

Campus Porto Velho Calama
Coordenação do Curso Bacharel em Engenharia Civil

LUCAS GUASTOVARA DAVID

**REPROCESSAMENTO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE
ESTANHO: SÍNTESE DE CARACTERIZAÇÃO, CONCENTRAÇÃO MINERAL E
VALORIZAÇÃO**

PORTO VELHO
2025

LUCAS GUASTOVARA DAVID

**REPROCESSAMENTO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE
ESTANHO: SÍNTESE DE CARACTERIZAÇÃO, CONCENTRAÇÃO MINERAL E
VALORIZAÇÃO**

Monografia entregue como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), *Campus* Porto Velho Calama, como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel, junto ao Curso de Engenharia Civil, sob a orientação da professora Dra. Valéria Costa de Oliveira.

Porto Velho
2025

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Gerador de Ficha Catalográfica do IFRO.

David, Lucas Guastovara.

Reprocessamento de rejeitos de minério de estanho: síntese de caracterização, concentração mineral e valorização / Lucas Guastovara David. - Porto Velho, 2025.

48 f. : il.

Orientador(a): Prof^ª. Dra. Valeria Costa de Oliveira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO, Porto Velho, 2025.

1. Mineração. 2. Rejeitos de estanho. 3. Caracterização tecnológica. 4. Concentração gravimétrica. 5. Economia circular. I. Oliveira, Valeria Costa de (orient.). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO. III. Título.


Bibliotecário(a) Responsável: Miria Santana Veiga, CRB-11/898

LUCAS GUASTOVARA DAVID


**REPROCESSAMENTO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE
ESTANHO: SÍNTESE DE CARACTERIZAÇÃO, CONCENTRAÇÃO MINERAL E
VALORIZAÇÃO**

Monografia entregue como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), Campus Porto Velho Calama, como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel, junto ao Curso de Engenharia Civil, sob a orientação da professora Dr^a. Valéria Costa de Oliveira


Aprovado em: 03/12/2025 pela banca examinadora.

Documento assinado digitalmente
 VALERIA COSTA DE OLIVEIRA
Data: 17/12/2025 18:30:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr^a. Valéria Costa de Oliveira - IFRO (Orientadora)

Documento assinado digitalmente
 LIDIA BRUNA TELES GONZAGA
Data: 17/12/2025 18:00:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

M^a. Lidia Bruna Teles Gonzaga - IFRO (Examinadora interna)

Documento assinado digitalmente
 TALITA MENEZES MAIA
Data: 17/12/2025 10:55:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Esp. Talita Menezes Maia - IFRO (Examinadora interna)

Dedico este trabalho à minha persistência e à minha capacidade de funcionar sob pressão extrema sem perder a ternura (pelo menos, não totalmente).

*"I'ma keep running 'cause a winner don't
quit on themselves." Beyoncé, na música
Freedom.*

AGRADECIMENTOS

AOS MEUS PAIS, VANESSA E IVO , PELO AMOR INCONDICIONAL, PELO INCENTIVO CONSTANTE E POR TODOS OS SACRIFÍCIOS FEITOS PARA QUE EU PUDESSE ME DEDICAR AOS ESTUDOS. VOCÊS SÃO A BASE DE TUDO O QUE CONQUISTEI.

AO INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE RONDÔNIA (IFRO) – CAMPUS PORTO VELHO CALAMA , E A TODO O CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL, PELOS CONHECIMENTOS COMPARTILHADOS E PELA INFRAESTRUTURA QUE PERMITIU MEU DESENVOLVIMENTO PROFISSIONAL.

A TODOS QUE, DIRETA OU INDIRETAMENTE, CONTRIBUÍRAM PARA A REALIZAÇÃO DESTE TRABALHO E PARA O MEU CRESCIMENTO COMO SER HUMANO E FUTURO ENGENHEIRO.

RESUMO

A mineração de estanho na Província Estanífera de Rondônia, historicamente centralizada na operação do Garimpo Bom Futuro, gerou ao longo de décadas grandes volumes de rejeitos de minério que representam, simultaneamente, um passivo ambiental de risco e um recurso econômico estratégico subutilizado. Este trabalho avalia a viabilidade técnica e econômica do reprocessamento desses materiais por meio de uma revisão bibliográfica sistemática, abrangendo publicações de 1997 a 2025, com o objetivo central de correlacionar a caracterização tecnológica, a eficiência das técnicas de concentração mineral e as rotas de valorização alinhadas aos princípios da economia circular. A análise crítica da literatura revela que a eficiência do processo de recuperação é determinada fundamentalmente pela origem geológica do depósito: diferentemente dos rejeitos de minérios primários, que demandam etapas onerosas de moagem e flotação devido ao baixo grau de liberação e à complexidade mineralógica, os rejeitos de depósitos aluvionares de Rondônia beneficiam-se de um processo de pré-beneficiamento natural pelo intemperismo, apresentando um alto grau de liberação da cassiterita. Os resultados demonstram que rotas de concentração gravimétrica, utilizando equipamentos de baixo custo operacional como mesas vibratórias e jigues, apresentam alta performance para estes materiais, viabilizando a obtenção de concentrados comerciais. Além disso, a análise geoquímica mostra que a baixa concentração de contaminantes e a ausência de níveis críticos de radioatividade tornam os rejeitos de Bom Futuro mais seguros e competitivos em comparação com outros depósitos globais. Esse cenário geoquímico favorável viabiliza não só a recuperação de coprodutos de alto valor agregado, como nióbio, tântalo e zircão, mas também possibilita a aplicação segura do rejeito na construção civil e em novas tecnologias de armazenamento de energia, transformando efetivamente um passivo ambiental em um ativo sustentável.

Palavras-chave: Mineração. Rejeitos de estanho. Caracterização tecnológica. Concentração gravimétrica. Economia circular.

ABSTRACT

Tin mining in the Rondônia Tin Province, historically centralized in the Bom Futuro Mine operation, has generated large volumes of ore tailings over decades. These tailings simultaneously represent a risky environmental liability and an underutilized strategic economic resource. This study evaluates the technical and economic feasibility of reprocessing these materials through a systematic bibliographic review, covering publications from 1997 to 2025, with the central objective of correlating technological characterization, the efficiency of mineral concentration techniques, and valorization routes aligned with circular economy principles. Critical analysis of the literature reveals that the recovery process efficiency is fundamentally determined by the deposit's geological origin: unlike primary ore tailings, which require costly grinding and flotation stages due to a low degree of liberation and mineralogical complexity, tailings from Rondônia's alluvial deposits benefit from a natural pre-beneficiation process caused by weathering, presenting a high degree of cassiterite liberation. Results demonstrate that gravity concentration routes, utilizing low operational cost equipment such as shaking tables and jigs, present high performance for these materials, enabling the production of commercial concentrates. Furthermore, geochemical analysis shows that the low concentration of contaminants and the absence of critical radioactivity levels make Bom Futuro tailings safer and more competitive compared to other global deposits. This favorable geochemical scenario facilitates not only the recovery of high-value co-products, such as niobium, tantalum, and zircon, but also enables the safe application of tailings in civil construction and new energy storage technologies, effectively transforming an environmental liability into a sustainable asset.

Keywords: Mining. Tin tailings. Technological characterization. Gravity concentration. Circular economy.

LISTA DE FIGURAS

Quadro 4.1 – Quadro Comparativo de Estudos de Caracterização de Rejeitos de Cassiterita e Escória de Estanho.	31
Quadro 4.2 – Análise Comparativa de Performance de Técnicas de Concentração.	34
Figura 4.1 – Fluxograma Conceitual para Reprocessamento de Rejeitos de Estanho de Origem Aluvionar.	36
Quadro 4.3 – Síntese das Perspectivas de Valorização versus Limitações Técnicas e Ambientais dos Rejeitos de Estanho.	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
BDTD	Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
CC	Critério de Concentração
DRX	Difração de Raios X
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva (Energy Dispersive Spectroscopy)
ENTMME	Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa
FRX	Fluorescência de Raios-X
ICP-OES	Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index)
ROM	Run of Mine (Minério bruto não processado)
TENORM	Material Radioativo de Ocorrência Natural Tecnologicamente Aprimorado (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material)

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3	Alumina (Óxido de alumínio)
C_3S	Silicato tricálcico (Alita)
Fe_2O_3	Óxido de Ferro (Hematita)
SiO_2	Sílica (Quartzo)
SnO_2	Dióxido de Estanho (Cassiterita)
WO_3	Trióxido de Tungstênio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Justificativa	16
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivo geral	17
1.2.2. Objetivos específicos	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Geração e Contexto dos Rejeitos de Estanho em Rondônia	18
2.1.1. Depósitos Aluvionares e o "Pré-Beneficiamento" Natural	18
2.1.2. Ineficiências do Processamento Primário	19
2.2. A Centralidade da Caracterização Tecnológica	20
2.2.1. Caracterização Física, Química e Mineralógica	20
2.2.2. O Grau de Liberação	22
2.3. Tecnologias de Concentração Mineral para Rejeitos de Cassiterita	23
2.3.1. Concentração Gravimétrica	23
2.3.2. Flotação	24
2.3.3. Análise Comparativa de Rotas Tecnológicas	25
2.4. Rotas de Valorização no Contexto da Economia Circular	26
2.4.1. Recuperação de Coprodutos Minerais	26
2.4.2. Aplicação do Rejeito Final na Construção Civil	27
2.4.3. Estratégias para Recuperação Ambiental	29
3. METODOLOGIA	31
3.1. Abordagem da Pesquisa	31
3.2. Fontes de Dados e Estratégia de Busca	31
3.3. Critérios de Inclusão e Exclusão	31
3.4. Análise e Síntese dos Dados	32
4. RESULTADOS	33
4.1. Quadro-Síntese de Parâmetros de Caracterização de Rejeitos	33
4.2. Análise Crítica da Eficiência das Técnicas de Concentração	36
4.3. Fluxograma Conceitual para Reprocessamento de Rejeitos Aluvionares	38
4.4. Discussão Integrada das Rotas de Valorização	40
4.4.1. Recuperação de Cassiterita para Aplicações Tecnológicas Avançadas	41
4.4.2. Aplicação do Rejeito Final na Indústria da Construção Civil	42
4.4.3. Viabilidade Ambiental e Segurança Radiológica	43
4.4.4. Estratégias de Recuperação Ambiental	44
4.5. Limitações e Lacunas na Literatura Regional	44
5. CONCLUSÃO	46

1. INTRODUÇÃO

A mineração de estanho representa uma atividade de significativa importância estratégica para a matriz industrial e econômica do Brasil. O país se destaca entre as maiores potências minerais do mundo, com destaque para a Província Estanífera de Rondônia, que, segundo Santos *et al.* (2000), se consolida como uma das principais regiões produtoras de estanho em território nacional. O Garimpo Bom Futuro, localizado no município de Ariquemes-RO, serve como um epicentro contextual para este estudo, dada sua relevância histórica na produção de cassiterita e, conseqüentemente, a massiva geração de rejeitos ao longo de décadas de operação.

Contudo, a extração mineral, por sua natureza, gera um volume expressivo de resíduos. No caso do minério de estanho, a relação entre o minério beneficiado e o rejeito pode ser drasticamente desproporcional, com estimativas indicando que até 99,9% do material lavrado (ROM - Run of Mine) pode ser descartado como rejeito. Este cenário cria um problema central de dupla face: por um lado, os rejeitos constituem um passivo ambiental e um risco geotécnico considerável, uma preocupação que se intensificou no Brasil após os colapsos de barragens em Mariana e Brumadinho. Esses eventos resultaram em um endurecimento da legislação, como a Resolução ANM nº 95/2022, que proíbe a construção de novas barragens a montante e exige a descaracterização das existentes. Por outro lado, esses mesmos rejeitos representam um potencial ativo econômico subutilizado, um vasto depósito de minerais valiosos que não foram eficientemente recuperados nos processos de beneficiamento primário.

Neste contexto, o conceito de reprocessamento de rejeitos emerge como uma solução alinhada aos princípios da mineração sustentável e da economia circular. Esta abordagem transcende a visão tradicional de gestão de resíduos, propondo uma forma de mineração secundária que visa recuperar minerais valiosos remanescentes, como a cassiterita (*Sn*), e potenciais coprodutos de interesse econômico. A valorização desses materiais não apenas mitiga os impactos ambientais e os riscos associados ao seu armazenamento, mas também otimiza o uso de recursos já extraídos, aumentando a eficiência e a vida útil dos empreendimentos mineiros.

A viabilidade técnica e econômica do reprocessamento, no entanto, não é trivial e depende de uma profunda compreensão das características do rejeito e da aplicação de tecnologias de concentração adequadas. A complexa interação entre a mineralogia do rejeito,

o grau de liberação da cassiterita e a eficiência das rotas de processo disponíveis constitui o núcleo do desafio tecnológico. Diante do duplo cenário de risco ambiental e oportunidade econômica, surge a seguinte pergunta de pesquisa: Quais são os parâmetros técnicos e as rotas de processo mais viáveis para o reprocessamento dos rejeitos de cassiterita do Garimpo Bom Futuro, de modo a transformar um passivo ambiental em um ativo econômico de forma sustentável?

1.1. Justificativa

A realização deste projeto de pesquisa é justificada por sua relevância nos âmbitos econômico, ambiental, social e científico-tecnológico, oferecendo uma contribuição significativa para a busca de uma mineração mais sustentável e eficiente.

Do ponto de vista econômico, a principal justificativa reside na oportunidade de transformar um passivo de alto custo de manutenção e risco em um ativo gerador de receita. Os rejeitos de mineração de estanho não são estéreis; eles contêm teores residuais de cassiterita que, embora baixos, podem ser economicamente recuperáveis com a aplicação de tecnologia adequada, gerando uma nova fonte de renda e aumentando a recuperação metálica total do empreendimento.

No âmbito ambiental e social, a crescente pressão regulatória e social sobre a indústria da mineração, especialmente após os desastres de barragens no Brasil, torna imperativa a busca por soluções que minimizem os riscos associados ao armazenamento de rejeitos. O reprocessamento se apresenta como uma estratégia proativa e alinhada a essas exigências, pois reduz significativamente o volume de material a ser disposto, diminuindo a área necessária para barragens, mitigando os riscos geotécnicos e liberando áreas para projetos de recuperação ambiental. Adicionalmente, a valorização do rejeito final, já empobrecido em minerais pesados, como agregado para a construção civil, oferece uma destinação nobre e sustentável, ao mesmo tempo em que reduz a demanda pela extração de areia natural, uma atividade que também acarreta significativos impactos ambientais.

Na esfera científico-tecnológica, este trabalho contribui para a consolidação do conhecimento sobre o tratamento de rejeitos de cassiterita, um tema de crescente interesse global. Ao sistematizar e comparar diferentes rotas de processo com base em dados da literatura, a pesquisa visa preencher lacunas, identificar os parâmetros mais críticos para a viabilidade do reprocessamento e fornecer um referencial técnico que possa subsidiar futuros estudos de caso e projetos de implementação industrial na Província Estanífera de Rondônia.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Analisar as características físicas, químicas e mineralógicas dos rejeitos aluvionares de cassiterita na Província Estanífera de Rondônia para fundamentar a proposição de rotas de beneficiamento e estratégias de valorização econômica dos subprodutos.

1.2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos que norteiam este trabalho são:

- Analisar as metodologias de caracterização física, química e mineralógica de rejeitos de minério de estanho, com ênfase na importância do grau de liberação da cassiterita como parâmetro determinante para a viabilidade do reprocessamento.
- Comparar a eficiência de diferentes técnicas de concentração mineral (gravimétrica e flotação) e identificar os principais fatores de processo que influenciam a recuperação de cassiterita, com base em estudos de caso e dados da literatura.
- Sintetizar as rotas de valorização para os materiais resultantes do reprocessamento, abrangendo a recuperação de coprodutos, a aplicação do rejeito final na construção civil e as estratégias para recuperação ambiental.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se a fundamentação teórica sobre a mineração estanífera em Rondônia, os volumes de rejeitos gerados e o potencial de reprocessamento desses materiais, correlacionando a caracterização tecnológica, a eficiência das técnicas de concentração e os fatores de processo.

2.1. Origem e Formação dos Rejeitos de Estanho em Rondônia

A compreensão da origem e formação dos rejeitos de estanho em Rondônia é fundamental para orientar estratégias de reprocessamento. A seguir, são abordados dois aspectos principais: as características dos depósitos aluvionares e o processamento primário da mineração

2.1.1. Depósitos Aluvionares e o "Pré-Beneficiamento" Natural

Os depósitos de estanho explorados na Província Estanífera de Rondônia são classificados, em sua maioria, como secundários, especificamente do tipo aluvionar. Diferentemente dos depósitos primários, onde o mineral de interesse encontra-se incrustado na rocha matriz (geralmente granitos, pegmatitos ou greisens), os depósitos secundários são o resultado de longos processos geológicos de intemperismo e erosão que atuam sobre a rocha original, segundo Tavares e Barbosa (2016).

Segundo Silva (2018), a gênese desses depósitos na região está associada à alteração das rochas graníticas das Suítes Intrusivas de Rondônia. O clima tropical, caracterizado por altas temperaturas e pluviosidade intensa, favoreceu o intemperismo químico e físico profundo dessas rochas. Esse processo natural promove a desagregação dos minerais constituintes, liberando a cassiterita (SnO_2), que é extremamente resistente à alteração química e mecânica, da ganga silicática (feldspatos, micas) que é mais facilmente alterável e lixiviada.

Esse fenômeno é tecnicamente descrito na literatura como um pré-beneficiamento natural. A ação das águas pluviais e fluviais não apenas transporta o material, mas também realiza uma classificação hidrodinâmica. Devido à sua alta densidade (6,8 a 7,1 g/cm³), como apontado por Sampaio e Tavares (2005), a cassiterita tende a se concentrar nas partes inferiores dos canais de drenagem ou em "paleocanais" (antigos leitos de rios), enquanto os minerais mais leves (como argilas e quartzos finos) são carregados para longe.

Para a engenharia de minas, essa característica traduz-se em uma vantagem operacional decisiva. Peres (2020) destaca que, no Garimpo Bom Futuro, o minério, e conseqüentemente o rejeito gerado, apresenta-se como um material inconsolidado (areias, cascalhos e argilas), onde a cassiterita já se encontra fisicamente liberada (ou "livre") da ganga. Vale ressaltar que ganga é o termo utilizado para designar o mineral ou conjunto de minerais presentes no minério que não são aproveitados no processo, conforme definido por Sampaio *et al.* (2007). Isso elimina a necessidade das etapas de britagem e moagem intensiva, que são as operações unitárias de maior consumo energético e custo (OPEX) no tratamento de minérios primários. Assim, o rejeito armazenado nas barragens não é uma rocha moída que reteve o metal por falta de liberação, mas sim um sedimento onde a recuperação depende quase exclusivamente da eficiência da separação gravimétrica de partículas finas que escaparam ao processo original.

2.1.2. Ineficiências do Processamento Primário

O beneficiamento primário desses minérios aluvionares, como os explorados no Garimpo Bom Futuro, emprega tipicamente uma rota de concentração gravimétrica. De acordo com Linhares *et al.* (2023), o fluxograma geralmente inclui etapas de desagregação, classificação granulométrica e concentração em equipamentos como jigues (para frações mais grossas) e espirais concentradoras (para frações mais finas).

Contudo, a eficiência desses equipamentos é limitada, especialmente na recuperação de partículas finas e ultrafinas de cassiterita. Devido às suas características operacionais, uma parcela significativa da cassiterita fina é arrastada pelo fluxo de água e acaba sendo descartada junto com a ganga, compondo o fluxo de rejeito. É exatamente este fluxo de rejeito, enriquecido em cassiterita fina perdida, que se torna a matéria-prima de interesse para o reprocessamento.

Um fator determinante para essa perda de processo é a propriedade física intrínseca da cassiterita conhecida como friabilidade. Conforme revisado por Li *et al.* (2023), a cassiterita (SnO_2), apesar de sua dureza e densidade elevadas, é um mineral extremamente frágil. Durante as etapas de desmonte hidráulico (comum em garimpos), transporte e, principalmente, nas etapas de cominuição ou atrição dentro da planta de beneficiamento, os cristais de cassiterita tendem a se fraturar excessivamente. Esse fenômeno gera uma quantidade desproporcional de partículas com diâmetro inferior a $19 \mu\text{m}$, tecnicamente denominadas "lamas" (slimes).

A presença dessas lamas representa o maior desafio metalúrgico para a recuperação de estanho via gravimetria clássica. Leistner *et al.* (2016) explicam que a eficiência de separação em equipamentos como jigues e espirais decai exponencialmente para partículas abaixo de 40 μm . Nessa escala micrométrica, as forças hidrodinâmicas (arraste pela água) predominam sobre a força gravitacional, anulando a vantagem da densidade diferencial entre o mineral útil (cassiterita) e a ganga (sílica/argila). Como resultado, as partículas finas de estanho não conseguem sedimentar e são carregadas junto com a água de processo para as bacias de rejeito.

No contexto específico do Garimpo Bom Futuro, Peres (2020) observa que o rejeito acumulado é constituído justamente por esse material que "escapou" aos circuitos primários devido à ineficiência na faixa dos finos. Portanto, as barragens não armazenam apenas estéril geológico, mas sim um rejeito enriquecido em cassiterita fina liberada.

Essa característica define a tipologia do depósito antropogênico local: um material que dispensa novas etapas de moagem, economizando energia, mas que exige a aplicação de tecnologias de concentração ajustadas para a recuperação de finos (como centrífugas ou mesas vibratórias ajustadas), diferindo fundamentalmente dos circuitos de jigagem originalmente empregados.

2.2. A Centralidade da Caracterização Tecnológica

A caracterização tecnológica é a etapa diagnóstica fundamental em qualquer projeto de tratamento de minérios, pois são as propriedades intrínsecas do material que ditam a viabilidade e a escolha das rotas de processo. Para rejeitos de estanho, a caracterização deve abranger três eixos principais.

2.2.1. Caracterização Física, Química e Mineralógica

A definição de uma rota tecnológica eficiente para o reaproveitamento de rejeitos de mineração depende, invariavelmente, de um conhecimento profundo das propriedades do material. A caracterização tecnológica não se resume apenas à determinação do teor do elemento de interesse, mas engloba um conjunto multidisciplinar de análises que definem o comportamento do minério frente aos processos de concentração.

A caracterização física visa determinar parâmetros como a distribuição granulométrica e a densidade específica das partículas. Leistner *et al.* (2016) ressaltam que, para rejeitos de estanho, a análise granulométrica é crítica para identificar a fração de finos (40 μm), onde se

concentram as maiores perdas e onde os métodos gravimétricos convencionais perdem eficiência.

No âmbito mineralógico, o objetivo principal é determinar o grau de liberação (a proporção do mineral valioso que está livre da ganga) e a associação mineralógica. Kahn *et al.* (1998), ao recorrerem à Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em rejeitos de estanho, demonstraram que o grau de liberação é o parâmetro divisor de águas entre a necessidade de moagem (alto custo) e a possibilidade de concentração direta.

Para o contexto de Rondônia, Silva (2018) destaca a importância de analisar a morfologia dos grãos de cassiterita e sua associação com minerais pesados como zircão e columbita-tantalita, pois essas características influenciam diretamente a seletividade dos equipamentos de separação. Elshwehy *et al.* (2025) complementam essa abordagem utilizando Difração de Raios X (DRX) para identificar as fases minerais presentes em rejeitos, confirmando a presença de cassiterita livre em matrizes de quartzo e feldspato, o que valida rotas de beneficiamento.

A caracterização química quantifica os elementos presentes, tanto os de interesse econômico quanto os deletérios. Métodos como a Fluorescência de Raios X (FRX) e a Espectrometria de Emissão Óptica (ICP-OES) são amplamente citados na literatura para essa finalidade. Santos e Ribeiro (2025) aplicaram essas técnicas para mapear a composição de rejeitos no Garimpo Bom Futuro, focando não apenas no teor de Estanho (Sn), mas também em contaminantes como Chumbo (Pb) e Arsênio (As), cujos teores definem a viabilidade ambiental do projeto.

Além da composição elementar, a caracterização química para fins ambientais (geoquímica ambiental) é mandatória. Peres (2020) enfatiza a necessidade de classificar o rejeito segundo as NBR 10004 (ABNT, 2024), NBR 10005 (ABNT, 2004) e NBR 10006

(ABNT, 2004), através de ensaios de lixiviação e solubilização, para determinar se o material é inerte ou perigoso. Em uma perspectiva global, Sanusi *et al.* (2021) alertam para a importância de incluir a caracterização radiológica nesses estudos, uma vez que rejeitos de estanho podem conter radionuclídeos naturais (TENORM) que inviabilizariam certas aplicações civis sem tratamento prévio.

2.2.2. O Grau de Liberação Mineral

No processamento mineral, o grau de liberação é considerado o parâmetro mais crítico para a definição da rota de beneficiamento. Ele representa a porcentagem do mineral de

interesse (no caso, a cassiterita) que se encontra fisicamente individualizada, ou seja, desassociada da matriz de ganga (quartzo, micas). A determinação precisa desse índice define se o material pode ser concentrado diretamente ou se necessita de etapas onerosas de cominuição (moagem) para "liberar" o metal valioso.

A literatura apresenta cenários contrastantes que ilustram o peso do grau de liberação mineral. Kahn *et al.* (1998), ao analisarem minérios primários complexos, identificaram que a cassiterita frequentemente ocorre inclusa ou associada a minerais de ferro e turmalina. Nesses casos, mesmo após a moagem, o grau de liberação pode permanecer baixo (cerca de 27%), o que inviabiliza a concentração gravimétrica eficiente, pois a partícula mista (cassiterita + ganga) tem uma densidade média que confunde o equipamento de separação. A consequência direta é a necessidade de moagem ultrafina e o uso de flotação, elevando drasticamente os custos operacionais.

Em contrapartida, rejeitos provenientes de depósitos aluvionares ou de processos de beneficiamento prévio tendem a apresentar um cenário muito mais favorável. Elshwehy *et al.* (2025) observaram que, em rejeitos de mineração no Egito, a cassiterita já se encontrava majoritariamente liberada devido à ação prévia de intemperismo e processos mecânicos. Essa alta liberação permitiu que o teor de alimentação de 3,59% fosse elevado para quase 60% apenas com métodos físicos (magnéticos e gravimétricos), sem a necessidade de dispendiosas etapas de moagem.

Para o contexto da Província Estanífera de Rondônia, Silva (2018) reforça essa vantagem geológica. A análise morfológica dos concentrados de rejeitos da região revelou cristais de cassiterita e zircão com alto grau de individualização, preservados devido à sua resistência mecânica e química durante o transporte aluvionar. Isso sugere que os rejeitos estocados nas barragens locais são constituídos, em grande parte, por minerais úteis que já estão "prontos" para a separação, bastando apenas uma classificação granulométrica adequada.

Contudo, o grau de liberação não deve ser analisado isoladamente da granulometria. Leistner *et al.* (2016) alertam que, em rejeitos antigos, a cassiterita pode estar perfeitamente liberada (grau de liberação > 90%), mas apresentar-se na forma de partículas ultrafinas (<40 µm). Nesse cenário, embora o mineral esteja "livre", ele se comporta hidrodinamicamente como lama, exigindo tecnologias específicas (como flotação assistida por óleo ou centrífugas) para ser capturado, uma vez que a gravimetria convencional perde eficiência. Portanto, a caracterização ideal para o reprocessamento deve cruzar os dados de liberação com a distribuição de tamanho das partículas.

2.3. Tecnologias de Concentração Mineral para Rejeitos de Cassiterita

A escolha da tecnologia de concentração é ditada pelas características do rejeito, especialmente a densidade e a granulometria da cassiterita.

2.3.1. Concentração Gravimétrica

A concentração gravimétrica fundamenta-se na separação de espécies minerais com base na diferença de densidade (gravidade específica) entre as partículas, utilizando a ação da gravidade ou de forças centrífugas em um meio fluido (geralmente água) para promover a estratificação, Conforme Sampaio e Tavares (2005). No contexto do beneficiamento de estanho, este método é historicamente predominante e tecnicamente favorecido devido às propriedades físicas intrínsecas da cassiterita.

A viabilidade teórica dessa separação é classificada pelo Critério de Concentração de Taggart, definido pela razão entre as densidades dos minerais pesados e leves, descontada a densidade do fluido. Para o sistema Cassiterita (7,0 g/cm³) e Quartzo/Silicatos (2,65 g/cm³) em água, o índice calculado é superior a 3,6. Segundo a literatura de tratamento de minérios, segundo Sampaio e Tavares (2005) valores acima de 2,5 indicam que a separação gravimétrica é extremamente eficiente a custos reduzidos, dispensando o uso intensivo de reagentes químicos.

No entanto, para o reprocessamento de rejeitos, a seleção do equipamento deve superar as limitações hidrodinâmicas das tecnologias antigas (jigues) frente à granulometria fina. A literatura recente, de acordo com Li *et al.* (2023) e Sampaio *et al.* (2007), aponta duas classes de equipamentos essenciais para esse cenário: mesas vibratórias e Concentradores Centrífugos

As mesas vibratórias operam em regime de fluxo laminar com movimento assimétrico para separar partículas em faixas de areia fina a média. Elshwehy *et al.* (2025) validaram recentemente a robustez desse método ao processarem rejeitos de mineração com características aluvionares. Utilizando uma mesa do tipo Wilfley, os autores conseguiram elevar o teor de alimentação de 3,5% para cerca de 60% de SnO₂ em uma única etapa após a remoção magnética, comprovando que a mesa vibratória é altamente eficaz para a fração onde a cassiterita já se encontra liberada.

Para a fração de finos e lamas (< 40 µm), onde as forças de arraste da água tendem a superar a gravidade natural, a introdução de forças G elevadas é necessária para garantir a

sedimentação do mineral útil. Li *et al.* (2023) destacam o avanço de concentradores centrífugos (como os tipos Falcon ou Knelson) e mesas oscilatórias de finos na indústria chinesa. Esses equipamentos demonstraram capacidade de recuperar partículas de cassiterita até a faixa de 10 a 19 μm , transformando o que historicamente era descartado como lama em concentrado comercializável.

Apesar da alta eficiência dessas tecnologias, Leistner *et al.* (2016) ressaltam que existe um limite físico inferior (geralmente ao redor de 10 μm) onde a eficiência gravimétrica decai, momento em que a viscosidade do fluido passa a dominar o sistema. Contudo, para o perfil granulométrico predominante nos rejeitos do Bom Futuro, a combinação de mesas e centrífugas apresenta a melhor relação entre recuperação metalúrgica e sustentabilidade operacional.

2.3.2. Flotação

A flotação por espumas é amplamente reconhecida na literatura especializada como a principal alternativa tecnológica para o beneficiamento de partículas minerais situadas abaixo do limite de eficiência da concentração gravimétrica. Leistner *et al.* (2016) estabelecem que, enquanto a eficiência dos métodos baseados em densidade decai drasticamente para partículas menores que 40 μm , devido à predominância das forças de viscosidade do fluido sobre a gravidade, a flotação mantém sua eficácia técnica até a faixa de 10 a 15 μm . Esse processo baseia-se nas propriedades físico-químicas de superfície (hidrofobicidade) das partículas, permitindo a separação seletiva mesmo quando as diferenças de densidade são irrelevantes.

No tratamento específico da cassiterita (SnO_2), que é um mineral óxido naturalmente hidrofílico, o sucesso da separação depende inteiramente da modificação de sua superfície mediante o uso de reagentes químicos específicos. Em uma revisão abrangente sobre o tema, Li *et al.* (2023) destacam a evolução histórica dos coletores utilizados. Segundo os autores, enquanto os coletores tradicionais (como ácidos graxos) apresentaram baixa seletividade frente a minerais de ganga cálcica (calcita, fluorita), novas classes de reagentes, especificamente os ácidos fosfônicos, ácidos hidroxâmicos e sulfosuccinamatos, demonstraram desempenho superior na recuperação de cassiterita fina em polpas mineralógicas complexas.

A viabilidade da aplicação dessa técnica no contexto de reprocessamento de passivos ambientais é corroborada por estudos de caso internacionais. Leistner *et al.* (2016) investigaram a recuperação de estanho em rejeitos de gravimetria de uma mina histórica na

Alemanha (Ehrenfriedersdorf), caracterizados por uma granulometria predominantemente fina (80% do material abaixo de $100\mu\text{m}$). Ao utilizarem um circuito de flotação convencional com coletores à base de sulfosuccinato, os pesquisadores conseguiram recuperar cerca de 80% da cassiterita contida na fração fina ($-50\mu\text{m}$), transformando um volume de lamas, anteriormente considerado perda, em um concentrado aproveitável.

Apesar da alta eficiência metalúrgica para finos, a literatura aponta barreiras para sua adoção indiscriminada. Li *et al.* (2023) alertam que a implementação da flotação impõe desafios operacionais e econômicos significativos em comparação à gravimetria. O processo exige um controle rigoroso do pH da polpa, o consumo constante de reagentes (coletores, espumantes, depressores e modificadores) e, crucialmente, etapas prévias de deslamagem para remover partículas ultrafinas ($< 5\mu\text{m}$) que prejudicam a seletividade e aumentam o consumo de reagentes. Portanto, no âmbito deste trabalho, a flotação é posicionada teoricamente não como a rota principal, mas como uma tecnologia complementar estratégica para maximizar a recuperação global, focada na fração de lamas que escapa aos concentradores gravimétricos.

2.3.3. Análise Comparativa de Rotas Tecnológicas

A seleção da rota de beneficiamento para minérios de estanho e seus rejeitos não é um processo estático, mas sim uma decisão baseada na ponderação entre eficiência metalúrgica, custos operacionais e complexidade técnica. Os estudos de Leistner *et al.* (2016), Li *et al.* (2023), Kahn *et al.* (1998) e Elshwehy *et al.* (2025) estabelecem critérios claros para comparar as rotas tecnológicas disponíveis: concentração gravimétrica e flotação, cujas aplicabilidades são ditadas fundamentalmente pelas características mineralógicas.

A distinção primária entre os métodos físicos (gravimetria) e físico-químicos (flotação) reside na faixa granulométrica de atuação eficiente. Leistner *et al.* (2016), em seus estudos sobre processamento de finos, delimitam que a concentração gravimétrica domina a eficiência para partículas com diâmetro superior a $40\mu\text{m}$. Nessa faixa, as leis de sedimentação (Newton e Stokes) favorecem a separação baseada na diferença de densidade entre a cassiterita ($d = 7,0\text{ g/cm}^3$) e a ganga silicática ($d = 2,65\text{ g/cm}^3$). No entanto, abaixo desse limite, a viscosidade do fluido passa a exercer força preponderante sobre a gravidade, reduzindo drasticamente a seletividade dos equipamentos gravimétricos convencionais.

Para a recuperação de partículas abaixo de $40\mu\text{m}$ (lamas), Li *et al.* (2023) indicam a flotação como a alternativa técnica consolidada, capaz de manter eficiência até a faixa de 10 a $15\mu\text{m}$. Contudo, os autores ressaltam que essa extensão da recuperação tem um custo: a

flotação exige o consumo contínuo de reagentes específicos (coletores fosfônicos ou hidroxâmicos), controle rigoroso de pH e etapas de deslamagem prévia, o que eleva significativamente o Custo Operacional (OPEX) e a complexidade do circuito em comparação à gravimetria, que utiliza apenas água e energia mecânica.

A literatura também correlaciona a escolha tecnológica à gênese do depósito mineral. Kahn *et al.* (1998) observaram que, para depósitos primários com baixo grau de liberação (cassiterita inclusa na rocha), a moagem fina é obrigatória, o que invariavelmente direciona o processo para a flotação, visto que a gravimetria se torna ineficaz para partículas mistas.

Por outro lado, estudos recentes em depósitos secundários (aluvionares), como os conduzidos por Elshwehy *et al.* (2025) e Linhares *et al.* (2023), reportam que a liberação natural do mineral permite que circuitos puramente gravimétricos (mesas vibratórias e centrífugas) atinjam fatores de enriquecimento elevados, consolidando essa rota como a preferencial para materiais onde a cominuição não é um pré-requisito.

2.4. Rotas de Valorização no Contexto da Economia Circular

O reprocessamento de rejeitos de estanho abre múltiplas vias de valorização, em linha com os princípios da economia circular, que visam eliminar o desperdício e maximizar o uso de recursos.

2.4.1. Recuperação de Coprodutos Minerai

A exploração de depósitos de estanho, especialmente os de origem secundária (aluvionar), raramente se restringe à recuperação exclusiva da cassiterita. O estudo de Silva (2018) indica que esses depósitos funcionam como concentradores naturais para um conjunto diversificado de minerais de alta densidade, denominados coletivamente como minerais pesados. A recuperação desses minerais associados, seja como coprodutos (de valor equivalente) ou subprodutos (de valor secundário), constitui uma estratégia fundamental para maximizar o aproveitamento dos recursos minerais e a rentabilidade de operações de reprocessamento.

No contexto específico da Província Estanífera de Rondônia, Silva (2018) fornece o embasamento mineralógico necessário para compreender esse potencial. Estudos de caracterização em concentrados de bateia da região demonstraram que a cassiterita ocorre frequentemente em paragênese com o zircão ($ZrSiO_4$) e minerais da série columbita-tantalita

[(Fe, Mn)(Nb, Ta)₂O₆]. Devido à alta densidade específica dessas espécies (Zircão = 4,6 g/cm³; Columbita = 5,2 g/cm³), elas apresentam comportamento hidrodinâmico similar ao da cassiterita, tendendo a se concentrar conjuntamente durante as etapas de beneficiamento gravimétrico.

A relevância técnica da separação desses minerais é corroborada por experiências internacionais. Sanusi *et al.* (2021) descrevem o processamento do "Amang" na Malásia, um concentrado de minerais pesados obtido como subproduto da mineração de estanho. Este material é composto por uma mistura complexa de ilmenita, zircão, monazita e xenotima. A literatura estabelece que o desmembramento desse concentrado misto exige a aplicação de métodos físicos baseados em propriedades magnéticas e elétricas, permitindo a obtenção de produtos comerciais distintos a partir de um mesmo fluxo de alimentação.

Do ponto de vista tecnológico, Elshwehy *et al.* (2025) demonstram que a integração de separação magnética ao circuito de beneficiamento é a rota padrão para a segregação desses coprodutos. Em estudos com rejeitos de mineração contendo associações minerais complexas, os autores observaram que a remoção de fases paramagnéticas (como a columbita e ilmenita) e ferromagnéticas (magnetita) não apenas gera subprodutos comercializáveis, mas também purifica o concentrado de cassiterita (diamagnética), elevando seu valor de mercado para aplicações de alta tecnologia.

2.4.2. Aplicação do Rejeito Final na Construção Civil

A incorporação de resíduos de mineração na cadeia produtiva da construção civil é reconhecida na literatura técnica como uma das estratégias mais eficazes para a mitigação de passivos ambientais. Este reaproveitamento, alinhado aos conceitos de economia circular, fundamenta-se na substituição de agregados naturais não renováveis (areia e brita) por materiais secundários, desde que estes atendam aos requisitos de desempenho mecânico e segurança ambiental estabelecidos pelas normas vigentes.

Uso como Agregado em Materiais Cimentícios: A fração arenosa dos rejeitos de beneficiamento de cassiterita apresenta características granulométricas e mineralógicas que favorecem sua aplicação como agregado miúdo. No contexto regional de Rondônia, Rocha (2022) investigou o potencial desses resíduos para a fabricação de artefatos de concreto, especificamente bloquetes intertravados (pavers). A revisão do autor demonstra que, mediante processos de beneficiamento simples, como lavagem para remoção de finos argilosos e classificação granulométrica, o rejeito arenoso adquire propriedades físicas adequadas para

compor a matriz do concreto, atendendo aos parâmetros de resistência à compressão exigidos para pavimentação urbana.

Em vertente similar, Guedes (2020) analisou a viabilidade técnica da utilização desses rejeitos na produção de argamassas de assentamento e revestimento. Os estudos citados pelo autor indicam que a substituição, parcial ou total, da areia natural lavada pelo rejeito de mineração não compromete a trabalhabilidade ou a resistência mecânica do composto final, desde que o traço (relação água/cimento/agregado) seja ajustado às especificidades granulométricas do resíduo. Essa literatura estabelece um precedente técnico para a valorização de grandes volumes de estéril.

Aplicações Especiais Baseadas em Propriedades Físico-Químicas: Além da função estrutural como agregado inerte, a literatura identifica aplicações que exploram propriedades intrínsecas dos subprodutos do estanho. Leocádio (2022) estudou a escória da metalurgia da cassiterita, um subproduto da etapa de fundição, como matéria-prima para a construção civil especializada. Devido à sua massa específica elevada (aproximadamente 2,99 g/cm³), superior à dos agregados convencionais, esse material foi validado teoricamente e experimentalmente como componente eficaz para argamassas de alta densidade, destinadas à blindagem de radiação (Raios X e Gama) em ambientes hospitalares e laboratoriais.

No âmbito da química do cimento, Baziotis e Chandrinos (2011) discutem o efeito mineralizador do óxido de estanho (SnO₂) residual. Segundo os autores, a introdução de resíduos contendo estanho na alimentação de fornos de clínquer pode reduzir a temperatura de queima necessária e favorecer a cinética de formação da alita (C₃S), principal fase responsável pelo desenvolvimento das resistências iniciais do cimento Portland. Essa aplicação sugere uma rota de valorização química, onde o resíduo atua como aditivo de performance.

Requisitos Normativos e Ambientais: A transição de um "rejeito" para um "agregado reciclado" é condicionada estritamente pelo enquadramento normativo. Peres (2020) ressalta que a viabilidade de qualquer aplicação civil depende da caracterização ambiental do material segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2024) Resíduos Sólidos - Classificação. Para que o rejeito seja considerado apto ao uso irrestrito, ele deve ser classificado como resíduo não perigoso e inerte (Classe II B). Essa classificação é obtida através de ensaios padronizados de lixiviação NBR 10005 (ABNT, 2004) e solubilização NBR 10006 (ABNT, 2004), que simulam o comportamento dos contaminantes frente à água, garantindo que metais eventualmente presentes não sejam mobilizados para o solo ou lençol freático após a aplicação do material em obras de engenharia.

2.4.3. Estratégias para Recuperação Ambiental

A gestão responsável dos rejeitos de mineração não se encerra na extração de valores econômicos; ela exige a reintegração ecológica das áreas impactadas e dos materiais remanescentes que não foram absorvidos por outras cadeias produtivas. O estudo de Nurtjahya *et al.* (2009) aborda a recuperação ambiental de áreas de mineração de estanho como um desafio pedológico e botânico complexo, dada a natureza físico-química dos substratos gerados.

Revegetação em Substratos de Estanho: Os rejeitos finais do beneficiamento de cassiterita caracterizam-se, predominantemente, por uma matriz arenosa com baixa retenção de umidade, altas temperaturas superficiais e extrema escassez de nutrientes e matéria orgânica. Nurtjahya *et al.* (2009), ao estudarem a recuperação de áreas de mineração de estanho na Indonésia (Ilhas de Bangka-Belitung), estabelecem que o sucesso da revegetação depende menos da fertilização intensiva e mais da seleção criteriosa de espécies. Os autores defendem o uso de espécies nativas pioneiras ("local species") que evoluíram mecanismos de adaptação a solos pobres e arenosos (arenossolos), em detrimento de espécies exóticas de crescimento rápido que muitas vezes não garantem a sustentabilidade do ecossistema a longo prazo. A estratégia teórica consiste em facilitar a sucessão ecológica natural, estabilizando fisicamente o rejeito para prevenir erosão e permitindo o acúmulo gradual de biomassa.

Tecnologias de monitoramento remoto para validar a eficiência das medidas de recuperação ecológica ao longo do tempo, a literatura contemporânea aponta para a substituição ou complementação das inspeções visuais por técnicas de geoprocessamento. Rodrigues (2025) fundamenta o uso do sensoriamento remoto como ferramenta de gestão ambiental em áreas de barragens descaracterizadas. A autora destaca a aplicação de índices espectrais, especificamente o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), para monitorar quantitativamente a evolução da cobertura vegetal.

Segundo a metodologia descrita por Rodrigues (2025), a análise multitemporal de imagens de satélite (como as da constelação Sentinel-2) permite detectar variações na densidade e no vigor da biomassa vegetal sobre as estruturas geotécnicas. Essa abordagem oferece uma métrica objetiva para avaliar se o processo de regeneração está ocorrendo conforme o planejado ou se são necessárias intervenções corretivas, constituindo uma prática recomendada para o fechamento de mina e a gestão de passivos ambientais a longo prazo.

3. METODOLOGIA

3.1. Abordagem da Pesquisa

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é fundamentado em uma revisão bibliográfica, com uma abordagem qualitativa e de caráter exploratório-descritivo. Esta metodologia é adequada para mapear o estado da arte, sintetizar o conhecimento existente e identificar as principais variáveis, desafios e oportunidades relacionados ao reprocessamento de rejeitos de minério de estanho.

3.2. Fontes de Dados e Estratégia de Busca

As fontes de dados para o levantamento bibliográfico incluíram um espectro amplo de publicações técnicas e científicas, tais como: bases de dados acadêmicas (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Google Scholar), repositórios de teses e dissertações (como a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações - BDTD), e anais de congressos especializados na área de tratamento de minérios e metalurgia extrativa. A estratégia de busca foi conduzida utilizando combinações de palavras-chave em português e inglês, como: "reprocessamento", "rejeito de estanho", "concentração de cassiterita", "mesa vibratória", "flotação de cassiterita", "grau de liberação", "economia circular na mineração", tin tailings, cassiterite concentration e mineral processing.

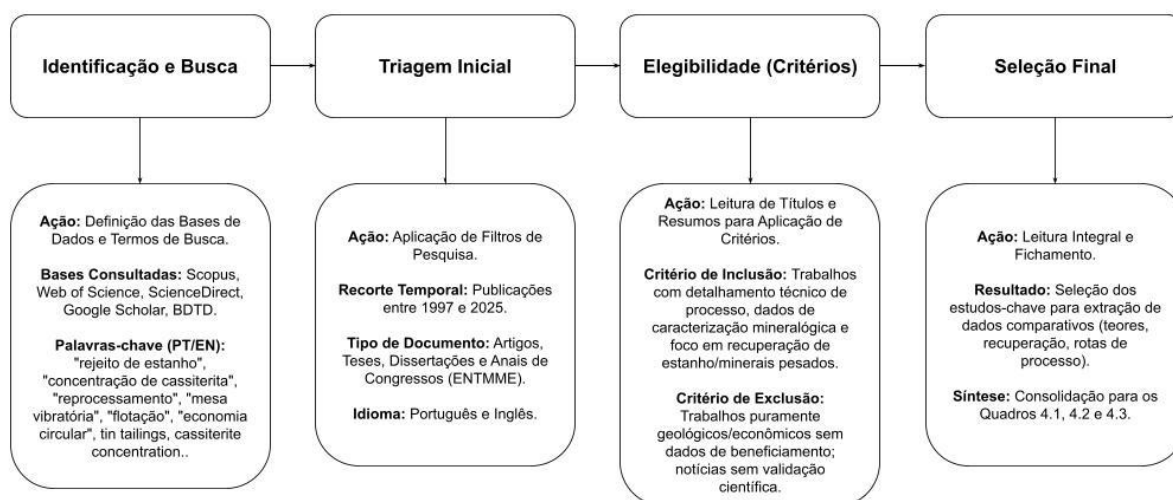
3.3. Critérios de Inclusão e Exclusão

Foram incluídos artigos, teses, dissertações e relatórios técnicos publicados preferencialmente nos últimos anos (1997-2025), para garantir a atualidade da análise e, simultaneamente, incluir trabalhos seminais (ex: GABALLAH *et al.*, 1997) que abordam diretamente os aspectos tecnológicos do reprocessamento de rejeitos de estanho ou minerais pesados análogos. Foram excluídos trabalhos de cunho puramente geológico ou econômico sem detalhamento técnico sobre o processamento mineral, bem como notícias e materiais sem validação acadêmica ou revisão por pares.

Para garantir a transparência e a replicabilidade do levantamento realizado, o processo de constituição do portfólio bibliográfico foi sistematizado graficamente. A Figura 3.1 apresenta o fluxo de seleção, detalhando as etapas de identificação nas bases de dados, a

aplicação dos filtros de triagem (temporal e temático) e os critérios de elegibilidade que resultaram no corpus final de análise utilizado neste trabalho.

Quadro 3.1 – Fluxograma do processo de seleção e análise bibliográfica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.4. Análise e Síntese dos Dados

A análise dos dados coletados seguiu um processo estruturado em três etapas. Primeiramente, foi realizado um fichamento detalhado de cada fonte, extraindo informações sobre a origem e tipo do material, metodologia de caracterização, parâmetros de processo utilizados e resultados de performance obtidos (teores, recuperações, etc.). Em seguida, as informações foram organizadas e categorizadas de acordo com os eixos temáticos definidos no Referencial Teórico: caracterização tecnológica, técnicas de concentração e rotas de valorização. Por fim, foi realizada uma síntese crítica e comparativa, buscando identificar padrões, tendências, lacunas e aparentes divergências na literatura, como a comparação entre as rotas de processo para rejeitos de origens distintas. Esta síntese constitui a base para a seção de resultados e discussão e para a elaboração das conclusões do trabalho.

4. RESULTADOS

A análise crítica e comparativa da literatura permitiu consolidar os dados sobre a caracterização de diferentes tipos de rejeitos de estanho, avaliar a performance das tecnologias de concentração e propor um fluxograma otimizado para o contexto dos depósitos aluvionares de Rondônia.

A análise foca, primariamente, no reprocessamento do rejeito aluvionar de cassiterita, o objetivo central deste trabalho. Adicionalmente são incorporados estudos sobre a recuperação de nióbio (Nb) e tântalo (Ta) a partir da escória de estanho. A escória, um subproduto pirometalúrgico da fundição, é um material quimicamente distinto do rejeito de beneficiamento. Contudo, sua análise é relevante como um análogo tecnológico para o tratamento do concentrado de minerais pesados (coprodutos como columbita, tantalita e zircão) que seria gerado no fluxograma de reprocessamento do rejeito aluvionar.

4.1. Quadro-Síntese de Parâmetros de Caracterização de Rejeitos

A viabilidade de qualquer projeto de reprocessamento começa com uma caracterização detalhada do material de alimentação. O Quadro 4.1 consolida e compara os principais parâmetros tecnológicos de rejeitos de estanho de diferentes origens, conforme reportado em estudos-chave da literatura.

Quadro 4.1 – Quadro Comparativo de Estudos de Caracterização de Rejeitos de Cassiterita e Escória de Estanho.

Referência (Autor/Ano)	Tipo de Material	Teores de Interesse (%)	Características Determinantes	Mineralogia Principal (Ganga/Matriz)
Peres (2020)	Rejeito Aluvionar (Garimpo Bom Futuro, RO)	0,42 - 0,65 (SnO_2)	Agregado miúdo (areia). Grau de liberação: Alto (esperado)	Quartzo (SiO_2), Alumina (Al_2O_3), Óxidos de Ferro (Fe_2O_3)
Santos e Ribeiro (2025)	Rejeito/Minério Baixo Teor (Garimpo Bom Futuro, RO)	45,7 (Sn) em pré-concentrado	Baixa umidade (0,17%). Baixos teores de contaminantes (Pb, As, Cd)	Moderada presença de Ferro (Fe) e Tungstênio (WO_3)
Kahn <i>et al.</i> (1998)	Rejeito Primário (Catavi, Bolívia)	0,24 - 0,28 (SnO_2)	Fina (< 0,074 mm). Grau de liberação: Baixo (27%)	Quartzo, Turmalina

Linhares <i>et al.</i> (2023)	Rejeito Aluvionar (Rondônia)	2,32 (SnO_2)	Fina (-2,3 +0,038 mm). Grau de liberação: 100%	Alumina (Al_2O_3), Sílica (SiO_2)
Elshwehy <i>et al.</i> (2025)	Rejeito de Mineração (Depósito Igla, Egito)	3,59% (Massa SnO_2)	Material aluvionar. Grau de liberação favorecido pela geologia.	Labradorita (87%), Berilo, Muscovita e Quartzo.
Li <i>et al.</i> (2023)	Rejeitos de Depósitos Primários (China)	Variável (Baixo teor residual)	Granulometria fina e ultrafina (<19 μm); Mineralogia complexa; Alta geração de lamas.	Sulfetos polimetálicos, Magnetita, Calcudita e Silicatos complexos.
Sanusi <i>et al.</i> (2021)	"Amang" (Rejeito de Estanho, Malásia)	Variável (foco radiológico)	Presença de minerais radioativos (TENORM) em altas concentrações.	Ilmenita (60%), Quartzo (30%), Zircão, Monazita (Terras Raras).
Leistner <i>et al.</i> (2016)	Rejeito de Gravimetria Antiga (Ehrenfriedersdorf, Alemanha)	0,2% (SnO_2)	Predominância de finos e ultrafinos (80% < 40 μm); Grau de liberação alto em partículas livres.	Silicatos (95%), Óxidos e Fosfatos.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base nas referências citadas.

A análise do Quadro 4.1 permite uma comparação direta que evidencia a heterogeneidade fundamental entre os materiais, a drástica diferença de processabilidade entre rejeitos de origem primária e secundária.

No contexto asiático, Li *et al.* (2023) destacam que aproximadamente 80% dos recursos de estanho na China provêm de depósitos primários. Estes minérios caracterizam-se por uma mineralogia complexa, onde a cassiterita encontra-se finamente disseminada e associada a sulfetos polimetálicos e silicatos de ferro. A consequência direta dessa gênese é a necessidade de cominuição intensiva para liberar o mineral valioso. No entanto, como a cassiterita é um mineral frágil, esse processo gera uma quantidade excessiva de lamas (partículas ultrafinas < 19 μm), resultando em perdas significativas de estanho nos rejeitos, uma vez que os métodos gravimétricos convencionais são ineficientes para essa faixa granulométrica.

Da mesma forma, Leistner *et al.* (2016), ao caracterizarem rejeitos históricos na Alemanha, encontraram um material onde mais de 80% da cassiterita estava abaixo de 40 μm , o que impõe desafios significativos para a recuperação física devido ao tamanho diminuto das partículas, apesar do grau de liberação ser razoável.

Essa dificuldade é corroborada historicamente pelo estudo de Kahn *et al.* (1998) em rejeitos primários da Bolívia (Catavi). Mesmo após moagem para granulometrias finas ($< 0,074$ mm), o grau de liberação da cassiterita alcançou apenas 27%, exigindo etapas complexas e onerosas de flotação para a recuperação do metal.

Em contraste direto, o rejeito aluvionar de Rondônia (Linhares *et al.*, 2023), apresenta um grau de liberação de 100%. Este dado é a consequência direta do "pré-beneficiamento" natural; os processos geológicos de intemperismo e transporte fluvial ao longo de milhões de anos já realizaram o trabalho de desagregação do mineral de valor da sua rocha hospedeira. Peres (2020) reforça essa caracterização para o Garimpo Bom Futuro, descrevendo o rejeito como um agregado miúdo arenoso, composto majoritariamente por quartzo e óxidos de ferro, com teores residuais de estanho que justificam o reprocessamento.

A vantagem dos depósitos secundários não é exclusiva do Brasil, sendo confirmada internacionalmente por Elshwehy *et al.* (2025). Ao investigarem rejeitos de mineração do depósito de Iгла, no Egito, os autores identificaram um teor de 3,59% de SnO₂ em um material de origem aluvionar/coluvionar. A natureza mineralógica desse rejeito egípcio, composto por uma matriz de labradorita e berilo, permitiu que, através de simples separação física (gravimétrica e magnética), o teor fosse elevado para patamares comerciais sem a necessidade de rotas químicas complexas, estabelecendo um paralelo direto com o potencial tecnológico do Garimpo Bom Futuro..

Além dos aspectos físicos, a caracterização química realizada por Santos e Ribeiro (2025) trouxe dados cruciais sobre a segurança ambiental do reprocessamento no Bom Futuro. As análises de Fluorescência de Raios X (FRX) e ICP-OES em amostras de baixo teor revelaram concentrações de estanho recuperável na ordem de 45% em pré-concentrados, com baixíssima umidade (0,17-0,23%). Mais importante, o estudo atestou a ausência de contaminantes críticos em níveis perigosos: os teores de Chumbo (Pb $< 0,01\%$), Arsênio (As $< 0,02\%$) e Cádmio (Cd $< 0,01\%$) encontram-se muito abaixo dos limites que inviabilizariam o uso civil do material.

Este cenário geoquímico é muito mais favorável do que o observado em outras províncias estaníferas globais. Sanusi *et al.* (2021) alertam que os rejeitos de estanho na Malásia, conhecidos localmente como "Amang", são classificados como TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material) devido às altas concentrações de Urânio ($^{238}\text{U} = 16.000$ Bq/kg) e Tório ($^{232}\text{Th} = 22.000$ Bq/kg) associados à monazita e xenotima. A presença massiva desses elementos radioativos e de metais pesados no "Amang" exige protocolos de segurança radiológica e ambiental extremamente rigorosos,

que elevam o custo e a complexidade do reprocessamento. A ausência relatada de tais níveis de contaminação nas amostras recentes de Rondônia sugere que o passivo do Bom Futuro apresenta barreiras ambientais significativamente menores para sua transformação em ativo econômico.

4.2. Análise Crítica da Eficiência das Técnicas de Concentração

A eficiência de uma técnica de concentração está diretamente ligada às características do material alimentado. O Quadro 4.2 compara a performance de diferentes abordagens tecnológicas aplicadas aos rejeitos descritos na seção anterior.

A literatura recente aponta que, para depósitos secundários e rejeitos aluvionares, a rota gravimétrica permanece como a abordagem mais atrativa economicamente e ambientalmente, enquanto rejeitos complexos ou ultrafinos demandam tecnologias mais avançadas.

Quadro 4.2 – Análise Comparativa de Performance de Técnicas de Concentração.

Referência (Autor/Ano)	Técnica Utilizada	Teor de SnO_2 Alimentação (%)	Teor de SnO_2 Concentrado (%)	Recuperação Metalúrgica (%)	Fator de Enriquecimento
Linhares <i>et al.</i> (2023)	Mesa Vibratória	2,32	31,31	66	13,5
Elshwehy <i>et al.</i> (2025)	Separação Magnética + Gravimétrica (Mesa Wilfley)	3,59	59,6	Não aplicável	16,6
Kahn <i>et al.</i> (1998)	Moagem Fina + Flotação (Rota indicada)	0,24 - 0,28	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Li <i>et al.</i> (2023)	Gravimetria Avançada (Separador de Disco Vibratório)	Variável (Finos: 37-74 μ m)	6,61	83,23	12,47
Leistner <i>et al.</i> (2016)	Flotação Convencional (Sulfosuccinamato)	0,2	1,3 - 1,8	80 (fração fina)	7,5 - 10

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base nas referências citadas.

Os dados apresentados no Quadro 4.2 corroboram, de forma quantitativa, o argumento central deste estudo: a eficiência tecnológica e a viabilidade econômica do reprocessamento são ditadas, primordialmente, pela origem geológica do depósito. A comparação evidencia

que os rejeitos aluvionares, beneficiados pelo intemperismo natural, apresentam uma resposta metalúrgica superior aos métodos gravimétricos de baixo custo, diferindo drasticamente da complexidade exigida pelos depósitos primários.

O estudo de Linhares *et al.* (2023), focado no contexto de Rondônia, comprovou que a mesa vibratória, um equipamento de baixo custo operacional e isento de reagentes químicos, é capaz de concentrar o minério de 2,32% para mais de 31% de SnO₂. Esse desempenho é corroborado internacionalmente por Elshwehy *et al.* (2025), que aplicaram um fluxograma integrando separação magnética de alta intensidade (para remoção de contaminantes paramagnéticos como ilmenita e granada) seguida de concentração gravimétrica em mesa Wilfley.

No estudo egípcio, o teor de alimentação de 3,59% foi elevado para impressionantes 59,6% na fração granulométrica entre 0,5 e 1,0mm. Elshwehy *et al.* (2025) enfatizam que essa rota física não apenas é eficiente para minérios aluvionares/coluvionares, mas também representa uma estratégia sustentável ao eliminar a necessidade de reagentes químicos agressivos, alinhando-se perfeitamente às demandas ambientais atuais.

Em contrapartida, o trabalho seminal de Kahn *et al.* (1998) ilustra o cenário oposto, típico de rejeitos de minérios primários complexos. Para o material analisado (Catavi, Bolívia), a concentração gravimétrica convencional mostrou-se tecnicamente inviável. A cassiterita, finamente disseminada e com baixo grau de liberação (apenas 27%), exigiria uma moagem excessiva para ser liberada, gerando lamas que os equipamentos gravimétricos comuns não conseguem recuperar eficientemente. Kahn *et al.* (1998) concluem, portanto, que para esse perfil mineralógico, a única rota capaz de atingir recuperações aceitáveis envolve cominuição fina seguida de flotação, um processo significativamente mais oneroso e complexo do que o aplicável aos rejeitos de Rondônia.

Para preencher a lacuna tecnológica no tratamento de frações finas, que frequentemente carrega perdas significativas de estanho, Li *et al.* (2023) apresenta dados promissores sobre a gravimetria avançada. O uso de equipamentos como o separador de disco vibratório (Vibrating Disc Separator) permitiu recuperar 83,23% do estanho em frações finas (37-74 µm), atingindo um fator de enriquecimento de 12,475. Isso sugere que, mesmo que o rejeito de Rondônia apresente uma fração fina gerada por intemperismo, existem tecnologias gravimétricas modernas capazes de recuperá-la sem recorrer necessariamente à flotação química sugerida por Kahn para minérios primários.

Da mesma forma para a fração de finos e ultrafinos, que muitas vezes escapa à gravimetria convencional, Leistner *et al.* (2016) trazem contribuições importantes ao

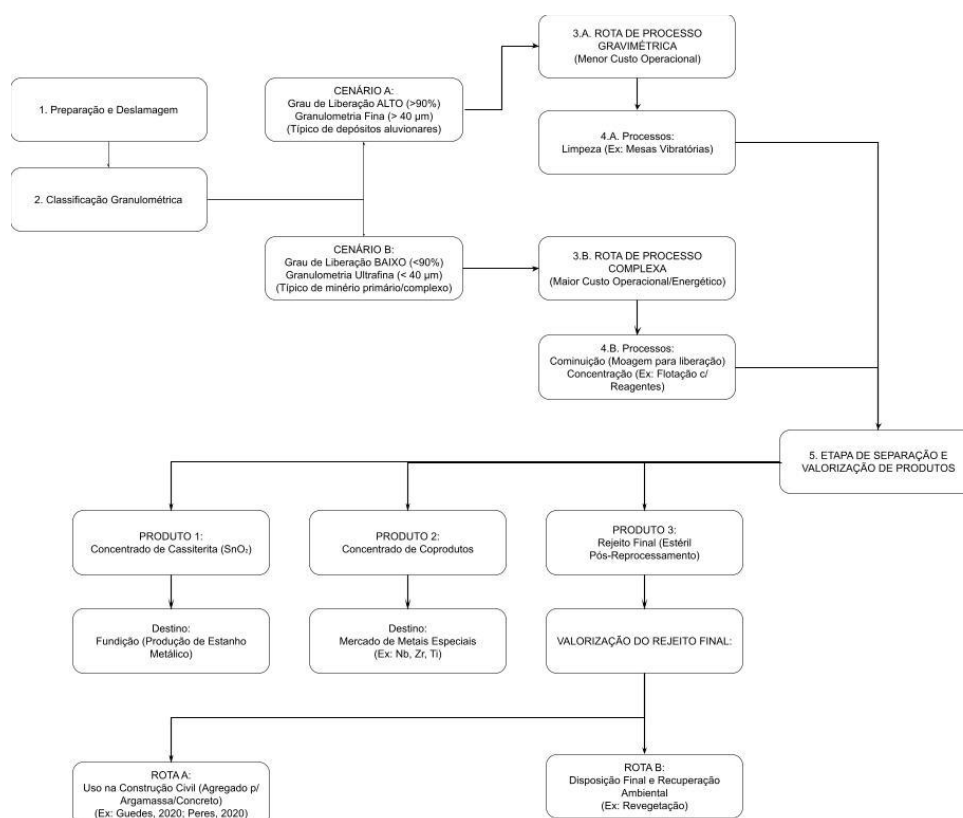
estudarem rejeitos antigos na Alemanha. Os autores demonstraram que a flotação convencional, utilizando coletores à base de sulfosuccinamato, foi capaz de recuperar cerca de 80% da cassiterita na faixa granulométrica fina ($<50\mu\text{m}$), provando ser uma alternativa viável para "resgatar" o estanho contido nas lamas, onde a gravidade falha.

Em síntese, a análise comparativa valida a rota gravimétrica como a escolha preferencial para os rejeitos aluvionares de Rondônia, devido ao seu baixo custo e alta eficiência comprovada para materiais liberados. Contudo, a incorporação de tecnologias avançadas para fins sugeridas por Li *et al.* (2023) oferece um caminho para maximizar a recuperação global, superando as limitações apontadas historicamente por Kahn *et al.* (1998) para granulometrias menores.

4.3. Fluxograma Conceitual para Reprocessamento de Rejeitos Aluvionares

Com base na análise da literatura, especialmente no sucesso da rota gravimétrica para rejeitos aluvionares, propõe-se um fluxograma conceitual otimizado para o reprocessamento de materiais com características similares aos encontrados no Garimpo Bom Futuro.

Figura 4.1 – Fluxograma Conceitual para Reprocessamento de Rejeitos de Estanho de Origem Aluvionar.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O fluxograma proposto visa maximizar a recuperação de valor e minimizar o descarte final, alinhando-se aos princípios da economia circular. As etapas são as seguintes:

Etapa 1 - Preparação e Deslamagem. O rejeito bruto (ROM - Run of Mine secundário) passa por desagregação (se necessário, para material compactado) e deslamagem. A deslamagem, tipicamente realizada em hidrociclones, remove a fração ultrafina (lama, < 40 microns). Esta etapa é crucial, pois, como visto na Revisão Bibliográfica, os ultrafinos aumentam a viscosidade da polpa e reduzem drasticamente a eficiência dos equipamentos de separação gravimétrica.

Etapa 2 - Classificação Granulométrica. O material deslamado (areia) é classificado por peneiramento em diferentes faixas granulométricas, otimizando a alimentação para os equipamentos subsequentes (ex: fração grossa e fração fina).

Etapa 3 - Concentração Primária. A separação gravimétrica inicial é realizada em equipamentos de alta capacidade e menor precisão. A fração grossa pode ser processada em Jigues, enquanto a fração fina é alimentada em Espirais Concentradoras. Esta etapa divide o fluxo em um pré-concentrado de minerais pesados e um primeiro fluxo de rejeito (que segue para a Etapa 5).

Etapa 4 - Concentração de Limpeza. O pré-concentrado da Etapa 3 é reprocessado em equipamentos de maior precisão e menor capacidade, como as Mesas Vibratórias. Esta etapa é tecnicamente validada pelos resultados de alta performance de Linhares *et al.* (2023) , que utilizaram mesas para obter o concentrado final.

Etapa 5 - Produtos Finais. Esta rota otimizada gera três fluxos de materiais distintos, cada um direcionado a uma rota de valorização específica:

Produto 1 - Concentrado de Cassiterita (SnO_2). O produto primário de alto valor (ex: 31,31% SnO_2), pronto para ser reintegrado à cadeia produtiva (fundição).

Produto 2 - Concentrado de Coprodutos (Nb , Ta , Zr). Minerais pesados como columbita, tantalita e zircão, que possuem densidade similar à cassiterita, irão se concentrar juntos. Este fluxo secundário de alto valor agregado é direcionado para a valorização química.

Produto 3 - Rejeito Final (Inerte). Material empobrecido, composto majoritariamente pela ganga (quartzo e alumina), direcionado para as rotas de valorização de baixo valor agregado ou disposição final.

4.4. Discussão Integrada das Rotas de Valorização

A implementação de um projeto de reprocessamento de rejeitos não deve se limitar à recuperação do mineral principal (cassiterita). Para garantir a sustentabilidade econômica e ambiental, é imperativo adotar uma visão holística que contemple a valorização de todos os fluxos de saída gerados pelo fluxograma proposto, operacionalizando os princípios da economia circular na mineração.. A literatura recente aponta para um cenário onde o rejeito deixa de ser um passivo ambiental armazenado em barragens para se tornar um subproduto com múltiplas aplicações industriais.

No entanto, essa transição do status de "resíduo" para "produto" não é automática nem isenta de desafios. A análise bibliográfica revela uma dualidade crítica: de um lado, autores demonstram o potencial tecnológico e a viabilidade técnica de novas aplicações (visão de "ativos"); de outro, estudos alertam para as limitações impostas pela composição química, riscos radiológicos e viabilidade econômica (visão de "passivos" ou cautela). O Quadro 4.3 sintetiza essas perspectivas divergentes e complementares, confrontando as oportunidades de valorização com os critérios de cautela necessários para sua viabilização.

Quadro 4.3 – Síntese das Perspectivas de Valorização versus Limitações Técnicas e Ambientais dos Rejeitos de Estanho.

Perspectiva	Autor(es) / Ano	Enfoque Principal	Argumento Central
Valorização (Potencial Tecnológico e Aplicação)	Elshwehy <i>et al.</i> (2025)	Alta Tecnologia (Energia)	O rejeito beneficiado possui propriedades eletroquímicas ideais para eletrodos de supercapacitores, agregando altíssimo valor.
	Silva (2018)	Geologia e Prospecção (Rondônia)	A morfologia e química mineral da cassiterita e zircão na província de Rondônia indicam alto potencial para recuperação de coprodutos estratégicos.
	Guedes (2020) e Rocha (2022)	Construção Civil	Estudos práticos em Ariquemes comprovam a viabilidade técnica do uso de rejeitos na fabricação de argamassas e bloquetes (pavers).
	Leocádio (2022)	Construção Civil	A escória (subproduto) possui alta densidade, sendo viável técnica e economicamente para argamassas de blindagem radiológica.
	Baziotis e Chandrinos (2011)	Indústria de Cimento	A presença residual de SnO ₂ atua como mineralizador, melhorando a formação do clínquer e reduzindo o consumo energético.

	Li <i>et al.</i> (2023)	Recuperação Mineral	Tecnologias avançadas permitem recuperar estanho de lamas ultrafinas, transformando perda em receita.
Limitação / Cautela (Risco e Controle)	Sanusi <i>et al.</i> (2021)	Segurança Radiológica	Alerta crítico para a presença de radionuclídeos (TENORM) em rejeitos de estanho globais ("Amang"), exigindo controle rigoroso.
	Peres (2020)	Caracterização Química (Bom Futuro)	Identificação de metais como Chumbo (Pb) e Zinco (Zn) no rejeito bruto, exigindo monitoramento para evitar lixiviação no ambiente.
	Santos & Ribeiro (2025)	Caracterização Geoambiental	Embora os teores de contaminantes sejam baixos em algumas amostras do Bom Futuro, a validação analítica é obrigatória para garantir a segurança.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base nas referências citadas

A análise do Quadro 4.3 evidencia que a viabilidade técnica mecânica da aplicação dos rejeitos na construção civil já é uma realidade consolidada pelos estudos regionais de Guedes (2020) e Rocha (2022), que validaram o uso do material em argamassas e pavimentos na própria região de Ariquemes. Adicionalmente, Silva (2018) reforça o potencial geológico, destacando que a mineralogia de Rondônia favorece a recuperação de coprodutos valiosos.

Contudo, a viabilidade ambiental atua como fator limitante ou "filtro" para essas aplicações. O contraponto entre o cenário internacional de Sanusi *et al.* (2021), que aponta riscos radiológicos severos, e os dados locais de Peres (2020), que identificou a presença de metais pesados no rejeito bruto, define a complexidade do licenciamento. Embora Santos e Ribeiro (2025) tragam dados mais otimistas sobre a baixa toxicidade de amostras recentes, a variabilidade apontada na literatura exige que qualquer rota de valorização seja precedida por uma caracterização rigorosa para garantir a segurança ambiental e humana.

4.4.1. Recuperação de Cassiterita para Aplicações Tecnológicas Avançadas

Tradicionalmente, o concentrado de cassiterita obtido é direcionado exclusivamente para a metalurgia do estanho. No entanto, pesquisas recentes abrem portas para nichos de mercado de altíssimo valor agregado. Elshwehy *et al.* (2025) demonstraram que a cassiterita beneficiada fisicamente a partir de rejeitos de mineração (com pureza de fase confirmada por DRX) apresenta propriedades eletroquímicas excepcionais, podendo ser utilizada como material de eletrodo para supercapacitores. O estudo comprovou que o mineral possui uma estrutura porosa natural e estabilidade cíclica que favorecem o armazenamento de energia, oferecendo uma alternativa sustentável aos materiais sintéticos. Essa rota coloca o produto do

reprocessamento de Rondônia na cadeia de suprimentos da transição energética e de dispositivos eletrônicos avançados.

Expandindo esse horizonte, a revisão conduzida por Keke *et al.* (2025) consolida o estanho como um metal estratégico para a "nova era" tecnológica. Os autores destacam que, além do armazenamento de energia, os óxidos de estanho (SnO e SnO_2) derivados da cassiterita são fundamentais para:

Indústria Aeroespacial e Novos Componentes Energéticos: Devido à sua resistência e propriedades físico-químicas em ligas avançadas.

Eletrônica de Ponta e Sensores: O SnO_2 é amplamente aplicado como semicondutor do tipo-p, em transistores e como condutor transparente em telas e dispositivos fotovoltaicos, devido à sua gap de banda larga e alta mobilidade de elétrons.

Supercondutividade: Ligas cristalinas à base de estanho e nióbio mantêm propriedades supercondutoras mesmo sob campos magnéticos extremos, sendo vitais para equipamentos científicos e médicos de alta precisão.

Essa diversidade de aplicações de alto valor agregado reforça a importância da caracterização química detalhada dos rejeitos de Rondônia. Para que a cassiterita do Garimpo Bom Futuro atenda a esses nichos tecnológicos (como semicondutores e sensores), ela deve possuir baixos níveis de impurezas deletérias. Nesse sentido, os estudos de Silva (2018) sobre a química mineral na província e a caracterização recente de Santos e Ribeiro (2025), que atestou baixos teores de contaminantes críticos no rejeito, sugerem que o material local possui o perfil geoquímico necessário para transcender o mercado de soldas e ingressar na cadeia de suprimentos da alta tecnologia.

4.4.2. Aplicação do Rejeito Final na Indústria da Construção Civil

O fluxo de maior volume gerado no reprocessamento é o rejeito final (areia empobrecida em minerais pesados). Sua transformação em produto comercial é essencial para eliminar a necessidade de novas barragens. A aplicação direta como agregado miúdo na produção de argamassas e artefatos de concreto (pavers, blocos) já possui validação técnica mecânica consolidada pelos estudos regionais de Guedes (2020) e Rocha (2022). Além disso, uma aplicação inovadora e de alto valor para os resíduos da cadeia do estanho em Rondônia foi investigada por Leocádio (2022), que analisou a escória da metalurgia da cassiterita (um subproduto da etapa de fundição, subsequente ao beneficiamento mineral) proveniente de Ariquemes/RO, como Argamassa para Blindagem Radiológica.

O estudo comprovou que, devido à sua alta massa específica ($2,99 \text{ g/cm}^3$), esse material pode ser utilizado como agregado miúdo em argamassas para blindagem de raios X e Gama, apresentando atenuação de até 52% da radiação em espessuras de 50 mm. Embora o foco seja a escória, esse achado reforça o potencial dos subprodutos da mineração de estanho da região para nichos específicos da construção civil que exigem materiais de alta densidade.

Uso na Indústria de Cimento (Mineralizador): Uma rota inovadora é sugerida por Baziotis e Chandrinos (2011). Os autores identificaram que a presença residual de SnO_2 (em teores baixos, como 0,5% a 1,0%) na farinha crua de cimento atua como um mineralizador eficaz durante a clinquerização. O óxido de estanho favorece a formação da alita (C_3S), principal fase responsável pela resistência do cimento, e melhora a queimabilidade da mistura. Isso significa que o rejeito de estanho poderia ser incorporado à alimentação de fornos de cimento não apenas como substituto de sílica, mas como um aditivo de performance, agregando valor químico ao material.

4.4.3. Viabilidade Ambiental e Segurança Radiológica

A viabilidade comercial das rotas de construção civil está estritamente condicionada à segurança ambiental. A literatura apresenta um contraste importante que favorece o contexto brasileiro:

Cenário Internacional (Alerta): Sanusi *et al.* (2021), ao estudarem rejeitos de estanho na Malásia ("Amang"), alertaram para a presença crítica de radionuclídeos naturais (TENORM), com concentrações de Urânio e Tório que excedem os limites de segurança para uso em materiais de construção habitacional, exigindo monitoramento radiológico rigoroso.

Cenário Bom Futuro (Oportunidade): Em contrapartida, a caracterização química recente de Santos e Ribeiro (2025) em amostras do Garimpo Bom Futuro revelou um perfil geoquímico muito mais favorável. Os autores reportaram teores de metais tóxicos (Chumbo $< 0,01\%$, Arsênio $< 0,02\%$, Cádmio $< 0,01\%$) substancialmente abaixo dos limites perigosos.

Apesar desses indicadores positivos, a classificação do material segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2024) permanece obrigatória. A presença de elementos como Ferro e Alumínio, apontada por Peres (2020), exige a realização de ensaios de lixiviação NBR 10005 (ABNT, 2004) e solubilização NBR 10006 (ABNT, 2004) para garantir que o rejeito seja classificado como "Resíduo Inerte (Classe II B)", condição *sine qua non* para sua aplicação segura em obras civis sem risco de contaminação do solo ou lençol freático.

4.4.4. Estratégias de Recuperação Ambiental

Para a fração do material que não for absorvida pelo mercado (como lamas ultrafinas ou estéreis remanescentes), a disposição final deve ser acompanhada de recuperação ecológica imediata. Nurtjahya *et al.* (2009) destacam que o sucesso na revegetação de áreas de mineração de estanho depende da seleção de espécies nativas adaptadas a solos pobres e arenosos, essenciais para a estabilização física do substrato.

Complementarmente, para validar a eficiência desse processo de restauração ecológica ao longo do tempo, o uso de tecnologias de monitoramento remoto torna-se uma ferramenta valiosa. Conforme sugerido por Rodrigues (2025) em estudos de áreas descaracterizadas, a aplicação de geoprocessamento e índices de vegetação (como o NDVI) permite acompanhar a evolução da cobertura vegetal de forma contínua, assegurando que a reintegração da área ao ecossistema ocorra de maneira efetiva e sustentável, fechando o ciclo do reprocessamento com responsabilidade ambiental.

4.5. Limitações e Lacunas na Literatura Regional

A consolidação de uma discussão mais aprofundada sobre a viabilidade industrial das rotas propostas neste trabalho esbarra, inevitavelmente, em uma barreira natural: a incipiência da literatura técnica dedicada especificamente à revalorização tecnológica dos rejeitos aluvionares da Província Estanífera de Rondônia. Embora este estudo tenha estabelecido correlações robustas com cenários internacionais análogos, a transposição direta de tecnologias ainda carece de validação experimental local.

A revisão bibliográfica evidenciou um descompasso entre o avanço global e a produção científica regional. Enquanto autores internacionais como Li *et al.* (2023) e Leistner *et al.* (2016) apresentam dados detalhados sobre o comportamento hidrodinâmico de lamas de cassiterita e a eficiência de novos reagentes de flotação, os estudos regionais disponíveis, como os de Peres (2020) e Linhares *et al.* (2023), concentram-se predominantemente na caracterização básica e na concentração gravimétrica convencional. Existe, portanto, uma lacuna de dados sobre a resposta específica dos finos de Rondônia às tecnologias centrífugas e à flotação moderna, o que limita a discussão a inferências teóricas baseadas na mineralogia comparada.

No campo das novas aplicações, a dificuldade de aprofundamento é ainda mais notória. A rota inovadora de uso da cassiterita em supercapacitores, validada por Elshwehy *et*

al. (2025) com minérios do Egito, ainda não possui contrapartida na literatura brasileira. Da mesma forma, o uso de resíduos em blindagem radiológica, explorado com sucesso por Leocádio (2022) para a escória de fundição, carece de estudos que testem a aplicação direta do rejeito bruto de barragem (areia fina) para a mesma finalidade.

Essa escassez de literatura específica não invalida as propostas aqui apresentadas, mas destaca o caráter pioneiro da presente análise. O "estado da arte" atual permite confirmar a viabilidade mineralógica e mecânica (construção civil básica), mas o avanço para aplicações de alta tecnologia e a otimização metalúrgica fina dependem de um novo ciclo de pesquisas aplicadas que preencham o vácuo entre o potencial geológico de Rondônia e as demandas da indústria 4.0.

5. CONCLUSÃO

Este estudo avaliou o potencial de reprocessamento dos rejeitos provenientes da mineração de estanho na Província Estanífera de Rondônia, demonstrando que a transformação desse passivo ambiental em um ativo econômico é técnica e ambientalmente viável. A análise integrada dos dados revelou que a origem geológica do depósito é o fator determinante para o sucesso do empreendimento.

Diferentemente de minérios primários encontrados em outras regiões do mundo, que exigem processos onerosos de moagem e flotação química complexa, os rejeitos aluvionares de Rondônia beneficiam-se de um "pré-tratamento" natural causado pelo intemperismo. Foi constatado que esse processo geológico garante um alto grau de liberação da cassiterita, permitindo que técnicas de concentração gravimétrica, que operam com baixo custo e sem reagentes agressivos, alcancem eficiência suficiente para a produção de concentrados comerciais.

Além da viabilidade técnica, o estudo identificou um diferencial competitivo crucial para a região: o perfil geoquímico favorável dos rejeitos. A baixa concentração de contaminantes tóxicos e a ausência de níveis críticos de radioatividade, em contraste com depósitos internacionais análogos, reduzem significativamente as barreiras ambientais. Essa característica não apenas facilita o licenciamento, mas também valida a segurança para a aplicação do resíduo final inerte na indústria da construção civil e na pavimentação, fechando o ciclo produtivo.

Contudo, é necessário reconhecer as limitações desta pesquisa. Por tratar-se de uma revisão bibliográfica, os resultados baseiam-se em correlações teóricas e dados comparativos. A transposição dessas conclusões para uma escala industrial carece de validação experimental direta, especialmente no que tange ao comportamento das partículas ultrafinas locais frente a tecnologias de centrifugação.

Para consolidar as rotas propostas e preencher as lacunas identificadas, sugere-se que trabalhos futuros foquem em três vertentes práticas:

- Realização de ensaios laboratoriais com amostras representativas para quantificar a recuperação real na fração de finos;
- Execução de testes piloto para validar o uso dos concentrados em aplicações de alta tecnologia, como armazenamento de energia;

- Condução dos ensaios normativos de lixiviação e solubilização para certificar juridicamente o rejeito como agregado para a construção civil.

Em suma, o reprocessamento dos rejeitos do Garimpo Bom Futuro transcende a simples recuperação mineral; ele representa uma estratégia de engenharia capaz de reintegrar recursos valiosos à cadeia produtiva, mitigando riscos geotécnicos e promovendo uma mineração verdadeiramente alinhada aos princípios da sustentabilidade e da economia circular.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas; Resíduos sólidos - Classificação Parte 1: Requisitos de classificação, **NBR 10004-1**, Rio de Janeiro, 2024.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas; Resíduos sólidos - Classificação Parte 2: Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR), **NBR 10004-2**, Rio de Janeiro, 2024.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas; Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido, **NBR 10005**, Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas; Procedimento para Obtenção de Extrato solubilizado de Resíduos Sólidos, **NBR 10006**, Rio de Janeiro, 2004.
- BAZIOTIS, I; CHANDRINOS, A. Study the critical role of admixtures in cement production: the optimum state of cassiterite (SnO_2) addition as a natural mineralizer-oxide influencing the cement properties. **Advances in Chemical Engineering and Science**, [S. l.], v. 1, p. 215-223, 2011.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Mineração. **Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 fev. 2022.
- ELSHWEHY, R. A. *et al.* Beneficiated Cassiterite (SnO_2) from Mining Tailings-To-Renewable Energy Storage Material: Unlocking the Potential Sustainability. **Clean Energy**, zkaf066, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/ce/zkaf066>.
- GAUDIN, A. M. **Principles of Mineral Dressing**. McGraw-Hill Book Company, Incorporated, 1939.
- GUEDES, L. K. A. **Análise da substituição parcial do agregado miúdo em argamassas por rejeito de cassiterita**. 2020. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Faculdade de Educação e Meio Ambiente, Ariquemes, 2020.
- KAHN, Henrique *et al.* Caracterização de produtos de processamento de minérios de estanho com o auxílio de análise de imagens conjugada à microscopia eletrônica de varredura. 1998, Anais.. São Paulo: **Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**, 1998. p. 189-201. Disponível em: https://www.artigos.entmme.org/?wpfb_s=caracteriza*C3*A7*C3*A3o%de%produtos%de%processamento. Acesso em: 01 jul. 2025.
- KEKE, M; EZEUGO, J. O; NNANWUBE, I. A.; ONUKWULI, O. D. Cassiterite Leaching in Hydrometallurgy: A Review. **Global Journal of Engineering and Technology Advances**, [S. l.], v. 24, n. 02, p. 001-013, 2025.
- LEOCADIO, L. P. **Análise da escória da metalurgia da cassiterita para utilização como agregado miúdo para a produção de argamassas de blindagem de raios X e Gama**. 2022. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. Disponível em:

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-23122022-151833/>. Acesso em: 19 nov. 2025.

LEISTNER, T. *et al.* **A study of the reprocessing of fine and ultrafine cassiterite from gravity tailing residues by using various flotation techniques.** *Minerals Engineering*, v. 96, p. 94-98, 2016.

Li, H. *et al.* Advances in Flotation Reagents for Cassiterite Separation: Challenges and Sustainable Solutions. **Molecules**, v. 30, n. 11, p. 2380, 2023.

LINHARES, I. C.; SILVA, A. C.; SILVA, E. M. S. Uso de mesa vibratória na recuperação de cassiterita do rejeito de espirais concentradoras. **Revista Foco**, Curitiba, v. 16, n. 12, p. 01-11, 2023.

MORAES, S. L. *et al.* Rejeitos de mineração: um olhar do cenário brasileiro - Parte I: Cadeia produtiva. In: **SIMPÓSIO DE MINERAÇÃO**, 18., 2017, São Paulo. Anais... São Paulo: ABM, 2017.

NURTJAHYA, E.; SETIADI, D.; GUHARDJA, E.; SETIADI, Y. M. Establishment of four native tree species for potential revegetating of tin-mined land in Bangka Island, Indonesia. In: **Proceedings of the third International Conference on Mine Closure**, 9., 2009, Perth. Anais [...]. Perth: Australian Centre for Geomechanics, p. 751 – 758, 2009.

PERES, G. L. **Caracterização do rejeito de minério de cassiterita do garimpo Bom Futuro em Ariquemes RO.** 2020. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Faculdade de Educação e Meio Ambiente, Ariquemes, 2020.

ROCHA, C. O. **Fabricação de bloquetes com utilização de areia de rejeito de garimpo de Ariquemes.** 2022. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro Universitário FAEMA, Ariquemes, 2022.

RODRIGUES, Viviane Soares. **Análise multitemporal da recuperação de áreas descaracterizadas de barragens de rejeito da mina engenho d' água por meio de geoprocessamento.** 2025. 54 p. Monografia (Projeto Final em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2025

SAMPAIO, C.; TAVARES, L. M. M. **Beneficiamento Gravimétrico: Uma Introdução Aos Processos De Concentração Mineral E Reciclagem De Materiais Por Densidade.** Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 603 p.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (Ed.). **Tratamento De Minérios: Práticas Laboratoriais.** Rio de Janeiro: CETEM, 2007. 570 p.

SANUSI, M. S. M. *et al.* Radiological hazard associated with amang processing industry in Peninsular Malaysia and its environmental impacts. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 208, 2021.

SANTOS, Jessé Castro dos; RIBEIRO, Sylviane Beck. Caracterização química e determinação de elementos contaminantes em cassiterita de baixo teor proveniente do Garimpo Bom Futuro (RO), Amazônia Ocidental. **Revista ReGeo**, São José dos Pinhais, v. 16, n. 5, p. 1-16, 2025.

SANTOS, R. V. *et al.* Caracterização geológica e potencial metalogenético da Província Estanífera de Rondônia. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 51-64, 2000.

SILVA, L. C. **Morfologia e química mineral de zircão e cassiterita, em concentrados de bateia, como guia prospectivo para mineralizações de Sn na Província Estanífera de Rondônia**. 2018. 63 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

TAVARES, C. A. D.; BARBOSA, W. L. J. Geologia E Mineralogia Acessória De Pegmatitos Mineralizados Em Cassiterita, Mina Bom Futuro, Rondônia. **Holos Environment**, 2016.