utilization of medium and highly sulfidic tailings as a raw material in construction products.** Sustainability, v. 13, n. 21, p. 12150, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/21/12150>

ROTTA, L. H. S.; ALMEIDA, C. M.; MENDES, V. R.; et al. **The 2019 Brumadinho tailings dam collapse (Brazil): Analysis and implications.** Journal of Hazardous Materials, v. 402, p. 123–891, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243420300192>

SILVA, R. M. R.; NUNES, R. M.; et al. **Aproveitamento do rejeito de minério de ferro da Mina do Andrade para a confecção de blocos intertravados:** Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 20, e2660, 2023. Disponível em: <https://tecnologiammm.com.br/article/10.4322/2176-1523.20222660/pdf/tmm-20-e2660.pdf>

SILVA, V. R.; OLIVEIRA, C. A. S. **Avaliação da utilização de rejeitos de minério de ferro na formulação de concretos para pavimentos rígidos.** Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica

– RTIC, Itajubá, v. 1, n. 1, 2020. Disponível em:
<https://periodicos.unifei.edu.br/index.php/rtic/article/download/37/35/87>

SIMONSEN, A. M. T.; SOLISMAA, S.; HANSEN, H. K.; JENSEN, P. E. **Evaluation of mine tailings' potential as supplementary cementitious materials based on chemical, mineralogical and physical characteristics**: Waste Management, v. 102, p. 710–721, 2019.
Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.037>

ANEXO A - DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO DE PLÁGIO



DISCENTE: Bruna Barbosa da Silva

CURSO: Engenharia Civil

DATA DE ANÁLISE: 24.11.2025

RESULTADO DA ANÁLISE

Estatísticas

Suspeitas na Internet: **0,26%**

Percentual do texto com expressões localizadas na internet 

Suspeitas confirmadas: **0,09%**

Confirmada existência dos trechos suspeitos nos endereços encontrados 

Texto analisado: **82,62%**

Percentual do texto efetivamente analisado (frases curtas, caracteres especiais, texto quebrado não são analisados).

Sucesso da análise: **100%**

Percentual das pesquisas com sucesso, indica a qualidade da análise, quanto maior, melhor.

Analizado por Plagius - Detector de Plágio 2.9.6
segunda-feira, 24 de novembro de 2025

PARECER FINAL

Declaro para devidos fins, que o trabalho da discente BRUNA BARBOSA DA SILVA n. de matrícula **44037**, do curso de Engenharia Civil, foi aprovado na verificação de plágio, com porcentagem conferida 0,26%. Devendo a aluna realizar as correções necessárias.

Assinado digitalmente por: ISABELLE DA SILVA SOUZA
Razão: Responsável pelo documento
Localização: UNIFAEAMA - Ariqueme/RO
O tempo: 24-11-2025 14:21:17

ISABELLE DA SILVA SOUZA
Bibliotecária CRB 1148/11
Biblioteca Central Júlio Bordignon
Centro Universitário Faema – UNIFAEAMA