

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Faculdade de Engenharia de Minas

Especialização em Engenharia de Recursos Minerais (CEERMIN)

Paulo Henrique Guimarães de Souza

**ESTIMATIVA DO MERCADO DE VANÁDIO SECUNDÁRIO NO
BRASIL**

Belo Horizonte

2024

Paulo Henrique Guimarães de Souza

**ESTIMATIVA DO MERCADO DE VANÁDIO SECUNDÁRIO NO
BRASIL**

**Monografia de especialização
apresentada à Faculdade de
Engenharia de Minas da Universidade
Federal de Minas Gerais, como
requisito parcial à obtenção do título
de Especialista em Engenharia de
Recursos Minerais.**

Orientadora: Sonia Denise Ferreira Rocha

Belo Horizonte

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MINAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO MONOGRAFIA/ARTIGO

Aos vinte e três dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e quatro, de 08h:00min às 11h:15min, o estudante Paulo Henrique Guimarães de Souza, matrícula 2023662405 defendeu o Trabalho intitulado “**ESTIMATIVA DO MERCADO DE VANÁDIO SECUNDÁRIO NO BRASIL**”.

Participaram da banca examinadora os professores abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar, assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 91

Situação: Aprovado

Orientadora: Professora Sônia Denise Ferreira Rocha

Examinador: Professor Guilherme de Souza Papini

Examinador: Professor Hugo César Coelho Michel



Documento assinado eletronicamente por **Hugo Cesar Coelho Michel, Professor do Magistério Superior**, em 22/01/2025, às 11:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sonia Denise Ferreira Rocha, Professora do Magistério Superior**, em 30/01/2025, às 13:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme de Souza Papini, Usuário Externo**, em 07/02/2025, às 16:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Resumo

A mineração e a metalurgia, devido ao uso de recursos não renováveis, constituem atividades em que a busca por sustentabilidade é um desafio constante. Por outro lado, os metais além de serem essenciais para a sociedade, desempenham papel chave na transição energética, portanto, o setor requer expansão, na contramão da necessidade da sustentabilidade. Nesse artigo, se buscou entender as melhores fontes de recuperação de vanádio e o dimensionamento do potencial mercado brasileiro. Para tanto, buscas por artigos possibilitaram entender os processos envolvidos, matérias primas necessárias, o que, correlacionado com variáveis de outras fontes de dados, possibilitou estimar o vanádio a ser recuperado anualmente, no Brasil, e valores de mercado. Por fim, conclusões a respeito desse mercado foram sintetizadas. A lama vermelha seria a fonte mais importante de vanádio secundário, por outro lado, cinzas de queima de óleo seriam quase irrelevantes. O potencial de vanádio recuperado seria da ordem de 16mil toneladas anuais.

Palavras-chave: vanádio; recuperação; mineração urbana; fontes secundárias.

“FORECASTS FOR THE VANADIUM SECONDARY MARKET IN BRAZIL”

Abstract:

Mining and metallurgy, due to the use of non-renewable resources, are activities in which the pursuit of sustainability is an ongoing challenge. On the other hand, metals are essential to society and play a key role in the energy transition; therefore, the sector requires expansion, contrary to the need for sustainability. This article aims to understand the best sources for vanadium recovery and the potential size of the Brazilian market. To this end, searches for articles helped understand the processes involved, raw materials needed, which, when correlated with variables from other data sources, allowed for the estimation of the vanadium to be recovered annually in Brazil and market values. Finally, conclusions regarding this market were synthesized. Red mud would be the most important source of secondary vanadium, whereas oil ash would be almost irrelevant. The potential for recovered vanadium would be on the order of 16,000 tons per year.

Keywords: vanadium; recovery; urban mining; secondary sources.

Lista de Figuras

- Figura 1 - Evolução da produção e consumo do vanádio10
- Figura 2 - Diagrama de blocos do processo de obtenção do pentóxido de nióbio12
- Figura 3 - Economia linear versus economia circular **Erro! Indicador não definido.**

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Tabela de resultados por fontes secundárias. | 19 |
|--|----|

Sumário

| | |
|---|----|
| 1. Introdução..... | 9 |
| 2. Objetivos | 10 |
| 3. Desenvolvimento..... | 10 |
| 3.1. Metalurgia Primária do Vanádio | 11 |
| 3.2. Mineração Urbana e Recuperação de Metais | 12 |
| 3.3. Recuperação do Vanádio de Fontes Secundárias | 14 |
| 3.3.1. Recuperação do Vanádio de Cinzas de Queima de Óleo Pesado (Heavy Oil Fly Ash)..... | 15 |
| 3.3.2. Recuperação do Vanádio de Catalisadores de Hidrodesulfurização e de Redução Catalítica Seletiva..... | 16 |
| 3.3.3 Recuperação do Vanádio de Resíduos de Mineração | 18 |
| 3.3.4 Cálculo de Recuperação do Vanádio de Resíduos de Mineração | 19 |
| 4. Considerações finais..... | 20 |
| 5. Referências bibliográficas | 21 |

1. INTRODUÇÃO

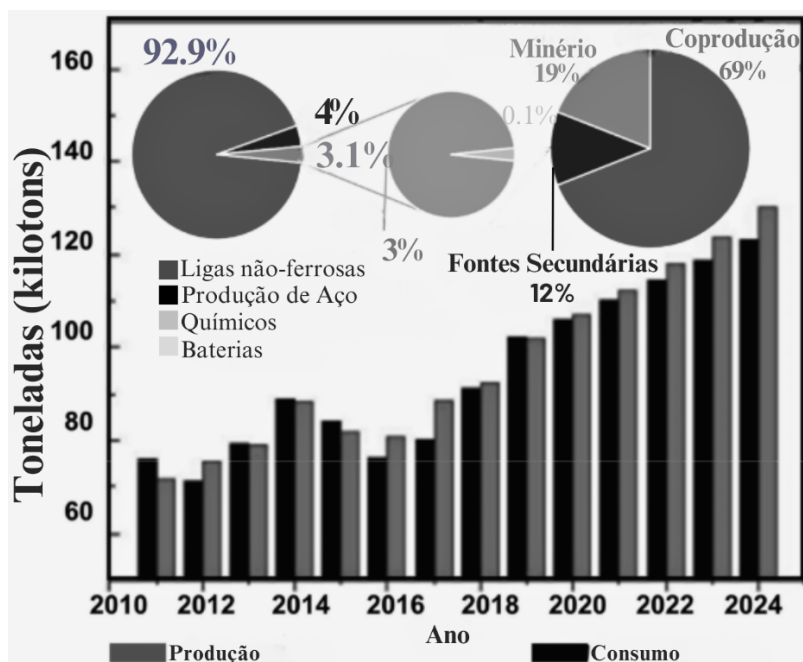
Há alguns anos o tema da sustentabilidade tem permeado todos os ambientes de negócio existentes, especialmente definidas na sigla ESG (*Environmental, Social and Governance*). O setor de mineração é especialmente visado nesse tema, e por diversos fatores, como a periculosidade dos processos, o uso intensivo de energia e água, e os demais impactos ambientais e sociais, dentre outros (1,2,3).

Outro aspecto relacionado à sustentabilidade da atividade mineral é uma possível falta de matéria prima de diversas aplicações, incluindo as relacionadas à transição energética. Algumas dessas matérias primas minerais estão sujeitas à quebra da cadeia de suprimentos, e dependendo da sua importância para o desenvolvimento de um país ou de sua importância econômica, podem ser classificadas como crítico e/ou estratégico. Essa quebra pode estar relacionada à reservas exauridas, à concentração da produção em poucos países, bem como a eventos geopolíticos e à outras variáveis (4,5).

O vanádio é um exemplo de material considerado crítico pela União Europeia desde 2017, embora não tenha constado nas análises de 2011 e 2014. A mudança de classificação está relacionada ao maior risco na cadeia de suprimentos, embora sua importância econômica tenha decrescido de acordo com a metodologia empregada (4,5). Apesar do decréscimo econômico da criticidade do vanádio apontada por esta metodologia, a produção de vanádio passou de 76.000 toneladas métricas em 2011 para 123.350 em 2023. China, Rússia, África do Sul, Brasil, Estados Unidos e Austrália são os maiores produtores (6,7).

A evolução do uso do vanádio em diversas aplicações pode ser visualizada na Figura 1. Suas principais aplicações são em ligas ferrosas, como aços de baixa liga e alta resistência, e ligas não ferrosas com titânio e cromo, respondendo por 96,9% do total do consumo deste metal (6). Outros 3% são usados em substâncias químicas usadas em fotografia, indústria têxtil, pesticidas e pigmentos, e 0,1% em baterias (7,8).

Figura 1- Evolução da produção e consumo do vanádio



Fonte: Adaptado de Wolowicz et al. et al. (2022) (8).

2. OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho incluem definir quais são as melhores fontes para se recuperar vanádio, quantificar o potencial de mercado de tais fontes no Brasil, analisar o processo de mineração urbana do vanádio e estimar a quantidade de vanádio que poderia ser recuperado anualmente.

3. DESENVOLVIMENTO

O presente trabalho foi desenvolvido com base em pesquisa bibliográfica e cálculos. De início, buscou-se entender a metalurgia primária do vanádio, seus principais minerais de interesse, processos de obtenção e concentrações. Em seguida, fez-se uma pesquisa a respeito de mineração urbana e recuperação secundária em geral, buscando contextualizar o tema no momento atual, além de pesquisa dos usos de vanádio, maiores produtores e outras questões de mercado.

As principais fontes de matéria prima secundária de vanádio foram identificadas em artigos, bem como os rendimentos de recuperação para cada tipo de matéria prima. Consultando publicações de instituições econômicas e setoriais, bem como cálculos,

foram estimadas a produção de vanádio de tais fontes, bem como quanto de vanádio poderia ser recuperado de cada uma. Por fim, conclusões sumarizaram os principais resultados.

3.1. METALURGIA PRIMÁRIA DO VANÁDIO

Apesar da existência da vanadinita, principal mineral de vanádio, do grupo das apatitas de fosfato, com química $Pb_5(VO_4)_3Cl$, esse metal não ocorre usualmente como minerais primários, concentrado em depósitos como em outros metais, sendo geralmente encontrado em outros minerais, como íon substituto de Fe^{3+} ou Al^{3+} , como exemplos, pode-se citar a magnetita, coulsonita e ilmenita (6,9,10).

A extração do vanádio primário se dá a partir de magnetitas contendo titânio (VTM – *Vanadium-containing Titanium Magnetites*), de onde se retira de 75-85% do vanádio produzido através de minérios, no mundo (6). Titanomagnetitas são a principal fonte mineral de vanádio na China, Rússia e têm grande importância na África do Sul. Nos EUA o vanádio é encontrado em carnotita, roscoelita, vanadinita e mottramita. Cerca de 46 países possuem atividades com produção de vanádio, e em associações de minerais (5,6).

Como ocorre em pequenas proporções em outros minerais, a principal rota de produção é através da extração a partir de escórias da produção de aço, correspondendo a 69% da produção mundial. Outros 19% são advindos da produção primária e 12% da produção secundária (6).

Segundo Yuan et al. (2021), diferentes materiais constituídos por vanádio apresentam interesse comercial, tais como a escória de vanádio e outras matérias primas derivadas, V_2O_3 e V_2O_5 , bem como ligas de vanádio e vanádio metálico (6).

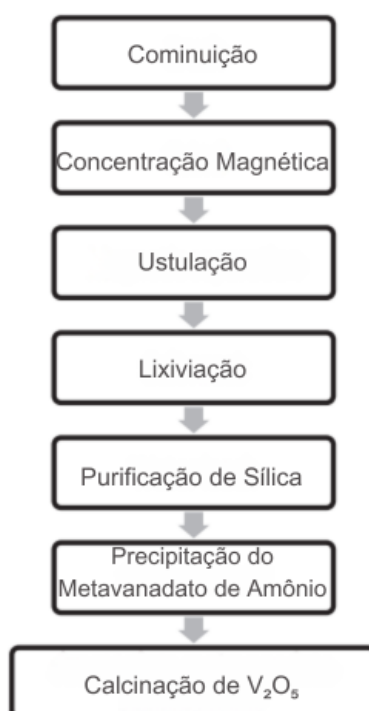
Dada a variedade de matérias primas envolvidas na obtenção do vanádio, em suas diferentes formas, diversos métodos coexistem. Aqui serão brevemente descritos os processos mais comuns, utilizados em sua obtenção a partir da escória ferrosa e de ligas titanomagnetitas, também encontrados em outras rotas.

O minério concentrado ou a escória de aço ou de VTM, são moídos, sendo concentrados posteriormente por separação magnética. O carbonato de sódio ou cloreto de sódio é adicionado e a mistura é aquecida a 800-1000 °C, convertendo o vanádio em

sais solúveis em água. A ustulação oxidante transforma as formas V^{3+}/V^{4+} em V^{5+} , promovendo uma elevação da solubilidade dos compostos de vanádio (6).

Em meio neutro e básico, íons de di-hidrogênio vanadatos se formam e, após redução do pH a 2,0, precipitam na forma pentavalente. Também é possível utilizar íons amônio para obter metavanadato de amônio. O precipitado é então, calcinado, originando o pentóxido de vanádio ou trióxido de vanádio, se for uma ustulação em atmosfera redutora (6).

Figura 2- Diagrama de blocos do processo de obtenção do pentóxido de nióbio



Fonte: Adaptado de Giligan et al. (11)

Caso o interesse seja obter vanádio puro, diferentes métodos, como aluminotermia, eletrorredução (eletrólise ígnea, eletro oxidação, eletrodessulfuração) podem ser utilizados (4,6).

3.2. Mineração Urbana e Recuperação de Metais

A temática da conservação ambiental das últimas décadas, se expandiu para sustentabilidade e, atualmente, está inserida no contexto mais global de Governança

social e ambiental (ESG), que urge para uma mudança na forma como o ser humano interage com o planeta.

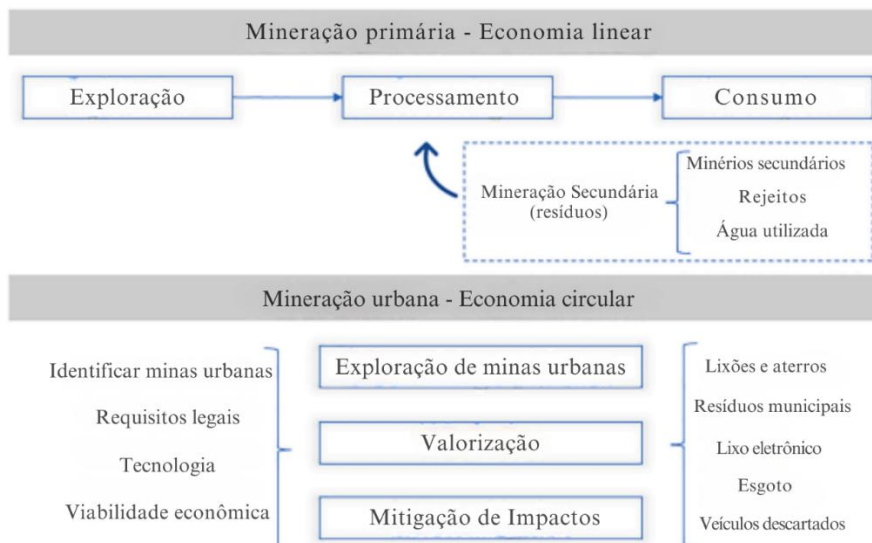
O objetivo da sociedade em termos de ESG também está associado com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU. Nesse contexto, a transição energética é um dos fatores chave para buscar o cumprimento da agenda de sustentabilidade. Entretanto, diversas matérias primas minerais e metálicas são necessárias para a mudança. A compatibilização da mineração primária, com inúmeros desafios de sustentabilidade com preconizados na agenda 2030 da ONU, alcance das metas estabelecidas pelos ODS e a plena aplicação da governança social e ambiental, apesar de complexa, é o cerne do desafio na busca de um planeta que mantenha as condições de vida (12).

Dentre as diversas iniciativas para tornar a exploração mineral mais sustentável, está mineração urbana, diretamente atrelada ao conceito de economia circular. A mineração urbana é baseada na recuperação de valores de fontes secundárias de matérias primas em fontes antropogênicas por meios químicos, físicos e biológicos (13,14,15).

Esse conceito proposto pode se confundir com outros conceitos como mineração em aterros, reciclagem, recuperação de recursos, minimização de resíduos, economia circular, entre outros. Entretanto, esses conceitos foram esclarecidos por Cossu & Williams (15), que explicam que tais conceitos são convergentes e podem se sobrepor em algumas situações. A figura 3 permite uma comparação entre a economia linear e a economia circular, na qual a mineração urbana se insere.

Embora tenha um caráter sustentável, as operações da recuperação de metais podem criar condições insalubres. A recuperação de sucata pode expor trabalhadores a contaminação por metais como antimônio, cádmio, cromo, arsênico e chumbo. Em países menos desenvolvidos, as etapas de coleta podem ser feitas como um meio de subsistência, com poucos ganhos e riscos associados a aquisição de materiais (13,16).

Figura 3- Economia linear versus economia circular



Fonte: Adaptado de Xavier et al. (2023) (17).

As fases da recuperação de metais envolvem a logística de descarte dos produtos, a separação dos produtos, a desmontagem/desmantelamento, descaracterização, descontaminação e a recuperação (17).

Alguns processos tem diversas similaridades com a mineração convencional. Cominuição e separação podem ser ocorrer em moinhos, seguidos de separação densitária, magnética, associadas a classificação por peneiramento, dentre outros. Para recuperação dos metais, a pirometalurgia, eletrometalurgia, hidrometalurgia e bioprocessos podem ser utilizados (17).

3.3. RECUPERAÇÃO DO VANÁDIO DE FONTES SECUNDÁRIAS

O termo **mineração urbana** não é muito adequado para a recuperação do vanádio, já que este é um metal incomum nas fontes urbanas [7]. No entanto, o vanádio usualmente está contido em resíduos de algumas indústrias, de onde pode ser recuperado.

Entender o mercado de metalurgia secundária do vanádio é complexo já que mais de 90% do vanádio produzido é utilizado em ligas de aço e de titânio, as quais acabam sendo recicladas em outras ligas do mesmo tipo. Desta forma, são poucas as aplicações que utilizam o vanádio em sua forma pura, ou que tornem a recuperação do mesmo mais fácil. Isso explica o porquê apenas 14% das 110 mil toneladas métricas de vanádio

produzidos anualmente serem obtidos por essa rota. O potencial do mercado brasileiro pode ser estimado pela quantificação de cada rota já identificada (7).

Nas seções seguintes, as principais fontes secundárias de Vanádio são descritas, bem como os métodos de recuperação.

3.3.1. RECUPERAÇÃO DO VANÁDIO DE CINZAS DE QUEIMA DE ÓLEO PESADO (HEAVY OIL FLY ASH)

As cinzas da queima do óleo combustível pesado são ricas em níquel (Ni) e vanádio(V). Para cada 1000 litros de óleo queimados, 3kg de cinzas são geradas, das quais 64-97% são constituídas de carbono, e o resto são óxidos e sulfatos de alumínio, magnésio, zinco, ferro, níquel, vanádio e outros. De acordo com alguns estudos, o conteúdo de vanádio nas cinzas pode alcançar até 5% em massa. (18)

As pesquisas indicam que a extração de vanádio das cinzas pode ser feita por meio de lixiviação ácida, básica, biológica ou por água. No estudo de Navarro et al. (2007), 98% do Vanádio foi recuperado utilizando solução de 0,5M de H₂SO₄, na proporção de 4ml de solução por grama de cinza, durante 24 horas em temperatura ambiente e agitação a 200 rpm. De forma geral, recuperação de 50 a 99,6% foram observadas em escala de laboratório (19,20).

Após a lixiviação, um composto de amoniacal é utilizado para precipitação de vanádio, por exemplo o NH₄NO₃. Em estudo de Hakimi et al. (2020), utilizou-se nitrato de amônio (NH₄NO₃) como agente lixiviante, obtendo-se uma extração de 99,6% do vanádio. O vanadato de amônio originado é calcinado para formar V₂O₅. Temperaturas de 400 a 690 °C, durante tempos de 30 minutos a 1 hora foram reportados por Bakkar et. al. (2023) (18,20).

De acordo com dados abertos da ANEEL, de Maio de 2024, o Brasil contava com 2113 usinas termelétricas movidas a óleo diesel, com uma potência instalada de 3,59 GW além de 42 usinas movidas a óleo combustível, com uma potência de 2,8 GW. Juntas, estas respondem por 6,92% da capacidade termoelétrica instalada no país (21). Segundo estudo do Instituto de Meio Ambiente e Energia, produzidos com dados do Sistema Integrado Nacional (SIN), em 2022, 0,3 TWh foram gerados por óleo combustível e 0,5TWh foram gerados por óleo diesel (22).

Segundo Graus et al. (23), a eficiência de termoeletricas a óleo é de 38%. Dessa forma, pode-se calcular que foram necessários 2,1 TWh em óleo para produzir os 0,8TWh gerados em termoeletricas.

Cada litro de óleo possui cerca de 11,84 kWh de energia. Dessa forma, estima-se que em 2022, foram utilizados aproximadamente 177,36 milhões de litros de óleo diesel em termoeletricas. Considerando que cerca de 3kg de cinzas são gerados a cada 1000L de óleo queimado, estima-se uma geração de 532 toneladas de cinzas (18).

Se o conteúdo de vanádio pode chegar a 5%, Navarro et al. (2007) dependendo do tipo de óleo, dos contaminantes, entre outros, haveria um potencial de recuperação de 16 toneladas de vanádio (V_2O_5) ao ano em cinzas de termoeletricas movidas a óleo no Brasil. Com uma recuperação de 95%, é possível aproveitar cerca de 15 toneladas ao ano (19).

3.3.2. RECUPERAÇÃO DO VANÁDIO DE CATALISADORES DE HIDRODESULFURIZAÇÃO E DE REDUÇÃO CATALÍTICA SELETIVA

Catalisadores de processos de Hidrodesulfurização (*Spent Hydrodesulfurization* – HDS) são normalmente feitos de ligas de cobalto-molibdênio ou de ligas níquel-molibdênio e utilizados na produção de derivados de petróleo com reduzido conteúdo de compostos de enxofre. Após o uso dos catalisadores, cerca de 10% da massa restante do catalisador é composto por vanádio, oriundo do petróleo processado. O vanádio acaba se acumulando na forma de sulfetos em partes do catalisador, e acaba por bloquear o acesso dos reagentes, levando a desativação do material (7,24,25)

Já os catalisadores utilizados na Redução Catalítica Seletiva – SCR são usados para conversão de NO_x em N_2 , sendo compostos de V_2O_5 , TiO_2 e WO_3 . Nesses catalisadores, o amoníaco ou amônia reage, em temperaturas entre 200-450 °C, com os óxidos de nitrogênio, gerando N_2 e H_2O . Os principais consumidores são plantas termoeletricas, plantas de incineração e em veículos. Após o uso, a concentração dos metais iniciais não tem alteração significativa (7,26).

Não existem dados diretos sobre o consumo de catalisadores no Brasil, alguns estudos apontam que $1,2 \times 10^5$ toneladas de resíduos de catalisadores HDS são gerados anualmente no mundo (28,29).

O Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás mostra que em 2022, o Brasil tinha capacidade de refino de 2,3 milhões de barris de petróleo diários, enquanto que a capacidade mundial era de 102 milhões de barris por dia. Dessa forma, pode-se supor que o Brasil gere 2,3% dos resíduos de catalisadores HDS mundiais, ou 2.706 ton/ano (30). Entretanto, de acordo com Zhao et al. (2023), apenas 10% do resíduo de catalisadores HDS são compostos por vanádio, logo o potencial a ser recuperado é de 27,06 toneladas anuais (24,29,30).

Por outro lado, outro estudo apresenta vários rendimentos para a recuperação de vanádio de catalisadores de HDS, de onde se extrai 90% do vanádio, rendimento de valor conservador. Por fim se conclui que até 24,35 toneladas anuais de vanádio poderiam ser recuperadas deste tipo de catalisador (7).

Os catalisadores utilizados em redução catalítica direta -SCR são usados em diversas aplicações, sendo as principais em navios, automóveis, termoelétricas, caldeiras. O estudo de Lv et. al. (2023) (24), destaca que 1 milhão de toneladas de catalisadores SCR estão sendo usados na China em 2024. Os catalisadores SCR duram de 3 a 5 anos, portanto, é possível estimar que cerca de 250 mil toneladas sejam geradas anualmente, na China.

Devido aos mais diversos usos de catalisadores SCR, propõe-se estimar a quantidade de catalisadores no Brasil através do PIB. O PIB chinês em 2023 foi de 17,89 trilhões de dólares, enquanto o brasileiro foi de 2,17 trilhões de dólares, ou seja, 12,13% do chinês (31,32). Assim sendo, proporcionalmente, o descarte de catalisadores SCR no Brasil seria de 30.325 toneladas anuais.

O estudo de Mohanty et al. (2021) mostra que em catalisadores SCR há 7,5% de vanádio, dos quais 98% podem ser extraídos conforme o processo proposto. Outros estudos indicam composições diferentes, em que os teores de vanádio variam entre 0,5–1,5% de V_2O_5 ou 2-6% de V_2O_5 . O valor utilizado no presente estudo é de 1,5% de vanádio (33,34).

Deste modo, no Brasil, estima-se 446 toneladas anuais de vanádio poderiam ser recuperadas de catalisadores SCR.

3.3.3 RECUPERAÇÃO DO VANÁDIO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO

A recuperação de vanádio desses resíduos apresenta algumas vantagens, como a redução dos custos de manutenção de barragens e pilhas de rejeitos, redução do impacto ambiental, menores usos de energia e água, uma vez que etapas como a extração e moagem já foram realizadas.

Resíduos contendo titanomagnetita e da lama vermelha resultantes do processo Bayer são alguns exemplos de resíduos de interesse para recuperação de vanádio, sendo de 10-20% em peso de V_2O_5 este presente no resíduo do processo bayer. O estudo Wang et al. (2021) encontrou uma teor de 0,59% de vanádio em uma amostra proveniente da província de Shanxi, na China. A diferença de teores pode estar relacionada com a concentração de sólido na amostra considerada, e a composição mineralógica do local (7,35,36).

Os teores de vanádio em outros resíduos da mineração de alumínio são muito baixo, assim a concentração desse metal com uso de técnicas gravimétricas, magnéticas e de flotação, ou uma combinação destas é requerida (7,37)

Ahmadi & Sheykhi (2019) em um processo de lixiviação ácida seguido por lixiviação básica, recuperaram vanádio de resíduos da mineração de ferro, resultando em 93% de vanádio recuperado (38). Em outro estudo, Xiang et. al. (2018) desenvolveram um processo de redução carbotérmica e separação magnética, que possibilitou alcançar 65% de eficiência (39).

Segundo a ABAL – Associação Brasileira do Alumínio (40), em 2023, foram produzidas 1 milhão de toneladas de alumínio. Para cada tonelada de alumínio produzido, necessita-se de duas toneladas de alumina. O processamento de uma tonelada de alumina gera de 1 a 2 toneladas de lama vermelha. (41,42,43). Para 3 toneladas de lama vermelha geradas em 2023, foram geradas 3 milhões de toneladas de rejeitos.

Considerando teor de 0,59% em vanádio conforme a literatura (36), e os diversos métodos de recuperação de vanádio, com rendimentos próximos de 90% descritos por Kurniawan et al. (2023), chega-se ao valor de 15.930 toneladas de vanádio que poderiam ser recuperadas da lama vermelha anualmente (7).

3.3.4 CÁLCULO DE RECUPERAÇÃO DO VANÁDIO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO

A tabela resume os valores encontrados para o potencial de recuperação de vanádio das principais fontes secundárias.

Tabela 1- Tabela de resultados por fontes secundárias

Tabela 1 - Tabela de resultados por fontes secundárias.

| Rejeito | Rejeitos Anuais (t) | Concentração de Vanádio | % de Recuperação | Vanádio recuperado (t) | % do total |
|-------------------|---------------------|-------------------------|------------------|------------------------|------------|
| Cinzas de óleo | 532 | 3% | 95% | 15,2 | 0,09% |
| Catalisadores HDS | 2.706 | 10% | 90% | 243,5 | 1,46% |
| Catalisadores SCR | 30.325 | 1,5% | 98% | 445,8 | 2,68% |
| Lama Vermelha | 3.000.000 | 0,6% | 90% | 15930 | 95,76% |
| Total | | | | 16.634,5 | 100% |

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que o valor recuperado da lama vermelha representa quase a totalidade do vanádio secundário disponível, de acordo com as fontes pesquisadas.

O preço do vanádio, na forma de ferroliga com 80% vanádio, atualmente (25/07/2024) é de aproximadamente 26 US\$/kg segundo (44). Logo, o vanádio recuperado no Brasil poderia gerar faturamento da ordem de 540 milhões de dólares. Neste cálculo, se considerou que todo o vanádio foi vendido na forma de ferro liga, mas isso não representa a realidade do mercado do vanádio, devendo ser entendido como uma forma ilustrativa.

Apesar do potencial de recuperação, é importante notar que os processos de recuperação de vanádio ainda não são tão sustentáveis, com uso abundante de substâncias químicas, água e energia. Por outro lado, no mesmo processo podem ser obtidos outros elementos, os insumos utilizados são menores do que seriam necessários no processo convencional, e a matéria prima utilizada acaba mitigando riscos de contaminação do solo, além de outros problemas decorrentes.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio do estudo, foi possível entender as principais fontes secundárias (cinzas da queima de óleo pesado, catalisadores HDS e SCR e lama vermelha) de vanádio, sendo algumas já exploradas economicamente, sendo que 12-14% do vanádio produzido mundialmente vem de tais fontes.

No Brasil, essa atividade parece ser pouco explorada, mas existem fontes disponíveis, especialmente a resultante da exploração de bauxita. Como o país é um dos maiores produtores do mineral, essa fonte acaba despontando como a principal.

A recuperação secundária de metais tende a ganhar espaço, dado a redução do teor das minas mundialmente, não só de vanádio, como de outros metais, além do aumento de demanda anual, para a transição energética. Outros benefícios advêm dessa atividade, contribuindo para a agenda ESG. Dessa forma, novos estudos para basear atividade são bem-vindos.

A partir da metodologia adotada, verificou-se um mercado de potencial de 16 mil toneladas de vanádio anual a serem recuperadas das fontes secundárias. Desta forma, conclui-se que os objetivos pré-estabelecidos foram alcançados.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) EY. ESG é a maior preocupação para empresas de mineração e metais. EY (Internet). 2023 (acesso em 02 fev. 2024); Disponível em: https://www.ey.com/pt_br/agencia-ey/noticias/esg-maior-preocupacao-empresas-mineracao-metals.
- (2) INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). ESG da mineração. IBRAM (Internet). 2024 (acesso em 03 mai. 2024). Disponível em: <https://ibram.org.br/esg-da-mineracao/>.
- (3) ALMEIDA, M.; MORAES, V.; MALUF, M.; DUARTE, F.; MANSUR, M.B.; BERTUOL, D.A. ESG in the mining sector: analysis of sustainable practices. *Journal of Cleaner Production*, v. 270, p. 122350, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X20301707>.
- (4) PETRANIKOVA, M.; TKACZYK, A.H.; BARTL, A.; AMATO, A.; LAPKOVSKIS, V.; TUNSU, C. Vanadium sustainability in the context of innovative recycling and sourcing development. *Waste Management*, v. 113, p. 521-544, 2020. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.04.007.
- (5) EUROPEAN COMMISSION. Study on the critical raw materials for the EU. EU News (Internet). 2023 (acesso em 17 mai. 2024). Disponível em: <https://www.eunews.it/wp-content/uploads/2023/10/study-on-the-critical-raw-materials-for-the-eu-2023-ET0723116ENN.pdf>.
- (6) YUAN, R.; LI, S.; CHE, Y.; HE, J.; SONG, J.; YANG, B. A critical review on extraction and refining of vanadium metal. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, v. 101, p. 105696, 2021. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105696.
- (7) KURNIAWAN, K.; KIM, S.; BAE, M.; LEE, H.; LEE, J. A review on the metallurgical recycling process of vanadium from secondary resources. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, v. 2023, p. 1-31, 2023. DOI: 10.1080/08827508.2023.2243007.
- (8) WOŁOWICZ, A.; HUBICKI, Z. Vanadium(V) removal from aqueous solutions and real wastewaters onto anion exchangers and Lewatit AF5. *Molecules*, v. 27, n. 17, p. 5432, 2022. DOI: 10.3390/molecules27175432.

- (9) WEBMINERAL. Vanadinite (Internet). Disponível em: <https://webmineral.com/data/Vanadinite.shtml>. Acesso em: 22 out 2024.
- (10) MASON, B.; MOORE, A. Minerals: their constitution and origin. 2. ed. New York: Wiley, 1982.
- (11) GILLIGAN, R.; NIKOLOSKI, A.N. The extraction of vanadium from titanomagnetites and other sources. *Mineral Engineering*, v. 146, p. 106106, 2020. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.106106.
- (12) UNITED NATIONS. Welcome to the United Nations (Internet). Nova York: United Nations; 2024 (citado em 21 out. 2024). Disponível em: <https://www.un.org/>.
- (13) NOWAKOWSKI, P. A proposal to improve e-waste collection efficiency in urban mining: container loading and vehicle routing problems – a case study of Poland. *Waste Management*, v. 60, p. 494–504, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.016>.
- (14) KAYA, M. Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. *Waste Management*, v. 57, p. 64-90, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.08.004.
- (15) COSSU, R.; WILLIAMS, I.D. Urban mining: concepts, terminology, challenges. *Waste Management*, v. 45, p. 1-3, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.09.040.
- (16) DENG, W.J.; ZHENG, J.S.; BI, X.H.; FU, J.M.; WONG, M.H. Distribution of PBDEs in air particles from an electronic waste recycling site compared with Guangzhou and Hong Kong, South China. *Environmental International*, v. 33, n. 8, p. 1063-1069, 2007. DOI: 10.1016/j.envint.2007.06.007.
- (17) XAVIER, L.H.; OTTONI, M.M.; ABREU, L.P. A comprehensive review of urban mining and the value recovery from e-waste materials. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 190, p. 106840, 2023. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106840.
- (18) BAKKAR, A.; EL-SAYED SELEMAN, M.M.; ZAKY AHMED, M.; HARB, S.; GOREN, S.; HOWSAWI, E. Recovery of vanadium and nickel from heavy oil fly ash (HOFA): a critical review. *RSC Advances*, v. 13, n. 10, p. 6327-6345, 2023. DOI: 10.1039/D3RA00289F.

- (19) NAVARRO, R.; GUZMAN, J.; SAUCEDO, I.; REVILLA, J.; GUIBAL, E. Vanadium recovery from oil fly ash by leaching, precipitation and solvent extraction processes. *Waste Management*, v. 27, n. 3, p. 425-438, 2007. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.02.002.
- (20) HAKIMI, M.; KIANI, P.T.; ALIKHANI, M.; FEIZI, N.; BAJESTANI, A.M.; ALIMARD, P. Reducing environmental pollution of fuel fly ash by extraction and removal of vanadium pentoxide. *Solid Fuel Chemistry*, v. 54, n. 5, p. 337–342, 2020. DOI: 10.3103/S0361521920050055.
- (21) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Usinas termelétricas por tipo. ANEEL (Internet). 2023 (acesso em 4 abr. 2024). Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/usinas-termeletricas-por-tipo/resource/0803a420-10ba-473a-941c-e2b569e3ad2b>.
- (22) INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. 3º inventário de emissões atmosféricas em usinas termelétricas. Instituto de Energia e Meio Ambiente (Internet). 2024 (acesso em 4 abr. 2024). Disponível em: <https://energiaambiente.org.br/wp-content/uploads/2023/10/3-inventario-ute-iema-2023.pdf>.
- (23) GRAUS, W.H.J.; VOOGT, M.; WORRELL, E. International comparison of energy efficiency of fossil power generation. *Energy Policy*, v. 35, n. 7, p. 3936-3951, 2007. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.01.016.
- (24) Lv Y, Zhao G, Shen C, Chen Y, Fan Y, Zhang G, Yang C. Extraction of vanadium from the spent residuum catalysts by Fenton-like reaction followed with alkaline leaching. *Processes*. 2023;11(7):2021. doi:10.3390/pr11072021.
- (25) QUINTANILHA, C.L.; AFONSO, J.C.; SILVA, R.S.; VIANNA, C.A.; MANTOVANO, J.L. Processamento de catalisadores gastos de unidade de hidrodessulfurização profunda (ultra-deep HDS). *Química Nova*, v. 45, n. 1, p. 31-39, 2022. DOI: 10.21577/0100-4042.20170800.
- (26) MTE THOMSON. SCR: catalisador seletivo redutor (Internet). Disponível em: <https://www.mte-thomson.com.br/scr-catalisador-seletivo-redutor/>. Acesso em: 21 jul. 2024.

- (27) PINTO, I.S.S.; SOARES, H. Separation and recovery of nickel, as a salt, from an EDTA leachate of spent hydrodesulphurization catalyst using precipitation methods. *Chemical Engineering Science*, v. 122, p. 30, 2015.
- (28) YANG, C.; ZHANG, J.; CHEN, Y.; WANG, C. Efficient removal of oil from spent hydrodesulphurization catalysts using microwave pyrolysis method. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 135, p. 169, 2018.
- (29) INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS (IBP). Capacidade de refino e consumo de petróleo por país (Internet). Rio de Janeiro: IBP; 2021. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/capacidade-de-refino-e-consumo-de-petroleo-por-pais/>.
- (30) ZHAO, J.; ZHANG, X.; YANG, F.; AI, Y.; CHEN, Y.; PAN, D. Strategy and technical progress of recycling of spent vanadium-titanium-based selective catalytic reduction catalysts. *ACS Omega*, v. 9, n. 6, p. 6036-6058, 2024. DOI: 10.1021/acsomega.3c07019.
- (31) BANCO CENTRAL DO BRASIL. Estatísticas do setor externo (Internet). Brasília: Banco Central do Brasil; (citado em 2024 jun 18). Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/en/statistics/externalsectorstatistics>.
- (32) NATIONAL BUREAU OF STATISTICS OF CHINA. Press release (Internet). Beijing: National Bureau of Statistics of China; 2024 Feb 28 (citado em 2024 jun 18). Disponível em: https://www.stats.gov.cn/english/PressRelease/202402/t20240228_1947918.html.
- (33) CHOI, I.H.; CHO, Y.C.; MOON, G.; KANG, H.-N.; OH, Y.B.; LEE, J.-Y.; KANG, J. Recent developments in the recycling of spent selective catalytic reduction catalyst in South Korea. *Catalysts*, v. 10, n. 2, p. 182, 2020. DOI: 10.3390/catal10020182.
- (34) MOHANTY, J.; RATH, P.C.; BHATTACHARYA, I.N.; PARAMGURU, R.K. The recovery of vanadium from spent catalyst: a case study. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, v. 120, n. 1, p. 56–60, 2011. DOI: 10.1179/037195510X12772935654909.

- (35) RAJEEV, P.; DAS, S.N.; THAKUR, R.S. Vanadium sludge - a useful byproduct of alumina plant. *Journal of Scientific and Industrial Research*, v. 58, p. 948-953, 1999.
- (36) WANG, L.; YAN, X.; NIU, Z.; ZHU, X. Selective recovery of vanadium from red mud by leaching using oxalic acid and sodium sulfite. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9, n. 4, p. 105669, 2021. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105669.
- (37) LIU, S.X.; WEI, J.C.; WEI, S.B.; NIE, Y.M. The vanadium titanium magnetite tailings of Chengde area comprehensive recycling situation and development trend. *Advanced Materials Research*, v. 753-755, p. 28-31, 2013. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.753-755.28.
- (38) AHMADI, R.; SHEYKHI, B. Recovery of vanadium from secondary tailing of iron ore by salt roasting-alkaline leaching and solvent extraction processes. *Iran Journal of Earth Sciences*, v. 11, n. 1, p. 30-37, 2019.
- (39) XIANG, J.; HUANG, Q.; LV, W.; PEI, G.; LV, X.; LIU, S. Co-recovery of iron, chromium, and vanadium from vanadium tailings by semi-molten reduction–magnetic separation process. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v. 57, n. 3, p. 262-273, 2018. DOI: 10.1080/00084433.2018.1460300.
- (40) UOL ECONOMIA. Produção de alumínio salta 18 vezes em cinco décadas no Brasil (Internet). São Paulo: UOL; 2024 mai 20 (citado em 2024 jun 20). Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/estadao-conteudo/2024/05/20/producao-de-aluminio-salta-18-vezes-em-cinco-decadas-no-brasil-aponta-abal.htm>.
- (41) AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Alumínio (Internet). Brasília: ANM; 2018 (citado em 2024 jun 20). Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/aluminio..>
- (42) CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM). Tecnologia ambiental (Internet). Brasília: CETEM; (data desconhecida). Disponível em: https://www.cetem.gov.br/antigo/series/serie-tecnologia-ambiental/item/download/2465_14575a3ebe7ff5bb454d286bf472658c.

(43) SILVA FILHO, E.B.; ALVES, M.C.M.; DA MOTTA, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. *Matéria*, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 322–38, 2007. DOI: 10.1590/S1517-70762007000200011.

(44) VANADIUM PRICE. Vanadium price and market information (Internet). Disponível em: <https://vanadiumprice.com/>.