



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

Franciele Rossetti Cúnico

**MINERAÇÃO URBANA E SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS
PARA A RECUPERAÇÃO DE ELEMENTOS DE TERRAS RARAS DE ÍMÃS
PERMANENTES**

Florianópolis
2024

Franciele Rossetti Cúnico

**MINERAÇÃO URBANA E SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS
PARA A RECUPERAÇÃO DE ELEMENTOS DE TERRAS RARAS DE ÍMÃS
PERMANENTES**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Ciência e Engenharia de Materiais da
Universidade Federal de Santa Catarina como
requisito para a obtenção do título de Doutora em
Metais.

Orientador: Prof. Orestes Estevam Alarcon, Dr.
Coorientadora: Prof.(a) Lúcia Helena Xavier, Dr.(a)

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Cunico, Franciele Rossetti
MINERAÇÃO URBANA E SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS PARA A
RECUPERAÇÃO DE ELEMENTOS DE TERRAS RARAS DE ÍMÃS
PERMANENTES / Franciele Rossetti Cunico ; orientador,
Orestes Estevam Alarcon, coorientadora, Lúcia Helena
Xavier, 2024.
215 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Ciência e Engenharia de Materiais. 2. Mineração
Urbana. 3. Soluções Tecnológicas. 4. Ímãs de Terras Raras.
I. Alarcon, Orestes Estevam . II. Xavier, Lúcia Helena .
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. IV.
Título.

Franciele Rossetti Cúnico

**MINERAÇÃO URBANA E SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS
PARA A RECUPERAÇÃO DE ELEMENTOS DE TERRAS RARAS DE ÍMÃS
PERMANENTES**

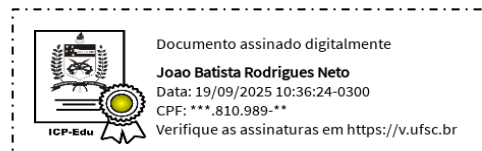
O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado, em 16 de fevereiro de 2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Gisele de Lorena Diniz Chaves, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

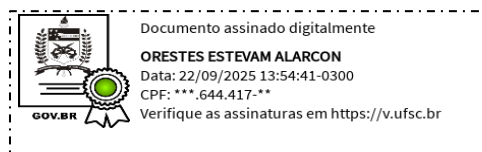
Prof. Fernando José Gomes Landgraf, Dr.
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Pesquisador Ysrael Marrero Vera, Dr.
Centro de Tecnologia Mineral

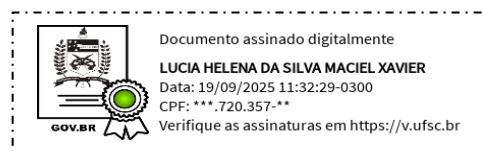
CERTificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais.



Coordenação do Programa Prof. Dr. João Batista Rodrigues Neto



Prof. Orestes Estevam Alarcon, Dr.
Orientador



Prof.(a) Lúcia Helena Xavier, Dr.(a)
Coorientadora

Florianópolis, 2024.

Dedico este trabalho de doutorado a Deus e à minha família, em especial à memória da minha querida nona Janira. Agora reconheço que, apesar dos desafios enfrentados, possuo a capacidade de alcançar feitos grandiosos. Este trabalho é uma homenagem a todos os obstáculos superados ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Desenvolver um trabalho científico é, sem dúvida, uma experiência extraordinária. Nunca vivi, sentimentos tão intensos, tantas inquietações profissionais e pessoais. Ainda que, a tese seja um trabalho solitário, não foi sozinha que cheguei até aqui. É preciso reconhecer o apoio da minha equipe o quanto recorri aos recursos disponibilizados por eles para desempenhar minha jornada: instrução, educação, carinho, críticas, incentivos...

Agradeço, primeiramente, a Deus. Não haveria jornada se ele não permitisse seguir o meu propósito. Agradeço também aos meus pais. Procurei honrar todo esforço e dedicação que fizeram pela minha educação e pelas orações e incentivo do meu irmão Francis. Ao meu marido, Lucas e minha filha Lívia Maria. Não há palavras para descrever meus sentimentos por vocês, são meu porto seguro.

Ao meu orientador, professor Orestes, por todos os ensinamentos e amizade. A minha coorientadora professora Lúcia, por toda compreensão, você foi fundamental para que eu me mantivesse focada e me aproximasse cada vez mais do objetivo. Que honra ter vocês ao meu lado nessa jornada. Tão diferentes, tão conciliadores, exemplos que me inspiram a ser cada vez melhor. Obrigada pelas discussões, parceria, orientação, confiança e compreensão em todos os momentos. Expresso minha gratidão à coordenação da pós, em particular, ao Rogério pelas dúvidas sempre atendidas cordialmente.

De forma especial agradeço as professoras Lucila e Gisele, por todo auxílio e por me integrar ao grupo LGAA. Ao grupo MAGMA, por confiarem em meu trabalho e auxílio nas viagens. Aos pesquisadores do CETEM e aos colegas dos projetos Mineraitr, INCT, GraNioTer, REGINA e R3MINARE, pela troca de experiências e de conhecimentos. Aos integrantes da CODEMGE, LabFabITR e as Empresas produtoras e de transformação pela disposição, colaboração e por me receberem muito bem. A todos os amigos Mariele, Jéssica, Henrique, Suélen, Karen, Gabriel, Mariano Laio, Ricardo, Luciana Monfati, Alice, Emmanuelle, Alice, Fernando Castro e Rosivana.

Em conclusão, não tenho palavras que explicitem o tamanho da gratidão à professora Marilena Valadares Folgueras, você me mostrou o quanto sou capaz e me abriu um universo de possibilidades, sempre estará no meu coração meu exemplo.

RESUMO

Os ímãs de NdFeB possuem uma alta concentração de elementos de terras raras (ETR), e são considerados materiais estratégicos para a economia mundial, devido à transição global para uma infraestrutura de baixo carbono. Diante disso, esforços globais estão sendo feitos em vários países, para lidar com o monopólio chinês de Terras Raras (cerca de 90% da produção mundial). Além de apoio a projetos acadêmicos, a iniciativa brasileira construiu um Laboratório Fábrica de Ímãs de Terras Raras (LabFabITR) em Lagoa Santa, Minas Gerais, com objetivo de desenvolver ímãs em escala piloto. Porém, essa iniciativa enfrenta ainda obstáculos para implementação da cadeia produtiva de ímãs de NdFeB, apesar de o Brasil ter reservas minerais equivalentes às da China. Assim, o escopo desta pesquisa é procurar soluções de engenharia, passíveis de serem aplicadas ao processo tecnológico de recuperação de ímãs de NdFeB pós-consumo, identificando também as principais fontes de mineração urbana no Brasil. Este estudo considera a capacidade técnica e consequências ambientais para o desenvolvimento da cadeia produtiva de Ímãs de Terras Raras no Brasil, visando apoiar o processo decisório junto ao LabFabITR. Estudos recentes revelam que já foram produzidas mais de 300.000 toneladas de ímãs de NdFeB, com a possibilidade de recuperar anualmente entre 3.300 e 6.600 toneladas de ETR de ímãs pós-consumo. As fontes de ETR pré e pós-consumo devem ser geridas para promover a economia circular desses materiais. Porém, a literatura acerca das soluções tecnológicas aplicadas à recuperação de ETR em escala industrial ainda é limitada e apresenta lacunas, principalmente em consolidar volumes de ímãs pós-consumo, questões ambientais e maturidade tecnológica, que empregam a mineração urbana envolvendo atores da cadeia. Esta tese desenvolve um estudo nas soluções tecnológicas para viabilidade de recuperação de material secundário a partir de ímãs de NdFeB, composto por 32 estudos identificados e categorizados através do protocolo de revisão sistemática da literatura. A aplicação do método *Technology Readiness Level (TRL)*, resultou na consolidação da maturidade das soluções tecnológicas nos processos hidrometalúrgicos com maturidade para escala industrial, apesar de existirem outras abordagens para recuperar materiais críticos sem utilização de ácidos tóxicos e mais ecológicos. A análise de dados do ComexStat/MDIC infere que existe um volume significativo de ímãs no Brasil, indicando potencial para recuperação. Assim, buscou-se identificar as alternativas para destinação dos ímãs pós-consumo a partir de entrevistas com os atores da cadeia que fazem uso do componente ímã de NdFeB em seus produtos e as empresas recicladoras de eletroeletrônicos. Isso posto, os resultados indicaram que essas empresas não possuem procedimentos estabelecidos para destinação desses resíduos de ímãs pós-consumo, evidenciando falta de conhecimento das possibilidades de destinação, o que impacta na recuperação do potencial de material secundário. Por fim, os resultados do estudo contribuem, do ponto de vista prático, para a proposição de estratégias operacionais e pode auxiliar os gestores do LabFabITR a iniciar ações em prol da recuperação de material secundário, bem como na melhoria e adequação dos processos a realidade industrial, favorecendo a transição para um sistema de produção e consumo circular.

Palavras-chave: Economia Circular; Elemento de Terras Raras; Ímãs de NdFeB; Material Secundário; Mineração Urbana; Reciclagem; Recuperação.

ABSTRACT

The NdFeB magnets have a high concentration of rare earth elements (REE) and they are considered strategic materials for the global economy, due to the current transition to a low-carbon infrastructure. Given this, global efforts are being made in several countries, especially in Brazil, aiming to deal with the Chinese monopoly on Rare Earth (around 90% of world production). Besides academic project support, Brazil has built a pilot plant to manufacture rare earth magnets, the Rare Earth Magnet Factory Laboratory (LabFabITR) in Lagoa Santa, Minas Gerais. However, this initiative still faces obstacles in implementing the NdFeB magnet production chain, despite Brazil having mineral reserves equivalent to those of China. Thus, this research scope is to identify engineering solutions suitable for recovering post-consumer NdFeB magnets and identify the main sources of Urban Mining in Brazil. This study considers the technical capacity and environmental consequences for the Rare Earth Magnets production chain in Brazil, aiming to support the decision-making process with LabFabITR. Recent studies show that more than 300,000 tons of NdFeB magnets have been produced to date, and around 3,300 to 6,600 tons of REE can be recovered per year from post-consumer magnets. The two origins (pre-consumption and post-consumption) of REE must be managed to enable the circular economy of these secondary materials. However, the research on implementing technological solutions for extracting REE on a large-scale industrial level is still limited. There are significant gaps in the areas of consolidating post-consumer magnet volumes, addressing environmental concerns, and achieving technological maturity that employs urban mining involving the player from the manufacturing chain. Therefore, this thesis develops a study on technological solutions for the feasibility of recovering secondary material from NdFeB magnets, consisting of 32 studies identified and categorized through the systematic literature review protocol. The application of the Technology Readiness Level (TRL) method resulted in the consolidation of the maturity of technological solutions in hydrometallurgical processes with maturity for industrial scale, even though there are other approaches to recover critical materials without the use of toxic and more environmentally friendly acids. The quantitative analysis based on the ComexStat/MDIC database reveals a significant volume of magnets distributed throughout the national territory, meaning an available volume for the recovery of secondary materials. Thus, the alternatives for the disposing of post-consumer magnets were mapped, based on interviews with actors in the chain who use the NdFeB magnet component in their products and electronics recycling companies. The results show that these companies do not have established procedures for disposing of post-consumer magnet waste, highlighting a lack of knowledge of the disposal possibilities, which affects the recovery of the secondary material. Finally, these results contribute to the proposition of operational strategies and support LabFabITR managers to initiate actions towards the recovery of secondary material and also in the improvement and adaptation of the processes to the industrial reality, enabling the transition to a circular production and consumption system.

Keywords: Circular Economy; NdFeB magnets; Rare Earth Elements; Recovery; Recycling; Secondary Material; Urban Mining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Laboratório Fábrica de ITR.....	24
Figura 2 – <i>Framework</i> da circularidade da cadeia de valor.....	26
Figura 3 – Visão macro da estrutura da tese.....	30
Figura 4 – Produção mundial de OTR no período 1900 a 2023.....	35
Figura 5 – Mapa global dos principais fornecedores de MCs.....	37
Figura 6 – Magnetização em função do campo magnético aplicado (H).....	40
Figura 7 – Representação do segundo quadrante da curva de histerese de um ímã genérico.....	41
Figura 8 – a) Bloco de NdFeB; b) Imagem metalográfica evidenciando a camada protetora 1-Ni, 2-Cu e 3-Ni no ímã de NdFeB.....	43
Figura 9 – Imagem da microestrutura típica de um ímã de Nd ₁₅ Fe ₇₇ B ₈	43
Figura 10 – Representação da estrutura cristalina de Nd ₂ Fe ₁₄ B ₁	44
Figura 11 – Representação da mineração a produção do ímã de NdFeB sinterizado.....	45
Figura 12– Representação da importância de manter a atmosfera inerte.....	46
Figura 13 – Esquema representativo da etapa de usinagem do ímã de NdFeB pré-consumo.....	47
Figura 14 – Visão macro da cadeia de ITR da mineração até produtos pós-consumo.....	48
Figura 15 – Estimativa da quantidade de resíduos (material secundário) gerados durante o processamento de ITR no LabFabITR.....	49
Figura 16 – Quantidade estimada de ETR nos REEE descartados nos últimos 6 anos no Brasil.....	51
Figura 17 – Fluxo de material dos resíduos eletroeletrônicos no Brasil.....	52
Figura 18 – Imagem representativa do ímã de NdFeB no aerogerador.....	55
Figura 19 – Capacidade de energia eólica (MW) instalada no Brasil.....	56
Figura 20 – Representação do posicionamento do ímã de NdFeB no rotor.....	57
Figura 21 – Vias de circularidade para valorização de resíduo eletrônico por meio da mineração urbana e logística reversa.....	64
Figura 22 – ETR recuperados de produtos pós-consumo UE.....	66

Figura 23 – Fluxograma de recuperação de recurso secundário com a técnica de reutilização direta de resíduos de ímã de NdFeB pré e pós-consumo.....	70
Figura 24 – Fluxograma dos processos hidrometalúrgicos a partir de ímãs de NdFeB.....	72
Figura 25 – Etapas da pesquisa com respectivos resultados.....	80
Figura 26 – Triagem dos estudos da pesquisa.....	84
Figura 27 – Significado do código NCM.....	86
Figura 28 – Associação dos resultados identificados com às categorias de impactos.....	89
Figura 29 – Esquema representativo para a aplicação da matriz <i>SWOT</i>	94
Figura 30 – Protocolo seguido no estudo de RSL.....	96
Figura 31 – Análise realizada com as palavras chave.....	99
Figura 32 – Rede de cocitações.....	100
Figura 33 – Número de artigos publicados por país.....	102
Figura 34 – Fluxograma circular da cadeia de ITR com as soluções tecnológicas RSL.....	109
Figura 35 – Percentual das abordagens mais estudadas na análise de RSL.....	110
Figura 36 – Principais países com respectivos marcos regulatório formal para REEE.....	114
Figura 37 – Visão macro da lista de Bens Minerais para o Brasil.....	115
Figura 38 – Framework dos materiais aplicados nos produtos.....	116
Figura 39 – Evolução da Economia Circular no Brasil.....	120
Figura 40 – Cadeia de valor Brasil.....	122
Figura 41 – Número de unidades de ímãs do motor ao longo de 20 anos.....	134
Figura 42 – Exportação de produtos contendo ímãs ou artefatos destinados a tornarem-se ímãs após a magnetização das NCM (85051100; 85051910 e 85051990) no período de 2002 a 2022.....	135
Figura 43 – Importação de produtos contendo ímãs ou artefatos destinados a tornarem-se ímãs após a magnetização (UF).....	137
Figura 44 – Importação de produtos contendo ímãs ou artefatos destinados a tornarem-se ímãs após a magnetização com respectivos países de origem.....	137
Figura 45 – Produção de ímãs no Brasil anual no período de 2005 a 2020.....	138
Figura 46 – Patentes x Titulares.....	146
Figura 47 – Recicladoras mundiais que transformam o material pós-consumo.....	147

Figura 48 – Produto pós-consumo enviados para transformação em países que detém de soluções tecnológicas para extração de material secundário.....	149
Figura 49 – Classificação dos níveis de maturidade nas soluções identificadas no estudo.....	150
Figura 50 – Planta de extração por solvente – CETEM.....	151
Figura 51 – Equipamento de ressonância magnética desmantelado.....	153
Figura 52 – Remoção do revestimento de níquel.....	153
Figura 53 – Ímãs de NdFeB embalados para transporte.....	154
Figura 54 – Ímãs de NdFeB sendo transportados para extração de material secundário.....	154
Figura 55 – Central de valorização de resíduos.....	157
Figura 56 – Ilustração da distribuição de ímãs de aerogerador magnetizados.....	158
Figura 57 – Representação dos resultados obtidos com a aplicação da matriz <i>SWOT</i>	162
Figura 58 – Mapa com o georreferenciamento das empresas.....	170
Figura 59 – Proposição de um Fluxo da cadeia circular dos ímãs de NdFeB no Brasil.....	171

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características relevantes para seleção/produção de ímãs de NdFeB.....	39
Quadro 2 – Vias de circularidade aplicadas no gerenciamento de resíduo eletrônico.....	63
Quadro 3 – Áreas de gestão e seus conceitos.....	65
Quadro 4 – Diferentes métodos de recuperação de ITR vantagens e desvantagens.....	78
Quadro 5 – Gestão de REEE países desenvolvidos e em desenvolvimento.....	117
Quadro 6 – Síntese das normas nacionais para gestão de REEE.....	119
Quadro 7 – Conjunto de instrumentos legais e normativos relacionadas aos ITR e REEE.....	125
Quadro 8 – Empresas mundiais de reciclagem de ímãs de NdFeB e equivalência.....	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo das características dos tipos de ímãs.....	42
Tabela 2 – Composição química média (% em massa) dos ímãs de NdFeB.....	52
Tabela 3 – Porcentagem em peso de ímãs em diferentes componentes eletrônicos.....	53
Tabela 4 – Composição dos ímãs de NdFeB por aplicação tecnológica.....	54
Tabela 5 – Composições químicas de ímãs NdFeB pós-consumo (% em peso).....	67
Tabela 6 – Propriedades mecânicas dos ímãs reciclados x originais.....	67
Tabela 7 – Perguntas de pesquisa para o estudo de RSL publicados.....	82
Tabela 8 – Definição dos níveis de maturidade tecnológica.....	91
Tabela 9 – Matriz do conhecimento dos artigos selecionados a partir da RSL.....	97
Tabela 10 – Quantidade de artigos publicados por ano.....	101
Tabela 11 – Inventário de ciclo de vida para 1Kg de Nd reciclado.....	130
Tabela 12 – Comparação das categorias de impacto ambiental para recuperação de Nd a partir de ímãs de NdFeB.....	131
Tabela 13 – Emissões totais de GEE do transporte dos resíduos eletroeletrônicos.....	132
Tabela 14 – Empresas registradas na CNAE 2790.....	140
Tabela 15 – Empresas de recuperação e reciclagem de equipamentos elétricos e eletrônicos do mundo.....	145
Tabela 16 – Custos de matéria prima, processamento e lucros a partir de ITR pós-consumo.....	148
Tabela 17 – Estimativa de Gastos: Reciclagem via processo HD.....	167
Tabela 18 – Estimativa de Valores – Infraestrutura Mínima.....	169

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
AS	Acordo Setorial
(BH)máx.	Produto energia máximo
(Br)	Remanência
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBMM	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CLSC	<i>Closed Loop Supply Chain</i>
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CODEMGE	Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais
CTAPME	Comitê Interministerial de Análise de Projetos de Minerais Estratégicos
DTTM	Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral
EC	Economia Circular
EL	Economia Linear
ENEGEP	Encontro Nacional de Engenharia de Produção
EOL	End Of Life
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETR	Elementos de Terras Raras
ETR-BR	Elementos de Terras Raras - Brasil
EU	<i>European Union</i>
FI	Fator de Impacto
GRANIOTER	Grafeno, Nióbio e Terras Raras
HDDR	Hidrogenação-Desproporção-Dessorção-Recombinação
HDDs	<i>Hard Disk Drives</i>
(H)	Campo magnético externo
(Hcb)	Coercividade Intrínseca
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática

ITR	Ímãs de Terras Raras
LabFabITR	Laboratório Fábrica de Ímãs de Terras Raras
LR	Logística Reversa
MCs	Materiais Críticos
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MEC	Ministério da Educação
MFV	Mapa do Fluxo de Valor
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MJ	Mega joule por metro quadrado
MU	Mineração Urbana
NCM	Nomenclatura Comum do Mercosul
NdFeB	Neodímio-Ferro-Boro
OTR	Óxidos de Terras Raras
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
POP	Poluentes Orgânicos Persistentes
ppm	partes por milhão
REEE	Resíduo Eletroeletrônicos
REGINA	<i>Rare Earth Global Industry and New Applications</i>
RLS	Revisão Sistemática da Literatura
RoHS	<i>Restriction of Certain Hazardous Substances</i>
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SLR	Sistema de Logística Reversa
TR	Terra Rara
TRL	<i>Technology Readiness Level</i>
(T _c)	Temperatura de Curie
USGS	<i>U.S. Geological Survey</i>
VEHs	Veículos elétricos ou híbridos
WEEE	<i>Waste Electrical and Electronic Equipment</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVOS.....	21
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
1.3	JUSTIFICATIVA.....	21
1.3.1	Relevância e ineditismo.....	26
1.3.2	Lacunas do conhecimento.....	28
1.4	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	29
1.5	ESTRUTURA DA TESE.....	29
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	32
2.1	PANORAMA SOBRE MATERIAIS CRÍTICOS.....	32
2.2	ÍMÃS DE NdFeB E SUAS PROPRIEDADES.....	38
2.2.1	Processo de fabricação do ímã de NdFeB.....	44
2.2.2	Material secundário pré-consumo obtido a partir da produção de ímãs de NdFeB.....	48
2.3	TEOR DE ETR NOS EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS.....	50
2.3.1	Turbinas eólicas.....	54
2.3.2	Motores elétricos.....	57
2.4	ESTADO DA ARTE DA MINERAÇÃO URBANA.....	59
2.4.1	Economia circular.....	60
2.5	RECUPERAÇÃO DE ETR A PARTIR DE ÍMÃS DE NdFeB.....	66
2.6	SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS.....	69
2.6.1	Processo de reutilização direta.....	70
2.6.2	Processos Hidrometalúrgicos.....	71
2.6.3	Processo Pirometalúrgico.....	75
2.6.4	Processo Eletroquímico.....	76
2.6.5	Processo biohidrometalúrgico.....	77
2.6.6	Impacto das soluções tecnológicas.....	78
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	80
3.1	ETAPAS DA PESQUISA.....	81
3.1.1	Etapa 1: Identificar e estudar as soluções tecnológicas existentes para recuperar materiais secundários a partir de ímãs de NdFeB pós-consumo.....	81
3.1.2	Etapa 2: Identificar e analisar os requisitos legais e normativos.....	85

3.1.3	Etapa 3: Analisar comparativamente as soluções tecnológicas com base em critérios de categorização, eficiência e sustentabilidade.....	85
3.1.4	Etapa 4. Comparar o nível de maturidade das soluções tecnológicas na obtenção dos materiais secundários em escala laboratorial e industrial.....	90
3.1.5	Etapa 5: Analisar a viabilidade de recuperar material secundário considerando diferentes estágios da cadeia de valor de ITR e respectivos atores.....	92
4	RESULTADOS.....	95
4.1	IDENTIFICAÇÃO DA CADEIA DE ÍMÃS DE NdFeB E RESPECTIVAS SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS.....	95
4.2	ANÁLISE DE CONTEÚDO DA RSL.....	102
4.3	<i>SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS CONVENCIONAIS PARA RECUPERAR RECURSO SECUNDÁRIO PÓS E PRÉ-CONSUMO: REUTILIZAÇÃO E RECUPERAÇÃO.....</i>	<i>103</i>
4.3.1	Abordagem por métodos químicos.....	105
4.3.2	Abordagens por métodos elétricos.....	106
4.3.3	Abordagens por métodos físicos e térmicos.....	107
4.3.4	Abordagens por métodos biológicos.....	107
4.3.5	Resíduos industriais pré-consumo.....	107
4.3.6	Gestão de recurso secundário pós-consumo.....	108
4.4	CONJUNTO DE INSTRUMENTOS LEGAIS E NORMATIVOS.....	112
4.4.1	Regulamentações mundiais para uso dos ímãs de NdFeB.....	124
4.5	IDENTIFICAÇÃO DOS INSUMOS, GERAÇÃO DE EMISSÕES E INFRAESTRUTURA DAS SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS.....	129
4.5.1	Identificação dos insumos nacionais.....	133
4.5.2	Panorama geral das empresas de ímãs no Brasil.....	139
4.6	ATORES GLOBAIS DA CADEIRA DE RECUPERAÇÃO DE MATERIAL SECUNDÁRIO.....	144
4.7	SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS E NÍVEIS DE MATURIDADE.....	149
4.7.1	Mineração Urbana de produtos pós-consumo no Brasil.....	152
4.8	RECUPERAÇÃO DE MATERIAL PÓS-CONSUMO ENVOLVENDO ATORES DA CADEIA DE ITR NO BRASIL.....	155
4.8.1	Empresa A.....	156

4.8.2 Empresa B, Empresa C, LabfabITR (na condição de reciclador/produtor.....	160
4.8.3 Pré-análise do processo HD.....	164
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	173
5.1 CONTRIBUIÇÕES.....	177
5.2 LIMITAÇÕES.....	178
5.3 DIRECIONAMENTO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	178
REFERÊNCIAS.....	180
APÊNDICE A – ROTEIRO DE ENTREVISTAS PARA LEVANTAMENTO DE DADOS REICLADORAS.....	201
APÊNDICE B – ROTEIRO DE ENTREVISTAS PARA LEVANTAMENTO DE DADOS EMPRESAS PRODUTORAS.....	202
APÊNDICE C – PARECER DO COMITÊ DE ÉTICA.....	203
ANEXO A – MEMBROS DO GT ROHS BRASILEIRA.....	211
ANEXO B – LISTAGEM DAS EMPRESAS QUE ATUAM NA GESTÃO DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS NO BRASIL.....	212

1 INTRODUÇÃO

A mineração de recursos naturais no mundo é estratégica, com concentração significativa em países como Congo (cobalto), o Chile (cobre), a Rússia (níquel e platina) e Brasil (ferro e nióbio) (Xavier; Ottoni, 2021). O Brasil lidera as exportações de minério de ferro e nióbio, detendo 92% das reservas mundiais. O país se destaca na exportação de *commodities* e importação de produtos industrializados, impulsionando soluções de engenharia e o desenvolvimento de materiais avançados para os setores de mobilidade, construção e energia renovável (RMIS, 2023; Xavier; Ottoni, 2021).

A inovação tecnológica depende de minerais como as “terras raras”, representadas pelo símbolo “TR” (RE — *Rare Earth*), que abrangem desde os leves, como lantânio (La) até os pesados, como lutécio (Lu) incluindo o ítrio (Y) (Connelly *et al.*, 2005). O termo “raro” descreve o comportamento dos compostos desses metais, não sua abundância natural, enquanto o termo “terra” historicamente referia-se a óxidos no século XIX (Lima; Leal Filho, 2016). Segundo a Agência Geológica dos Estados Unidos, as reservas brasileiras de terras raras podem chegar a 3,5 bilhões de toneladas (USGS, 2023).

Globalmente, a China domina a produção de ETR, representando aproximadamente 90% do total. Recentemente, a exportação de tecnologias para a extração e separação desses metais foram proibidas devido à competição com o Ocidente por recursos essenciais em produtos de alto desempenho. Essa medida rigorosa adotada pelo país cria um dilema para as nações que dependem de ETR em produtos para tecnologias modernas (MINERA BRASIL, 2023). A perspectiva de escassez desses recursos levanta preocupações globais sobre a cadeia de suprimentos de ETR (Li *et al.*, 2019; Dushyantha *et al.*, 2020).

Com isso em mente, o Brasil recentemente determinou que os ETR são considerados minerais estratégicos, de acordo com o Decreto nº 10.657/2021, em seu art. 84 § 2.º, definindo-os como “minerais essenciais devido à sua aplicação em produtos e processos de alta tecnologia” (MME, 2021). Em meio a uma acirrada competição e crescentes preocupações sobre a segurança das cadeias de suprimentos globais, torna-se crucial para os países diversificarem suas fontes de ETR e estabelecerem capacidades próprias de extração e processamento desses metais. A procura por alternativas sustentáveis e estratégias de reciclagem também

está em evidência, à medida que a conscientização sobre a importância da gestão responsável desses recursos cresce (Li *et al.*, 2019).

Consequentemente, os ETR são agora considerados elementos vitais na fabricação de ímãs de NdFeB, devido ao alto risco de escassez e à flutuação de preços desses materiais no mercado (Kumari; Sahu, 2023; Lima *et al.*, 2017; Rabe *et al.*, 2017). Os ímãs de NdFeB, são componentes essenciais em vários setores como discos rígidos *Hard Disk Drives* (HDDs), turbinas eólicas, veículos elétricos, equipamentos de ressonância magnética, robótica, entre outros (Chen; Gong, 2016; Ciacci *et al.*, 2019; Yue *et al.*, 2019; Dutta *et al.*, 2016; Busch *et al.*, 2014; Heim; Vander Wal, 2023). O neodímio (Nd) presente nesses ímãs representa 30-40% do peso e desempenha um papel crucial em tais áreas (CGEE, 2013; Balaram, 2019; Yue *et al.*, 2019). Em virtude da demanda crescente por tecnologias limpas e sustentáveis, a pesquisa e o desenvolvimento de alternativas aos ETR estão em curso.

Nesse contexto, estratégias para utilizar produtos pós-consumo, ou seja, produtos no fim de sua vida que contêm ímãs permanentes, disponíveis nas chamadas “minas urbanas” tornam-se relevantes para promover a economia circular (EC) e reduzir a dependência de recursos naturais (Kumari; Sahu, 2023; Xavier *et al.*, 2023; Prosperi *et al.*, 2019). No entanto, para recuperar esses ímãs, é crucial estabelecer parcerias estratégicas e alianças sólidas com empresas de reciclagem. Isso se destina a criar soluções tecnológicas eficazes para converter os produtos pós-consumo em fontes secundárias de materiais que possam ser reintegrados à cadeia de fornecimento principal, seja como novos produtos ou em outros circuitos, como ímãs compósitos (Nlebedim; King, 2018; Schönfeldt *et al.*, 2023). Assim, é fundamental considerar as fontes para a mineração urbana (UM), incluindo aterro sanitário, cinzas de incineração, efluentes, esgoto e resíduos eletroeletrônicos (REEE) como alternativa promissora para recuperar elementos valiosos de resíduos, contribuindo para a economia circular e reduzindo a dependência de recursos naturais (Xavier; Ottoni, 2021; Xavier *et al.*, 2023).

Os ímãs de NdFeB são classificados como mais potentes disponíveis comercialmente, superando outras categorias de ímãs permanentes como os de Samário-Cobalto ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) e Alnico (Prosperi *et al.*, 2019; CERTI, 2017). As propriedades magnéticas dos ímãs permanentes são influenciadas pelas condições de processamento e podem incluir outros ETR, como praseodímio (Pr), térbio (Tb) e disprósio (Dy) para aumentar a coercividade e o desempenho em altas temperaturas

(München; Stein; Veit, 2021; Prosperi *et al.*, 2019). Além disso, a adição de metais de transição, como cobalto (Co), gálio (Ga) e cobre (Cu), durante a fabricação dos ímãs, tem como objetivo alcançar características magnéticas específicas como remanência, coercividade e produto de energia magnética (Nlebedim; Rei, 2018; Prosperidade *et al.*, 2019). Eles produzem campos magnéticos poderosos que auxiliam na redução do tamanho do produto, melhoram o desempenho e reduzem os custos de produção. Esses ímãs são normalmente revestidos ou banhados para evitar quebras, lascas ou desintegração em pó porque são frágeis e propensos à corrosão.

O mercado global de ímãs permanentes atingiu US\$ 1.0108,4 milhões em 2021 e o mercado deve atingir US\$ 22.192 milhões até 2031 (*Business Research*, 2024¹). O setor de motores elétricos está em crescimento devido à rápida urbanização, com destaque para o setor automotivo, um dos principais usuários desses metais. O aumento da população impulsiona igualmente a expansão das instalações de energia eólica para atender às demandas energéticas (IMARC, 2023; Goto, 2021). Além disso, os robôs industriais, de serviços profissionais e pessoais, muitos dos quais dependem de ímãs permanentes, estão contribuindo para a demanda global. Prevê-se um crescimento significativo de aproximadamente 10% nas categorias robóticas (Heim; Vander Wal, 2023; Dong *et al.*, 2017; Drobniak; Mastalerz, 2022).

Empresas como a *Noveon*, fabricante de ímãs permanentes nos Estados Unidos, estão contribuindo para a economia circular ao obter uma fonte secundária de minerais pós-consumo recuperados através da solução tecnológica patenteada de ímã para ímã, conhecida como *Magnet-2-Magnet* (M2M) (Zakotnik e Tudor, 2015). Essa abordagem inovadora destaca o sistema de circuito fechado na indústria de ímãs, sugerindo um futuro promissor para práticas sustentáveis (Zakotnik *et al.*, 2008; Sheridan *et al.*, 2016).

No que diz respeito à recuperação pré-consumo, os resíduos da produção de ímãs também representam fontes significativas de materiais para recuperar, uma vez que, em média, 30% do peso total dos ímãs é perdido durante a etapa de usinagem (Nlebedim, King; 2018). Todavia, para reciclar os elementos Nd, Pr, Fe e B a partir dos resíduos dos vários processos na unidade fabril, são necessários ajustes no material recuperado para ser usado na fabricação de ímãs de alto desempenho (YUE

¹ <https://www.businessresearchinsights.com/pt/market-reports/rare-earth-magnet-market-102834>

et al., 2018). Apesar da similaridade na composição, a recuperação da fase Nd₂Fe₁₄B oxidada requer aprimoramentos (Bolis *et al.*, 2023). Estudos indicaram que as propriedades magnéticas dos ímãs reciclados atendem às especificações dos originais, mesmo após diversos ciclos (Schönfeldt *et al.*, 2023). Assim, é essencial explorar maneiras de recuperar os ETR de ímãs e reutilizá-los como matérias-primas secundárias para novos produtos (Hagelüken; Meskers, 2010). Neste contexto, destaca-se que algumas soluções tecnológicas para recuperar material secundário de alto valor são adaptadas de processos minero-metalúrgicos tradicionais, o que representa um aspecto positivo da mineração urbana (Xavier *et al.*, 2023). Por outro lado, a gestão estratégica dos materiais de fonte secundária é essencial para gerar novos ímãs em larga escala (Kumari; Sahu, 2023). A implementação de regulamentações e normas é crucial para orientar as ações das organizações.

No Brasil, a regulamentação referente à recuperação de produtos pós-consumo, remanufatura de eletrônicos e processos ESG (Ambiental, Social e Governança) é limitada (Xavier *et al.*, 2023). No entanto, o Brasil progrediu recentemente na regulamentação dos minerais estratégicos através da política pró-minerais², endossando a importância de diferentes materiais, incluindo os ETR (CTAPME, 2022).

Neste momento, menos de 1% dos ETR presentes em produtos pós-consumo são reciclados, devido à falta de logística de coleta, falta de informações sobre disponibilidade de materiais para reciclagem e *design* pouco amigável do produto (Lixandru *et al.*, 2017). Portanto, é claro que há uma lacuna na literatura que necessita ligar a logística reversa dos ímãs com as soluções tecnológicas para recuperar ETR (Shahbaz, 2022; Yuksekdogan *et al.*, 2021). É importante investigar a circularidade dos ímãs NdFeB devido às perdas de material no pré e pós-consumo. Isso pode criar uma fonte secundária desses minerais (ETR) para uso industrial em larga escala, promovendo a cadeia de suprimentos de ciclo fechado (Jin *et al.*, 2018).

Para otimizar as cadeias de suprimentos resilientes, é crucial ter conhecimento sobre as soluções tecnológicas para recuperar ETR (Fujita; McCall; Ginosar, 2022). Investidores têm buscado empresas sustentáveis como requisito para cordos comerciais internacionais, buscando mitigar os riscos de queda no valor das

²<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pro-minerais-estrategicos>

ações relacionados à reputação, danos à marca e acidentes ambientais (Rebecosam, 2019). A gestão de materiais de fonte secundária precisa ser aprimorada estrategicamente para uso em escala industrial (Kumari; Sahu, 2023). A consolidação dos volumes de Ímãs permanentes para tornar os processos economicamente viáveis ainda é um desafio importante (Kumari; Sahu, 2023; Xavier *et al.*, 2023). Investidores estão cada vez mais buscando organizações sustentáveis como um requisito-chave para acordos comerciais internacionais, visando reduzir o risco de desvalorização das ações devido a problemas de reputação, danos à marca ou incidentes ambientais (Rebecosam, 2019). Explorar a gestão dos volumes de ímãs permanentes para tornar os processos economicamente viáveis é crucial e continua sendo um desafio (Kumari; Sahu, 2023; Xavier *et al.*, 2023).

Este estudo responde à alta demanda de ímãs de NdFeB em aplicações industriais e de consumo (Rademaker *et al.*, 2013), e a urgente demanda de lidar com o crescente problema da disposição inadequada de resíduos eletrônicos, visando a recuperação potencial de ETR ligados ao produto. No Brasil, a quantidade de ímãs de NdFeB não é precisamente conhecida, porém, presume-se que contenham uma quantidade substancial de ETR, resultante de sua extensa utilização em diferentes produtos (Gutfleisch *et al.*, 2011).

A reciclagem de resíduos de ímãs de NdFeB pode ser um método potencial para produzir e obter materiais secundários. Até o momento, mais de 300.000 toneladas de ímãs de NdFeB foram produzidas, e aproximadamente 3.300 a 6.600 toneladas de ETR podem ser recuperadas anualmente a partir de ímãs residuais (Ding; Harvey; Wang, 2020). Além disso, a recuperação de materiais secundários de resíduos de ímãs não apenas conserva recursos naturais, mas também reduz custos e melhora a eficiência energética em vários setores industriais. Uma compreensão mais aprofundada do volume desses materiais pode facilitar o planejamento e implementação de estratégias eficazes de recuperação no Brasil. A tendência global em direção à economia circular possibilita o desenvolvimento de cadeias de suprimento dedicadas à obtenção de materiais estratégicos da "mina urbana". Para que o Brasil seja capaz de recuperar recursos secundários, é crucial responder às seguintes questões:

(1) Quais soluções tecnológicas são mais viáveis ambientalmente para serem implementadas no processo de recuperação dos ETR a partir de ímãs de NdFeB pré e pós-consumo?

(2) Qual a quantidade de ímãs de NdFeB pós-consumo em território nacional?

1.1 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa tem como escopo, procurar soluções de engenharia, passíveis de serem aplicadas ao processo tecnológico de recuperação de ETR de ímãs de NdFeB pós-consumo, identificando também as principais fontes de mineração urbana no Brasil.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A fim de atingir o objetivo geral da tese, os objetivos específicos foram desenvolvidos:

- a) Identificar e estudar as soluções tecnológicas existentes para recuperar ETR a partir de ímãs de NdFeB pós-consumo;
- b) Identificar e analisar os requisitos legais e normativos;
- c) Analisar comparativamente as soluções tecnológicas com base em critérios de categorização, eficiência e sustentabilidade;
- d) Comparar a maturidade de soluções tecnológicas para obter materiais secundários em escala laboratorial e industrial; e
- e) Analisar a viabilidade de recuperar material secundário considerando diferentes estágios da cadeia de valor de ímãs de NdFeB e respectivos atores.

1.3 JUSTIFICATIVA

A pesquisa é relevante pelo uso estratégico de ETR em tecnologias emergentes, o que impacta o crescimento econômico do país pela crescente demanda global (Yue *et. al.*, 2019; Zhou; LI; Chen, 2017). Este crescimento é impulsionado não apenas pela demanda interna, mas principalmente pela crescente internacionalização dos mercados e pela transição global para fontes de energia mais limpas, que requerem uma gama diversificada de minerais (Yukari, 2024). Em 2021, diversos metais, incluindo alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel,

ouro, vanádio e zinco, contribuíram com aproximadamente R\$ 313 bilhões para a economia do Brasil (ANM, 2020).

O Brasil, com seus abundantes recursos naturais, destaca-se como um fornecedor estratégico, detendo a terceira maior reserva de minerais de terras raras do mundo (CONEXÃO MINERAL, 2020; Drobniak; Mastalerz, 2022). Essa posição privilegiada confere ao país um papel significativo no cenário mundial, especialmente diante da diversidade mineral brasileira e da crescente demanda em tecnologias de ponta, que abrange o uso dos ETR como o neodímio, disprósio e lantânio, despertando o interesse de investidores e pesquisadores globais (Drobniak; Mastalerz, 2022).

Nessa percepção algumas estratégias estão sendo exploradas para obter óxidos de terras raras (OTR), matéria-prima para produção dos ímãs de NdFeB a partir do rejeito da produção de nióbio pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM). Em 2024, a mineradora Serra Verde localizada em Minaçu (GO), iniciou a produção comercial do concentrado misto de terras raras, e estima-se uma produção com capacidade de pelo menos 5.000 toneladas por ano de OTR (Mineração Serra Verde, 2024). A *Energy Fuels*, empresa americana, planeja investir R\$134 milhões para exportar de 3.000 a 10.000 toneladas anuais de concentrado de monazita, além de 1.500 a 5.000 toneladas de OTR (BRASIL MINERAL, 2023). Com esse investimento, a *Energy Fuels* visa não apenas aumentar sua capacidade de exportação, mas também se estabelecer como líder nesse setor e impulsionar o desenvolvimento econômico da região.

A mineração de ETR enfrenta desafios significativos, como a complexidade geológica, já que a monazita é frequentemente associada a outros minerais, demandando processos de separação específicos (Giese; Lins; Xavier, 2021).

Práticas de mineração inadequadas podem causar danos ecológicos sérios, incluindo degradação de habitats, contaminação de água e solo, conflitos sociais e a geração de coprodutos radioativos, como urânio e tório (Sepe; Herrmann; Salvador, 2021; Weng *et al.*, 2016). Em termos sociais, as comunidades enfrentam problemas de saúde devido à poeira contendo radiação gama, condições de trabalho insatisfatórias e conflitos geopolíticos (Balaram, 2019; Schlör *et al.*, 2017; Bailey *et al.*, 2017). Além disso, regulamentações rigorosas podem atrasar ou barrar projetos, aumentando custos e transformando a mineração primária em uma atividade de alto

risco econômico devido ao longo tempo de retorno (Araujo; Olivieri; Fernandes, 2014; Ali, 2014; Schloer *et al.*, 2017).

O crescimento de 94% nas vendas de emissões de gases de efeito estufa (GEE) na última década, segundo Rizos *et al.* (2022), destaca a ascensão do mercado de emissões, impulsionado por maior conscientização e regulamentações. Sistemas como o de comércio de emissões da China, o maior do mundo, também contribuem. Projetos sustentáveis e avanços na verificação tornam os mercados de carbono mais eficientes. Por outro lado, a heterogeneidade nas abordagens regulatórias entre países pode criar desafios, especialmente para empresas que operam em múltiplas jurisdições. A harmonização de regras e a implementação de plataformas digitais para rastrear e registrar emissões são tendências que visam facilitar essa transição e fortalecer a credibilidade dos mercados de carbono.

Visando mitigar o risco de suprimento, incertezas do mercado, problemas socioambientais e a limitada substituição de elementos (Adibi; Lafhaj; Payet, 2018), novas técnicas têm sido criadas para promover a recuperação dos ETR, reduzindo a extração de recursos naturais não renováveis e o descarte de resíduos sólidos (Baldé *et al.*, 2017; Stalter, 2022). A estratégia de MU possibilita a recuperação de recursos secundários de produtos pós-consumo (Xavier; Ottoni e Abreu, 2023), que contêm quantidades significativas de matérias-primas e metais com alto valor agregado (Cardoso *et al.*, 2016; Giese *et al.*, 2021). No caso de produtos pós-consumo com ímãs de NdFeB, soluções de reciclagem demandam 88% menos energia e resultam em 98% menos toxicidade à saúde humana em comparação à extração primária (Jin *et al.*, 2018; Sprecher; Kleijn; Kramer, 2014).

Nesse cenário, os países consumidores buscam alternativas de suprimento, como recuperar componentes de produtos em fim de vida. Grandes empresas, tais como: Umicore (Bélgica), Sims (Estados Unidos), Solvay (França), Boliden (Suécia), Metallo-Chimique (Bélgica) e Aurubis (Alemanha) e IonicRE (Austrália), têm se dedicado a modelos de negócios para recuperar materiais de fonte secundária (Xavier; Lins, 2018; Firdaus *et al.*, 2016). Atualmente, a maioria dos materiais valiosos é enviada para países com tecnologia adequada para extrair os ETR para a indústria (Ottoni; Dias; Xavier, 2020). Esses materiais secundários impulsionam a mobilidade sustentável e o fornecimento de energia limpa, contribuindo economicamente para o desenvolvimento dos países (Firdaus *et al.*, 2016).

Um fator motivador é o Laboratório-Fábrica de Ímãs de Terras Raras (LabFabITR), uma iniciativa do Governo de Minas Gerais e da Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE). O LabFabITR, representado na Figura 1, é o primeiro laboratório fábrica de ligas e ímãs de terras raras do hemisfério sul, localizado em Lagoa Santa, a 41 km de Belo Horizonte. Como parte de um esforço nacional para desenvolver a cadeia de suprimentos de ímãs de terras raras (ITR), a sua capacidade produtiva de até 100 toneladas por ano. Em seu processo, a produção gera resíduos, e o uso de material secundário no pré-consumo "*in factory*" valoriza a redução da exploração de materiais primários, promovendo a economia circular e soluções inovadoras. Além disso, o laboratório pode atender parte da demanda brasileira com materiais secundários do processo produtivo do ímã de NdFeB, apoiando empresas que utilizam esse ímã em seus produtos, entidades de gestão de resíduo eletroeletrônico, e a pesquisa e desenvolvimento de novos produtos e processos que utilizam ímãs (LABFABITR, 2023).

Figura 1 - Laboratório Fábrica de ITR



Fonte: LabFabITR (2023)

A estruturação da cadeia de ITR nacional é desafiadora, especialmente em relação à viabilidade econômica (Raspini *et al.*, 2022; Drusche *et al.*, 2019). A nova cadeia deve ser planejada com diretrizes sustentáveis, priorizando questões ambientais e implementando uma economia circular (EC) desde o início (REGINA

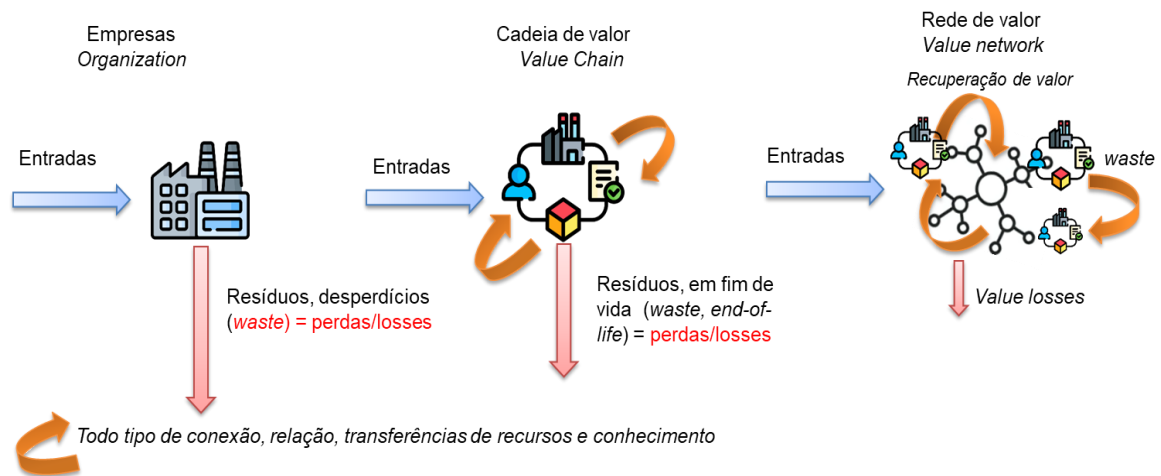
PROJECT, 2023). Assim, recursos secundários, tanto pré quanto pós-consumo, são essenciais para criar uma cadeia de ciclo fechado na produção de ímãs.

Este trabalho está alinhado com várias instituições, incluindo: i) o projeto de cooperação Brasil e Alemanha — Projeto REGINA (*Rare Earth Global Industry and New Applications*), que visa desenvolver toda a cadeia produtiva de ímãs de terras raras, da mineração à produção; ii) o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Processamento e Aplicações de Ímãs de Terras Raras para Indústria de Alta Tecnologia (INCT-PÁTRIA); iii) o laboratório GRANIOTER (de grafeno, nióbio e terras raras), um projeto prioritário do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), financiado pela FINEP e sediado no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN). Além disso, a pesquisa está inserida no projeto n.º 27/2022, sobre MU e Reciclagem de Ímãs Permanentes de Terras-Raras (CNPq), com término previsto para 2025 (CDTN, 2023).

Assim, este trabalho visa contribuir para essas iniciativas, incorporando à MU uma ferramenta da economia circular que busca reinserir materiais secundários nas cadeias produtivas, como alternativa para mitigar os impactos da exploração de recursos naturais e os riscos de contaminação decorrentes da gestão inadequada de resíduos (Xavier *et al.*, 2023). Esses fatores destacam a urgência de mais pesquisas sobre a viabilidade técnica e ambiental da recuperação de ETR de ímãs de NdFeB pós-consumo, incluindo as limitações e benefícios na obtenção de materiais secundários. A estratégia de mineração urbana voltada para a cadeia circular de ITR no Brasil enfoca a recuperação de materiais secundários, a quantidade disponível desses componentes e os processos de coleta e desmantelamento.

A circularidade da cadeia de valor, como ilustrado na Figura 2, abrange atividades essenciais para a produção circular, incluindo extração, transformação, manufatura, entrega ao consumidor final e disposição pós-consumo ou recuperação de materiais (Comissão Europeia, 2023). Essa integração visa eficiência econômica e sustentabilidade ambiental, com cada etapa se retroalimentando para reduzir desperdícios e otimizar recursos. Em resumo, a cadeia de valor e a gestão de desperdícios são componentes essenciais para alcançar eficiência econômica e sustentabilidade ambiental. Ao integrar essas práticas, as empresas podem criar sistemas mais resilientes e responsáveis.

Figura 2 – *Framework* da circularidade da cadeia de valor



Fonte: Autora adaptado de Zocolli (2023)

Além disso, a colaboração e integração entre diferentes setores é necessária para o compartilhamento de *know-how*, redefine as relações entre produtores, consumidores, entidades gestoras de REEE, cooperativas de catadores, pesquisadores, impulsionando uma conscientização coletiva sobre a importância de minimizar a pegada ecológica e fomenta uma avaliação constante das rotas de circularidade (Ottoni; Dias; Xavier, 2020; Burkhardt *et al.*, 2020). Os atores da cadeia de valor de ITR serão apresentados na seção 4.6 desta tese.

Este estudo, portanto, não só fornece uma base teórica robusta, corroborando com conhecimento científico, mas também ajuda na visibilidade de uma cadeia de suprimentos de ITR circular destacando as vantagens e as limitações das soluções tecnológicas existentes. O compromisso com a recuperação de ímãs pré ou pós-consumo será um passo estratégico para a construção de um futuro mais sustentável e tecnologicamente avançado. O envolvimento dos atores da cadeia será essencial para promover as pesquisas necessárias e fomentar uma cultura de inovação que priorize a recuperação de recursos, com estimativa de volume a ser recuperado de produtos pós-consumo, assegurando a competitividade no mercado global.

1.3.1 Relevância e ineditismo

A cadeia nacional de suprimentos de ímãs de NdFeB está sendo estruturada. Portanto, os resultados desta pesquisa auxiliam no planejamento dessa cadeia, orientando ações para reter no Brasil os recursos pós-consumo que, atualmente, são

enviados a outros países com tecnologias adequadas para sua extração. O estudo sobre soluções tecnológicas para a recuperação de material secundário de ímãs de NdFeB é uma área em desenvolvimento com grande valor agregado, evidenciando a necessidade de processamento do material pós-consumo.

A complexidade do sistema nas bases de dados nacionais foi identificada pela primeira vez, permitindo o diagnóstico em toneladas/ano da quantidade de ímãs de NdFeB. Isso despertou o interesse da indústria produtora e de transformação para interagir com o governo, visando uma abordagem de modelo de negócio responsável. Considerando ações de investimento em infraestrutura de reciclagem de ímãs e recuperação de neodímio, a capacidade do país de atender à demanda por ímãs de NdFeB, a redução do risco de ruptura no fornecimento de matéria-prima e o beneficiamento da indústria nacional. Além disso, a utilização de recursos alternativos na fabricação de ímãs traz vantagens ambientais em tecnologias de baixo carbono e gera emprego e renda no setor de Logística Reversa (LR), minimizando os impactos da mineração nas comunidades.

A contribuição científica deste estudo é inédita ao explorar os processos para a recuperação de ETR de ímãs permanentes, de resíduos pré e pós-consumo como materiais secundários. Os processos tecnológicos para reciclagem existente nacionalmente, permitiu a comparação dos níveis de maturidade das tecnologias em escala industrial e laboratorial. Em relação a contribuição do arcabouço legal e normativo, a participação no comitê de estudos especial de economia circular da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT/CEE-323), permitiu o entendimento de conceitos, orientações e ferramentas de apoio à implementação de projetos circulares (ABNT, 2022). O diagnóstico da quantidade de ímãs permanentes, apresentando as limitações das bases de dados nacionais, podem ser usados como referência para fundamentar as bases teóricas relacionadas a EC e MU que compreendem a sustentabilidade da indústria de ímãs de NdFeB. Além disso, a integração com os *stakeholders*, oportuniza construir um modelo de negócio circular na cadeia de suprimentos dos ímãs de NdFeB.

Em conclusão, o estudo está alinhado com a área de concentração de metais, com foco nos materiais e desenvolvimento sustentável do Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

1.3.2 Lacunas do conhecimento

Esta pesquisa busca preencher três lacunas: i) a viabilidade técnica e ambiental na recuperação de material secundário de ímãs de NdFeB, ii) o volume disponível para reciclagem, e iii) a integração dos atores da cadeia de suprimentos para gerenciar materiais pré e pós-consumo.

Na pesquisa intitulada “*A Systematic Classification and Labelling Approach to Support a Circular Economy Ecosystem for NdFeB-Type Magnet*” (Burkhardt *et al.* 2020), constataram que vários desafios críticos precisam ser enfrentados na reciclagem, por exemplo, como lidar com as várias composições químicas e impurezas no fluxo de resíduos, estado de corrosão como teor médio de oxigênio do lote, a quantidade em toneladas por ano, e a introdução em projetos à reciclagem que facilita acesso ao ímã.

Além disso, os investidores têm buscado empresas sustentáveis, uma vez que estas têm menor risco de queda abrupta no valor das ações por perda de reputação da marca envolvendo acidentes ambientais (Rabe *et al.*, 2017). Assim, é evidente a necessidade de gerenciamento de produtos pós-consumo, seguido das vias de circularidade como reparo, reutilização, remanufatura e reciclagem dos ímãs (Bernon; Tjahjono; Ripanti, 2018). Tal que, a previsão de ímãs de NdFeB dobrará nos próximos dez anos (Burkhardt *et al.* 2020).

Uma linha de pensamento semelhante é definida no relatório Usos e Aplicações de Terras Raras no Brasil: 2012-2030, (CGEE, 2013), na qual afirma que os recursos minerais no Brasil deverão ser explorados de maneira sustentável, com foco no horizonte de 2030 com visão da cadeia produtiva de ITR, ambientalmente sustentável. Os processos de transformação de ímãs de NdFeB em material secundário, como insumo para fabricação de novos ímãs, corrobora principalmente para a orientação da fábrica nacional de ímãs LabFabITR, uma vez que, estudos anteriores apresentaram uma estimativa de 6,7 toneladas/ano de resíduo pré-consumo (Fernandes, 2019). Assim, esses resíduos do processo fabril são considerados material secundário, sendo aquele reinserido na cadeia produtiva) (Xavier *et al.*, 2023).

Tais fatos demonstram a necessidade de novas abordagens diante da quantidade de resíduos gerados pré e pós-consumo, e podem nos dar um parâmetro do tipo de método para a recuperação, sendo necessário estudos envolvendo análises

de critérios sobre impacto ambiental e facilidade tecnológica assegurada (Patil *et al.*, 2020).

1.4 DELIMITAÇÃO DO TEMA

As soluções tecnológicas para a transformação do resíduo magnético são evidenciadas a partir da literatura e não faz parte do escopo desta pesquisa desenvolver novos processos de reciclagem de ímãs de NdFeB para recuperar os elementos de terras raras. A pesquisa engloba um arcabouço legal e normativo para orientar as empresas produtoras, bem como a indústria de transformação.

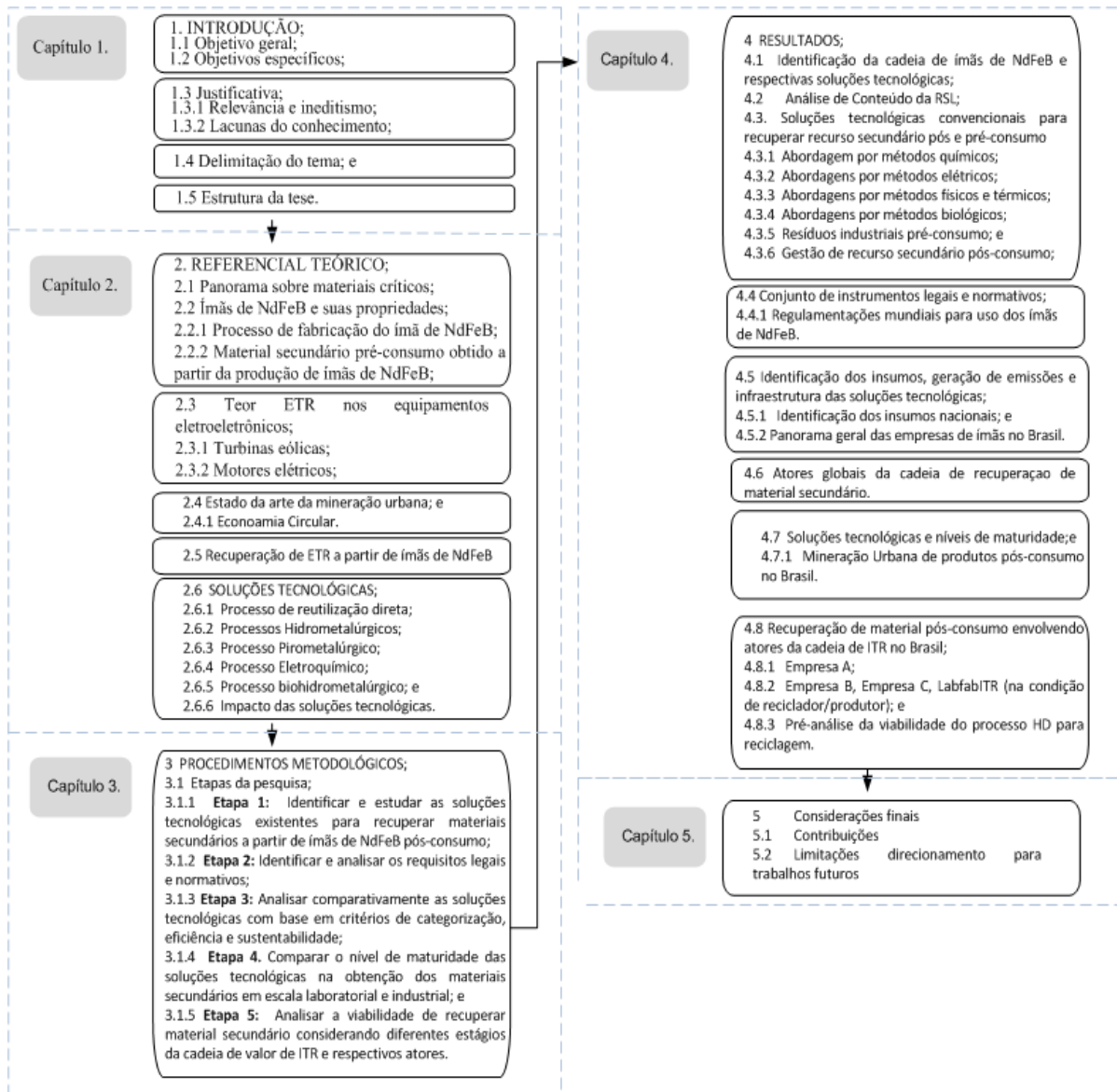
Ademais, para cada solução tecnológica não foram realizados estudos econômicos devido à inexistência de uma planta que faça o processo de transformação do ímã em nosso país. Para tanto, seria necessário o desenvolvimento de um planejamento industrial focado na viabilidade econômica na atual indústria de ITR, o que está fora do escopo desta tese.

Por fim, a consolidação das informações envolvendo agentes da cadeia de valor como empresas produtoras, da indústria de transformação, as entidades que recebem o produto, desmantelam e armazenam o ímã de NdFeB. Essa consolidação das informações deve ser constantemente revisada, independentemente do nível da organização (pequeno/grande porte), considerando o contexto em que a indústria se insere em dado momento, conceituando os resíduos magnéticos tanto no pré-consumo, como pós-consumo, como material secundário de alto valor agregado.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está organizada em cinco capítulos, sendo que cada capítulo compreende de subtópicos. A Figura 3 apresenta uma visão macro da estrutura da tese.

Figura 3 – Visão macro da estrutura da tese



Fonte: Autora (2023)

Conforme a figura acima o primeiro capítulo apresentado é a introdução, a qual contém a contextualização do tema, os objetivos e justificativas da pesquisa. No segundo capítulo é apresentado o referencial teórico, abrangendo os temas de interesse desta pesquisa, composto pelos respectivos tópicos: 2.1) panorama global sobre materiais críticos e estratégicos, em que são apresentados iniciativas, definições e conceitos; 2.2) apresenta o histórico dos ímãs de terras raras, bem como sistema produtivo, propriedades tecnológicas e considerações ao material secundário pré-consumo; 2.3) exibe o mercado e o teor de ETR a partir de ímãs de NdFeB nos produtos pós-consumo; 2.4) que apresenta a mineração urbana como benefícios sociais e econômicos significativos, para gerenciar a recuperação de valor de ímãs

pós-consumo; 2.5) composto por uma revisão literária sobre a recuperação de ETR a partir dos ímãs de NdFeB no pós-consumo, apontando dentre as soluções tecnológicas existentes as suas vantagens e limitações.

No terceiro capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados no desenvolvimento dessa pesquisa divididos em cinco etapas. Em cada fase são apresentados os objetivos e o detalhamento dos métodos empregados.

O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões e inclui os seguintes tópicos: 4.1) composto por soluções tecnológicas para recuperar material secundário a partir de ímãs de NdFeB identificadas com RSL, análise de conteúdo e posterior proposição de um fluxo de ciclo fechado; 4.2) apresenta um conjunto de instrumentos legais e normativo no que se refere a gestão de resíduos mundiais; 4.3) identificação de insumos com dados nacionais, geração de emissões e infraestrutura das soluções tecnológicas para recuperação de material secundário. 4.4) atores globais da cadeia de recuperação de material secundário; 4.5) soluções tecnológicas e níveis de maturidade; 4.6) recuperação de material pós-consumo envolvendo atores da cadeia de ímãs de NdFeB no Brasil.

Finalmente, no quinto capítulo são apresentadas as considerações finais, a contribuição deste estudo, bem como sugestões para futuros trabalhos. A estrutura organizada e detalhada do estudo, aliada a uma análise rigorosa dos dados e métodos, proporciona uma base sólida para futuros desenvolvimentos e inovações no setor, promovendo uma economia mais sustentável e eficiente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais sobre os materiais críticos e estratégicos, ímãs de terras raras, mineração urbana e as soluções tecnológicas para recuperar material secundário a partir de ímãs de NdFeB. Para tanto, foram realizadas revisões bibliográficas narrativas e exploratórias. O detalhamento metodológico da condução destas revisões é exposto no terceiro capítulo.

2.1 PANORAMA SOBRE MATERIAIS CRÍTICOS

Os recursos minerais são importantes para a economia atual e continuarão presentes no futuro (IRTC, 2020). Nesse entendimento, o conceito de mineral crítico ou estratégico está relacionado à importância global dos metais que estão sujeitos a riscos de acesso e fornecimento (Mishra, 2016). Na época da Guerra Fria (1945-1963) esse conceito foi consolidado devido à escassez de minérios, para a fabricação de produtos utilizados pelas forças armadas, inclusive com realização de estoques por alguns países, intitulado o termo “estratégicos” (Klinger, 2015).

A aceleração das inovações tecnológicas e a expansão das economias em evolução levaram a uma progressiva busca por matérias primas críticas (Talens Peiró *et al.*, 2018). As cadeias de produção industrial dependem de muitos insumos finitos e não renováveis para incontáveis aplicações, com destaque para as tecnologias portadoras de futuro (Nassar *et al.*, 2015; ANM, 2020). Diante disso, se as ambições climáticas globais previsíveis forem concretizadas, a procura de neodímio poderá aumentar dez vezes (Elshkaki, 2021; Alves Dias *et al.*, 2020). Principalmente, em aplicações nos motores elétricos e turbinas eólicas, pois essas iniciativas de descarbonização conectam o setor da mineração e a indústria de transformação, à medida que a demanda da matriz energética dos países aumenta (Koji Tokimatsu *et al.* 2017). Uma vez que, estima-se um aumento de seis a sete vezes o uso das matérias primas críticas em ímãs de NdFeB até 2050 (Comissão Europeia, 2023).

Algumas matérias primas minerais detêm importância econômica, social e de segurança, tanto por uma crescente demanda e aplicações de alto valor agregado, quanto por seu risco de escassez ou suprimento (Castro; Peiter; Góes, 2020). No caso da energia eólica quando é usada para gerar um fluxo de energia, por exemplo o ímã de NdFeB contido no equipamento pós-consumo, isto é, após seu ciclo de vida,

retornam como uma fonte de material secundário fomentando a mesma cadeia ou outras, sendo possível a transformação (reciclabilidade) (Fabre *et al.*, 2020). Nessa lógica, outros metais contidos nos *smartphones* como índio, lantânio, gálio, níquel, magnésio, lítio, cobalto, neodímio, dentre outros podem vir a contribuir como recurso secundário (Venditti, 2021).

Apesar do nome, as terras raras não são tão raras. Eles podem ser encontrados em subsolos de todo o mundo, a maior porcentagem de depósitos lavráveis encontra-se na China (37%), Vietnã (18%) e Brasil (17%), porém os depósitos economicamente exploráveis na crosta terrestre são de facto raros (USGS, 2023). Esses números variam ligeiramente com novas descobertas e tecnologias de mineração, mas a predominância da China no mercado de terras raras permanece uma constante. Logo, a criticidade dos metais pode ser identificada por vários fatores e indicadores, aqueles que: i) apresentam abundância, ou carência, ii) semelhanças nas metodologias que integram entendimento de alto risco de oferta, ou iii) alterações nas prioridades nacionais e institucionais para um país (Hayes; McCullough, 2018). Outrossim, Gaustad *et al.* (2018) considera os recursos críticos, sendo aqueles que: i) exibem problemas em seu suprimento, ii) apresentam limite de substituição, ou são iii) empregados no setor de energia limpa, saúde, defesa e eletrônicos. A evolução tecnológica melhorou o estilo de vida, qualquer interrupção nesse estilo de vida pode ser desfavorável (Omodara *et al.*, 2019). Além disso, a criticidade ou não do mineral contido nos produtos podem vir a se modificar, dependendo do mercado e demanda, bem como o surgimento de substituto e o que é mineral crítico para um país pode não ser para outros, sendo necessário identificá-los de acordo com suas respectivas cadeias produtivas (IPEA, 2022).

A Comissão Europeia (2020), observou que as matérias primas essenciais se revelam na cadeia de valor, tanto na extração como na transformação. Embora a União Europeia seja líder mundial na produção de produtos como turbinas eólicas e motores de tração para automóveis, não produz ETR. Estes elementos estão presentes em minerais como a monazita, bastanasita, xenotímio e argilas iônicas (Koltun; Tharumarajah, 2014).

No ano de 2010, o monopólio chinês atingiu 97% do fornecimento de terras raras, sob a forma de matérias primas, produtos e componentes de materiais de alta tecnologia. Neste período, o país começou a restringir fortemente as suas exportações, gerando forte impacto na demanda mundial de forma a ultrapassar a

oferta desses elementos (Lapido-Loureiro, 2013). No entanto, conforme Nakano (2021), com o surgimento da pandemia da covid-19, as cadeias de suprimentos apresentaram fragilidades, tanto para produtos farmacêuticos e suprimentos médicos essenciais, quanto para alguns minerais. Outro fator, relacionado à oferta ameaçada têm sido a guerra de agressão da Rússia contra a Ucrânia em 2022, que cada vez, realça os graves efeitos de tais fornecimentos em tempos de crise, comprometendo ao mesmo tempo o emprego e a criação de emprego, bem como a alta no custo da energia na Europa (Comissão Europeia, 2023).

Visando mapear essas possíveis ameaças ao suprimento, a União Europeia (UE), Estados Unidos, Japão e Índia, realizam estudos sobre a disponibilidade mundial e risco de suprimento de dezenas de Materiais Críticos (MCs) como meio de identificar quais dentre os minerais devem ser considerados críticos (Castro *et al.*, 2023). O acesso fiável e sem entraves a determinadas matérias primas é uma preocupação crescente na União Europeia e em todo o mundo (Comissão Europeia, 2023).

Em 2021, no Brasil através do Decreto nº 10.657, foi instituído o Programa que define a Política de Apoio ao Licenciamento Ambiental de Projetos de Investimentos para a produção de minerais estratégicos, com Comitê Interministerial de Análise de Projetos de Minerais Estratégicos (CTAPME) e do Programa “pró-minerais estratégicos”. O estudo aborda o nível de importância de cada substância mineral no desenvolvimento de outros setores, para além da indústria extrativa, o que denota a construção do ‘valor estratégico’ para cada substância (MME, 2021).

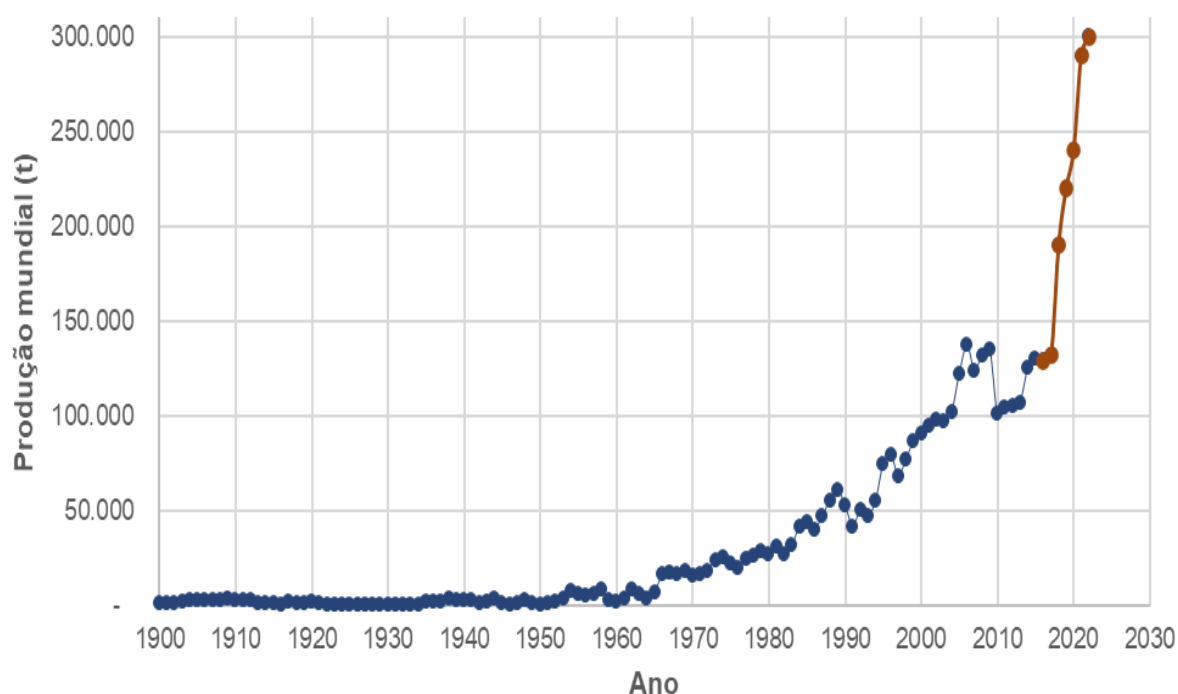
No Brasil, de forma análoga aos demais países citados, o tema referente é significativo para o Governo Federal e está entre as prioridades (MARTINS *et al.*, 2014). Dentre os ETR mais utilizados na produção mundial, destacam-se: neodímio (Nd -25%), praseodímio (Pr – 6%) e disprósio (Dy – 1%) (Wulf *et al.*, 2017). Estima-se que as reservas globais de terras raras somam 130 Mt (USGS, 2023). Porém, a maior parte dessas reservas são economicamente inviável para ser explorada devido à presença em depósitos de difícil acesso e às baixas concentrações de terras raras nos minerais em que estão disponíveis, tornando sua extração custosa e tecnicamente difícil (Ciacci *et al.*, 2019).

O insumo para o processo de diversos setores industriais como a metalurgia, ímãs, pós para polimento, vidros, cerâmicas, entre outros, é na forma de OTR (Mancheri; Marukawa, 2016). Diante disso, é importante ressaltar a diferença de OTR

de ETR. Os OTR são compostos químicos formados pela combinação de oxigênio com um ou mais elementos das terras raras, como o lantânio, cério, neodímio, entre outros e são pós refinados e arenosos, geralmente marrons ou pretos, mas podem ser de cor clara. Já os ETR são os próprios elementos químicos pertencentes ao grupo das terras raras na tabela periódica (Martins *et al.*, 2005; Lima, 2017).

De forma a apresentar o histórico de produção mundial de OTR, a partir dos anos de 1900 a 2019, foi criada a Figura 4, com a junção dos dados obtidos dos relatórios *Data Series* e do *Mineral Commodity Summaries*.

Figura 4 – Produção mundial de OTR no período 1900 a 2023.



Fonte: Autora (2023), com base nos dados de Data Series 140 (2015) e *Mineral Commodity Summaries* (USGS, 2018 a 2023).

Observa-se nos valores da produção mundial de OTR supracitados, que aproximadamente a partir de 1966 o mercado de ETR começou a acelerar, principalmente em decorrência do crescimento industrial. O quantitativo total da produção mundial de OTR, para o ano de 2022 foi de 300.000 toneladas métricas³. Do total, a China foi responsável por 210.000 toneladas métricas produzidas de OTR, sendo que os maiores depósitos de ETR se concentram na China (44 milhões de

³ Tonelada métrica, cujo símbolo é t, consiste numa unidade de massa que não pertence ao sistema internacional (SI) e é equivalente a 10^3 kg. Por razões de extensão, o sistema internacional permite utilizá-la juntamente com as suas unidades de massa. ([https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/\\$tonelada-metrica](https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/$tonelada-metrica))

toneladas) e no Vietnã (22 milhões de toneladas) (USGS, 2023). Isto demonstra o forte domínio do fornecimento global de ETR por este país. A China também tem uma participação dominante no processamento global de OTR (~85%), sucedida apenas pela Malásia e pela Estônia (IEA, 2022). Além disso, a mesma é a maior consumidora (~150.000 toneladas de consumo aparente de OTR em 2020), seguida pelo Japão, EUA e União Europeia.

O Brasil apresenta a terceira maior reserva de terras raras de todo o mundo, (~21.000.000) toneladas métricas, ao lado da Rússia. Apesar do tamanho das reservas, a extração realizada no país é pequena, é a partir das reservas remanescentes da produção de monazita em uma unidade desativada em Buena, no Rio de Janeiro (CONEXÃO MINERAL, 2020; MME, 2023). No Brasil, recentemente foi descoberto óxidos de neodímio e de praseodímio (Nd e Pr), no estado de Goiânia (Brasil Mineral, 2023).

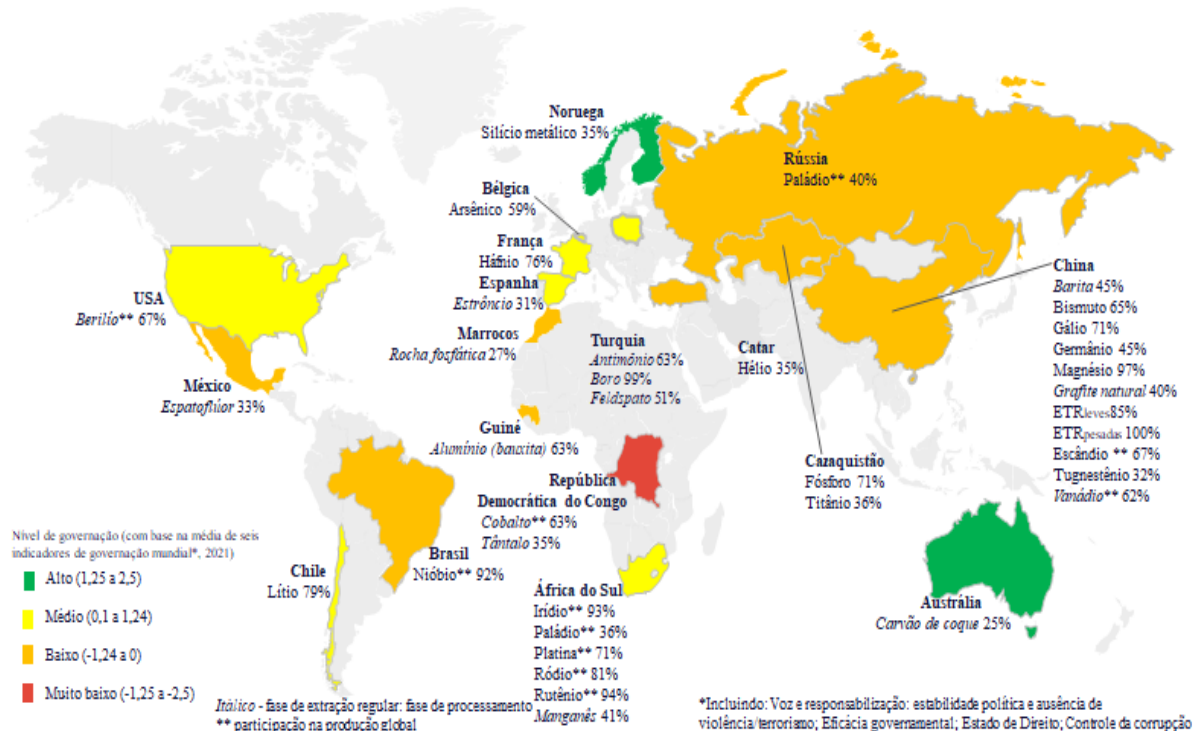
No entanto, a mineração primária tem resultado em impactos ambientais significativos, uma vez que muitos depósitos estão associados a altas concentrações de elementos radioativos, como urânio (U) e tório (Th), o que requer tratamento específico e descarte separado, bem como recursos hídricos, produtos químicos e insumos energéticos (Golev *et al.*, 2014; Bai *et al.*, 2022).

Em consonância, ainda se tem a necessidade de mais recursos humanos, modificação da paisagem devido remoção da vegetação e comprometimento da biodiversidade do local explorado, o que reduz habitat, ocasiona morte de espécimes da flora e da fauna (Mechi; Sanches, 2010; Jyothi *et al.*, 2020). A Figura 5 ilustra um mapa global dos países com a equivalente concentração mineral e apresenta os principais fornecedores de Minerais Críticos (MCs) e seu nível de governança (RMIS, 2023).

Os estudos de criticalidade das matérias primas (ETR) do bloco europeu partem de um levantamento extenso relacionado ao risco de suprimentos desses materiais associados à indústria em todas as fases da cadeia de abastecimento. A exemplo disso, um smartphone menor, pode conter diferentes tipos de metais, contidos de diferentes tamanhos, peso, leveza e funcionalidade, os quais contribuem para que o eletrônico tenha dimensionamento menor (Comissão Europeia, 2023).

Diante dessa breve explanação em relação à criticidade, pontua-se a dependência chinesa: a China foi responsável por 92% da produção global anual de ímãs NdFeB em 2020 (Smith *et al.*, 2022).

Figura 5 – Mapa global dos principais fornecedores de MCs.



Fonte: Adaptado de RMIS (2023, tradução própria)

As importações chinesas são responsáveis por atender 98% da demanda total por ímãs de terras raras (Comissão Europeia, 2023). Nessa lógica, conforme os autores Dushyantha *et al.* (2020), os ETR recuperados a partir de ímãs de NdFeB, por meio de soluções tecnológicas de processamento, é tema de interesse de pesquisa devido ao seu alto valor econômico, e à dependência chinesa (Smith *et al.*, 2022).

A demanda projetada, somada a oferta limitada de ímãs de NdFeB sugerem que Pr, Nd, Tb e Dy resultarão em preços altos, enquanto La e Ce, usados principalmente em indústrias de catalisadores, provavelmente terão preços estáveis ou diminuídos ao longo do tempo devido ao excesso de oferta (Liu *et al.*, 2023).

Assim, promover a recuperação eficiente de materiais críticos é uma das prioridades no plano de ação da União Europeia para a economia circular (Comissão Europeia, 2023). No sentido de auxiliar e reforçar a competitividade da indústria em consonância com a estratégia industrial, as empresas da União Europeia estimulam fortemente a negociação de acordos comerciais e o desenvolvimento de ações de investigação e inovação. A seguir será discutido o emprego dos ETR no processo de fabricação dos ímãs de NdFeB e a demanda por esse componente.

2.2 ÍMÃS DE NdFeB E SUAS PROPRIEDADES

Os ímãs de NdFeB foram descobertos por Sagawa *et al.* (1984), e são produzidos a partir da técnica de metalurgia do pó convencional. Desde então, a descoberta alavancou soluções tecnológicas envolvendo dispositivos mais leves, menores e com mais eficiência (Jin *et al.*, 2018b). Além disso, este componente ao longo dos anos tem mantido os maiores valores de produto-energia máximo $(BH)_{max}$ de 290 kJ/m³ a 474 kJ/m³, dentre todos os ímãs permanentes (Yue *et al.*, 2019). Esta propriedade está relacionada à quantidade de energia que pode ser armazenada em um volume (Lalana, 2018).

Os ímãs permanentes são fabricados a partir de uma liga que contém principalmente Nd e em proporções menores o Pr, Dy, Tb e/ou Gd (Yang *et al.*, 2017; Sugimoto, 2011). Estes elementos menores adicionados à liga tem a finalidade de aprimorar as propriedades magnéticas, como por exemplo o Dy e Tb que eleva a coercividade e melhora o desempenho em altas temperaturas (Nlebedim; King, 2017).

A aplicabilidade destes ímãs permanentes é evidenciada em muitos campos como: informações eletrônicas, eletrodomésticos, tratamentos médicos nos equipamentos de ressonância magnética, aeroespacial, veículos de economia de energia e energia eólica (Ciacci *et al.*, 2019; Yue *et al.*, 2019).

O tipo de aplicação irá definir o material a ser utilizado, por exemplo, os primeiros ímãs comerciais de samário (Sm) e cobalto (Co), são utilizados até hoje, por possuírem propriedades em altas temperaturas superiores aos de NdFeB (Faria; Lima, 2005; Constantinides, 2016). Já os ímãs de NdFeB, possuem as propriedades magnéticas melhores quando comparados com os de Sm-Co, devido ao seu produto energético superior, maior força coerciva e indução remanente, apesar da desvantagem de corrosão e limitação de 150°C à temperatura de utilização, com temperatura de Curie de 350°C (Yang *et al.*, 2017; Gomes, 2015). O Quadro 1 apresenta a descrição das características importantes para produção de ímãs permanentes.

Quadro 1 – Características relevantes para seleção/produção de ímãs de NdFeB

Característica	Descrição da Importância
Disponibilidade e custo da matéria prima	Os ímãs de alto desempenho, são baseados em matérias-primas de maior custo e menor disponibilidade dada à dificuldade geológica de encontrar uma localidade cujo processo de mineração seja viável economicamente. Neste sentido, um fornecimento estável desses insumos por um preço razoável é essencial para a produção do mesmo.
Tamanho, forma e capacidade de fabricação	Na atualidade, tem-se um número significativo de tecnologias e rotas de fabricação para a produção de ímãs com diferentes focos: melhoria das propriedades magnéticas, produtividade, redução de custo, processos <i>net shape</i> , entre outros. Dessa maneira, o foco determinado pelo balanço entre as características de tamanho, forma e capacidade de produção são fatores que ditarão as tecnologias de produção utilizadas em um empreendimento produtor de ímãs permanentes.
Resistividade Elétrica	Em aplicações em que o ímã está sujeito a ação da variação do campo magnético, ex. motores elétricos e geradores, ocorrem à aparição de correntes parasitas no material. Essas correntes parasitas eliminam energia na forma de calor por efeito Joule, diminuindo a eficiência do equipamento durante o funcionamento. Dessa forma, ímãs que possuam alta resistividade elétrica – sem deteriorar suas propriedades magnéticas – reduzem as perdas de energia na forma de calor.
Resistência à corrosão	Importante para aplicações em meios hostis em relação a processos corrosivos, ex. aerogeradores <i>offshore</i> , a resistência à corrosão dos ímãs permanentes pode definir qual o tempo de vida de determinada aplicação. Soluções possíveis incluem a inserção de elementos de liga e diminuição da proporção das fases mais susceptíveis à corrosão, mas a principal atividade realizada nesse sentido está relacionada ao revestimento dos ímãs permanentes.
Temperatura de trabalho	A temperatura possui importantes efeitos nas propriedades magnéticas em relação à densidade de fluxo e à resistência à desmagnetização. Com isso, têm-se faixas de temperatura de trabalho mais adequadas para cada tipo de ímã.
Propriedades magnéticas	Os diferentes tipos de ímãs permanentes apresentam distintos valores para as propriedades magnéticas: Densidade de Fluxo (Br, Remanência); Resistência à desmagnetização (HcJ, coercividade intrínseca); Produto Energia (BH)max; Coeficientes de temperatura α e β ; e Formato da curva de desmagnetização (quadratura).

Fonte: Adaptado de CERTI (2017)

Outra constatação é que o carbono pode afetar a coercividade e a microestrutura de grãos finos dos ímãs de NdFeB (Firdaus *et al.*, 2016). Dessa forma, possuem características relevantes, que devem ser levadas em consideração tanto na seleção do material, quanto na produção do mesmo.

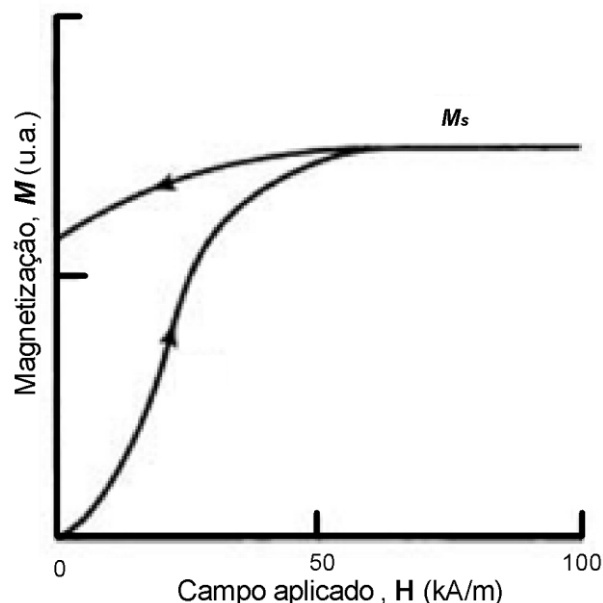
As propriedades magnéticas e o entendimento dos conceitos supracitados são fundamentais para todo o desenvolvimento do produto. Dessa forma, desenvolver um ímã permanente com elevados valores de propriedades magnéticas está ligado, inicialmente, às suas propriedades intrínsecas, ou seja, propriedades que não dependem da microestrutura do material, como a temperatura de Curie (T_c), Magnetização de Saturação (M_s) e o campo de anisotropia magnetocristalina (H_A).

Segundamente, está vinculado ao ajuste adequado na microestrutura dos materiais durante o processo produtivo, traduzindo propriedades intrínsecas em propriedades extrínsecas funcionais, isto é, alta magnetização remanente e

coercividade (Yang *et al.*, 2017). Neste sentido, a seguir é descrito o significado destes termos técnicos relacionado a caracterização dessas propriedades com base nos autores (Cullity, 2009; Coey, 2010; Callister, 2012; Lapido-Loureiro, 2013; CERTI, 2017):

- Temperatura de Curie (T_c): esta temperatura varia para cada tipo de material, é nela que a energia térmica é elevada o suficiente para desfazer o alinhamento dos momentos magnéticos atômicos, o que leva a magnetização ao zero. Abaixo da T_c o material se comporta como substância ferromagnética, acima de T_c se comporta como substância paramagnética, isto é, resposta fraca a aplicação de um campo externo.
- Remanência: é o valor de densidade de fluxo magnético ao qual permanece em um ímã na inexistência de um campo magnético externo. Ímãs mais fortes têm valores desta propriedade mais elevados.
- Magnetização de saturação (M_s): é o limite elevado da magnetização de um material no estado ferromagnético. O material submetido neste estado ferromagnético a um campo externo (H) e aos poucos aumentar sua intensidade, a magnetização atingirá a saturação, conforme a Figura 6.
- Anisotropia magnetocristalina (H_A): refere-se à interação do fenômeno de propriedades magnéticas e da direção cristalográfica.

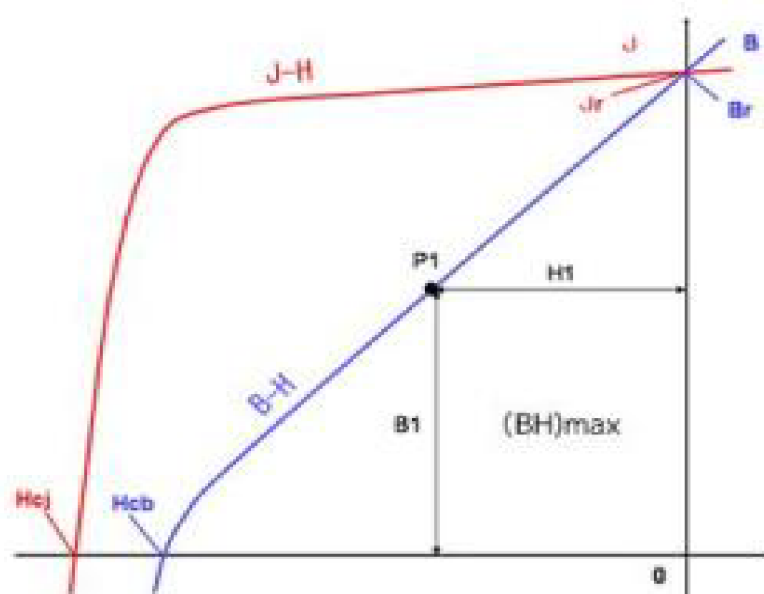
Figura 6 – Magnetização em função do campo magnético aplicado (H)



Fonte: Adaptada de Cullity e Graham (2009)

As propriedades magnéticas são observadas e avaliadas por meio de equipamentos, como exemplo, histerisígrafo, o qual traça laços de histerese com as relações entre indução magnética B x campo aplicado H e a polarização J x campo aplicado H (CERTI, 2017). Por meio desses laços de histerese é possível obter a propriedade magnética de ímã ou materiais magnéticos duros, conforme Figura 7, a qual reproduz o segundo quadrante de uma curva de histerese de um ímã genérico.

Figura 7 – Representação do segundo quadrante da curva de histerese de um ímã genérico



Fonte: Adaptado de Arnold Magnetic (2015)

Assim, diante da Figura 7, outra questão com relação ao campo magnético é que mesmo diminuindo gradativamente até que esteja nulo, pode-se reter certa quantidade de fluxo magnético (B), ou seja, ainda que seja nulo, este campo magnético aplicado pode apresentar resquícios de fluxo magnético (B) em seu interior e se manter, denominado de remanência (B_r) o valor do campo B quando $H=0$. Já a coercividade intrínseca (H_c ou H_{cj}) do material é o valor de campo magnético, requerido para desmagnetizar o material por completo, aqui é aplicado campo contrário até a desmagnetização, isto é, valor do campo H quando $B = 0$.

Ainda, o maior quadrilátero inscrito graficamente na curva B x H corresponde ao produto energia máximo $(BH)_{max}$, propriedade que representa a densidade de energia contida em um ímã em kJ/m^3 , tal propriedade demonstra o potencial de utilização dos diversos tipos de ímãs.

As propriedades mencionadas anteriormente são dependentes da temperatura, isto é, as curvas de histerese são também utilizadas em outras condições de temperatura para definir outras propriedades importantes como os coeficientes de temperatura α e β . Estes são obtidos por aproximação linear, que expressam a variação da remanência (coeficiente α) e da coercividade intrínseca (coeficiente β) do ímã a partir de uma diferença de temperatura. A T_c é o fator determinante da estabilidade térmica dos ímãs e pode ser alterada mediante o uso de elementos de liga. Assim a Tabela 1 apresenta um comparativo das características dos ímãs. Atualmente, o mercado é dominado por ímãs de Nd-Fe-B (> 95%), o campo magnético produzido pelos ímãs de Nd-Fe-B pode ser superior a 1,4 Tesla, enquanto o dos ímãs de ferrite mais antigos é inferior a 0,5 Tesla (Binnemans *et al.*, 2018).

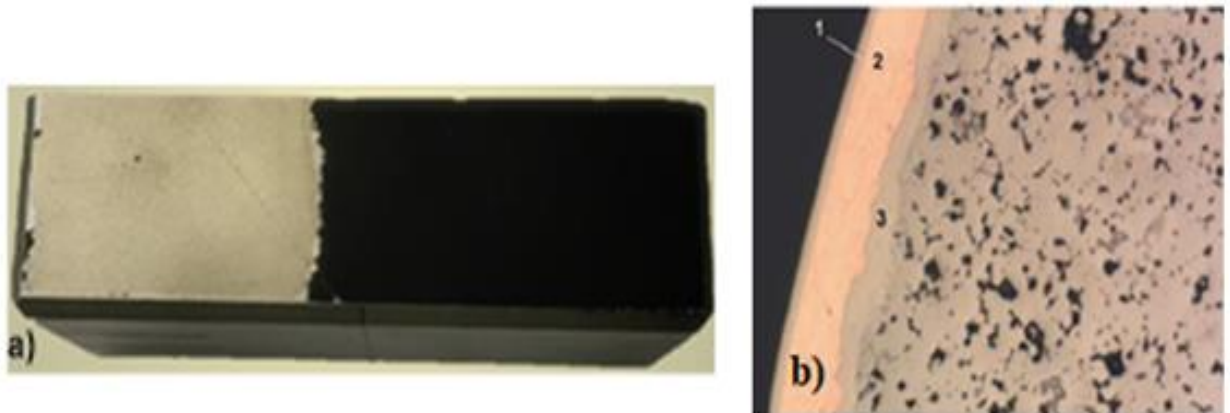
Tabela 1 – Comparativo das características dos tipos de ímãs

Características	Unidade	Alnico (5-7)	Ferrite 8	Sm ₂ Co ₁₇	NdFeB (48M)
Remanência (Br)	Tesla	1,35	0,39	0,9	1,39
Produto Energia (Bhmax)	kJ/m³	60	28	175	370
Coercividade (HcJ)	kA/m	59	245	2400	1115
Temperatura de trabalho	°C	-269 a 520 °C	-40 a 150 °C	-269 a 520 °C	-123 a 100 °C
Coeficiente de temperatura α	%/°C	-0,02	-0,20	-0,035	-0,1
Coeficiente de temperatura β	%/°C	-0,01	0,27	-0,20	-0,5
Resistência à corrosão		Excelente	Excepcional	Boa	Razoável
Resistividade Elétrica	$\mu\Omega\cdot\text{cm}$	47	10^6	90	180
Campo necessário a magnetização	kA/m	120	480	4000	2700
Preço aproximado (2013*)	\$/kg	40	8	100	150

Fonte: CERTI (2017)

Observa-se na Tabela 1, que a resistência à corrosão dos ímãs de NdFeB é razoável, tal característica é devido ao elemento neodímio ter muita afinidade com o oxigênio. Para o ímã ser protegido da corrosão é realizado um revestimento, isto é, recobrimento com uma tripla camada de níquel-cobre-níquel (Ni-Cu-Ni), aplicado a ímãs comerciais, além de um recobrimento com epóxi de cor preta. Dessa forma, para ilustrar a Figura 8 - a) exibe esta tripla camada de proteção pela ilustração de um bloco de ímã do tipo NdFeB, cedido pela empresa produtora que utiliza o componente em seus produtos, com remoção parcial do recobrimento com epóxi, e após preparação metalográfica a Figura 8 - b) apresenta uma imagem da superfície polida, com aumento de 60 μm , com finalidade de evidenciar a tripla camada de proteção a corrosão (Lasek; Dobrovodská; Skotnicová, 2013).

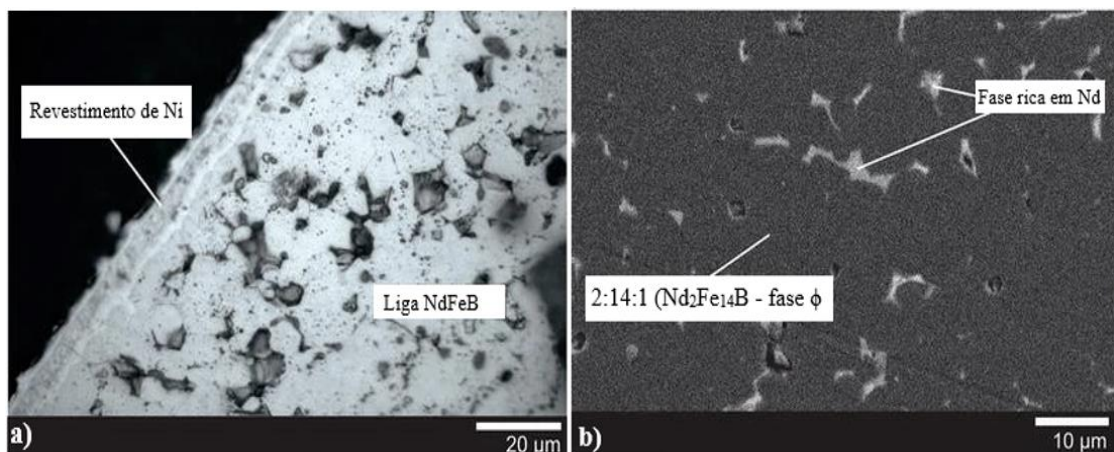
Figura 8 – a) Bloco de NdFeB; b) Imagem metalográfica evidenciando a camada protetora 1-Ni, 2-Cu e 3-Ni no ímã de NdFeB



Fonte: Autora adaptado de Lasek, Dobrovodská e Skotnicová (2013)

Outro aspecto é o sistema NdFeB, caracterizado por dois compostos ternários, o primeiro se refere a $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, com cerca de 85% normalmente, denominado de fase ϕ . O segundo $\text{Nd}_1 + \epsilon\text{Fe}_4\text{B}_4$, com cerca de 2-3%, denominado de fase η ou a fase boreto, e uma fase rica em Nd, isto é, fase limite de grão de 12-13% do material. A Figura 9, apresenta duas imagens da microestrutura de ímãs comerciais à base de Nd. Devido ao sistema peritético, ligas fundidas de NdFeB normalmente têm composição mais ricas em neodímio, do que $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, expressa por $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$ (Firdaus *et al.*, 2016).

Figura 9 – Imagem da microestrutura típica de um ímã de $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$

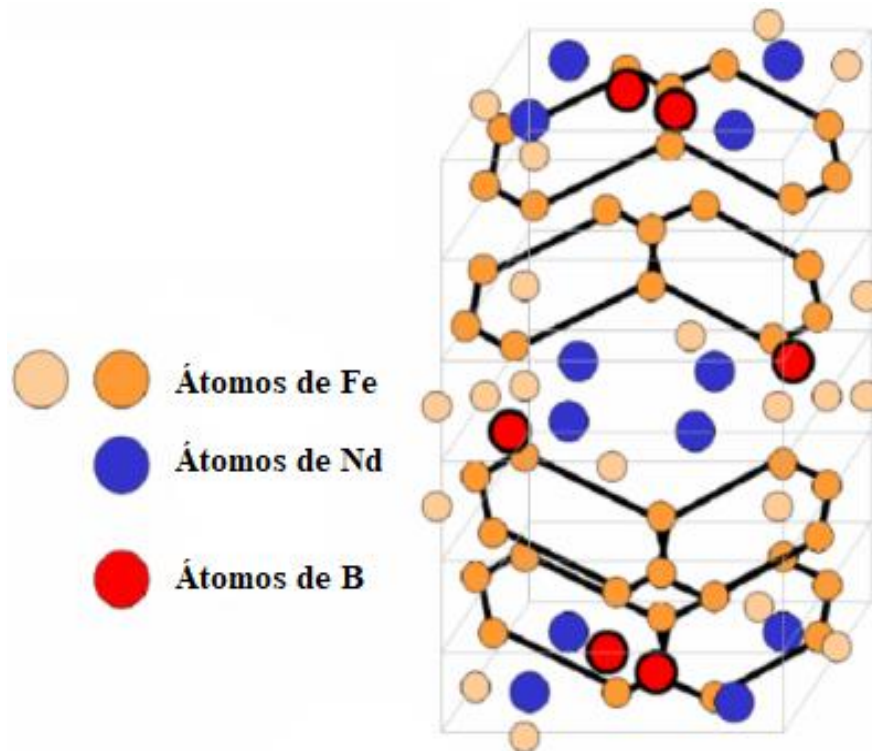


Fonte: Adaptado de Firdaus *et al.* (2016)

As propriedades magnéticas do ímãs de NdFeB pode ser atribuída a fase magnética dura tetragonal $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}_1$, representada na Figura 10, a qual comporta em sua estrutura cristalina tetragonal 68 átomos por célula unitária, com seus respectivos

parâmetros de rede ($a = 8,795 \times 10^{-10} \text{ m}$) e ($c = 12,225 \times 10^{-10} \text{ m}$) e apresenta uma única direção [001] de fácil magnetização ao longo do eixo c. Neste sentido, mediante controle da texturização da microestrutura é possível obter materiais anisotrópicos com elevados valores de propriedades magnéticas. Neste sentido, mediante controle da texturização da microestrutura é possível obter materiais anisotrópicos com elevados valores de propriedades magnéticas.

Figura 10 – Representação da estrutura cristalina de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}_1$

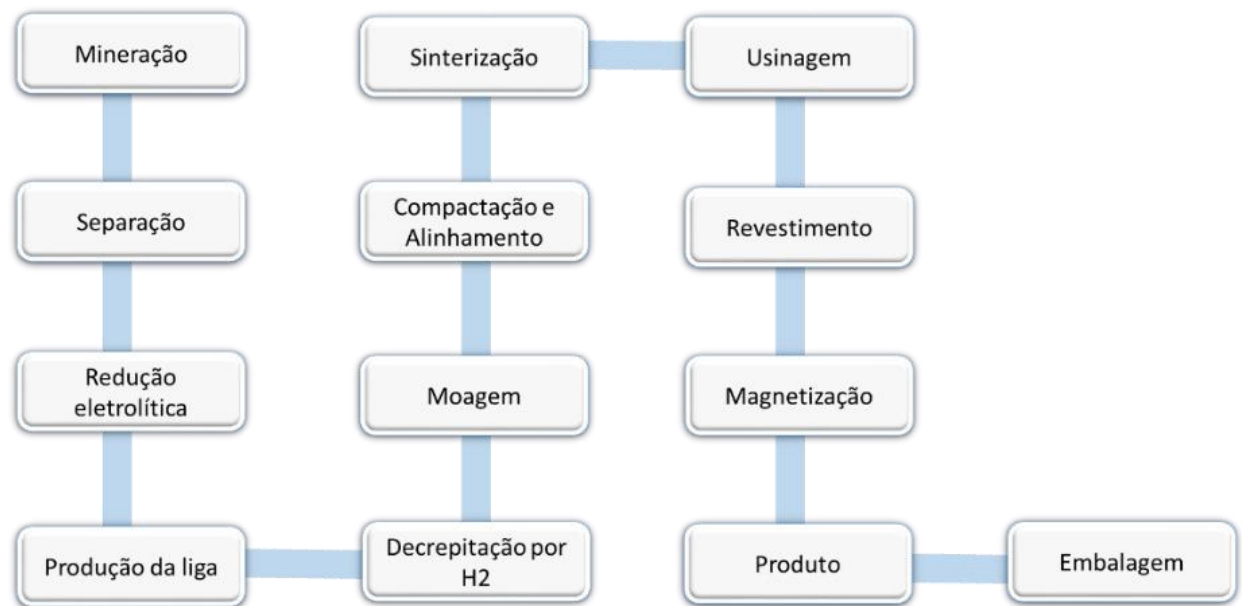


Fonte: Adaptado de Belin-Ferré (2008)

2.2.1 Processo de fabricação do ímã de NdFeB

Ímãs de NdFeB contêm aproximadamente 30-40% de peso de ETR e há tecnologias que empregam grandes quantidades desses ímãs, caso dos aerogeradores que podem conter mais de 2000 Kg de NdFeB (Lixandru *et al.*, 2017; HABIB, 2019). O processo de fabricação de ímãs via metalurgia do pó é exibido na Figura 11, cuja representatividade na confecção de ímãs de NdFeB no mercado é mais de 90% (Diehl *et al.*, 2018). O mercado é dominado pelos ímãs sinterizados à base de Nd-Fe-B, “denominado de ímãs do tipo nucleação” (Yang *et al.*, 2017).

Figura 11 – Representação da mineração a produção do ímã de NdFeB sinterizado

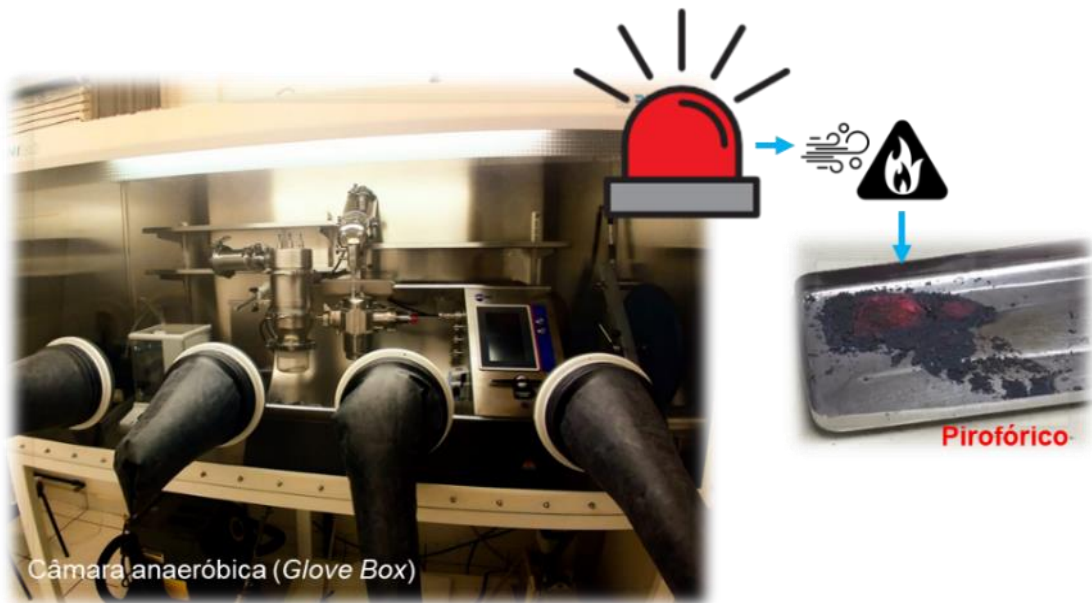


Fonte: Autora adaptado de CERTI (2017)

O início do processamento é a mineração e separação dos ETR na forma de óxidos, normalmente a partir do óxido de neodímio (Nd_2O_3). Após a redução destes óxidos, é realizada a obtenção da liga ferromagnética, que normalmente se dá por meio da técnica de lingotamento de tiras. Esta técnica permite que a matéria prima seja fundida em um forno de indução e vazada em uma roda de cobre refrigerada por circulação de água. Assim, este método permite obter taxas de resfriamento altas, o qual evita a formação de ferro α , na fase magnética mole que afeta a aquisição de ímãs com elevada coercividade (CERTI, 2017).

Na etapa seguinte tem-se o processamento da liga, via decrepitação por hidrogênio (H_2). Aqui a intenção é fragilizar a liga de modo a diminuir os tempos da moagem posterior. Desta forma, a liga absorve hidrogênio ocasionando uma expansão do retículo cristalino tanto da fase rica em Nd, quanto da fase $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, produzindo trincas intragranulares e intergranulares, de modo a fragilizar o material. Uma vez moídos, estes materiais são extremamente reativos ao oxigênio do ar, é necessário realizar o processo em atmosfera inerte. A Figura 12 ilustra esse processo de reação do pó moído como uma alerta à reatividade em contato com o oxigênio do ar.

Figura 12– Representação da importância de manter a atmosfera inerte



Fonte: Autora (2023)

Em sequência, esse processo é seguido por moagem mecânica, com obtenção de partículas monocristalinas. Seguida por compactação com aplicação de campo magnético para mover as paredes de domínio do pó (Yang *et al.*, 2017). Quando se alinha as partículas na direção de fácil magnetização resulta em um componente anisotrópico que possui suas propriedades magnéticas independentes da direção. A etapa a seguir é a sinterização, esta ocorre assistida por fase líquida, a qual penetra entre as partículas, produzindo um rearranjo das mesmas e a sua contribuição é para a densificação do material. Após a sinterização é realizado um tratamento térmico (TTT), com intuito de distribuir a fase rica e assim resultando no aumento dos valores das propriedades magnéticas (Faria; Lima, 2005).

A diante tem-se a usinagem para corrigir retrações de tamanho que podem ser geradas durante a sinterização, bem como obter o formato almejado da peça. A usinagem em ímãs sinterizados pode ser bem diversificada desde suavização de superfície, correções de linearidade, retificação de furos (internos e externos) e cortes a partir de blocos maiores.

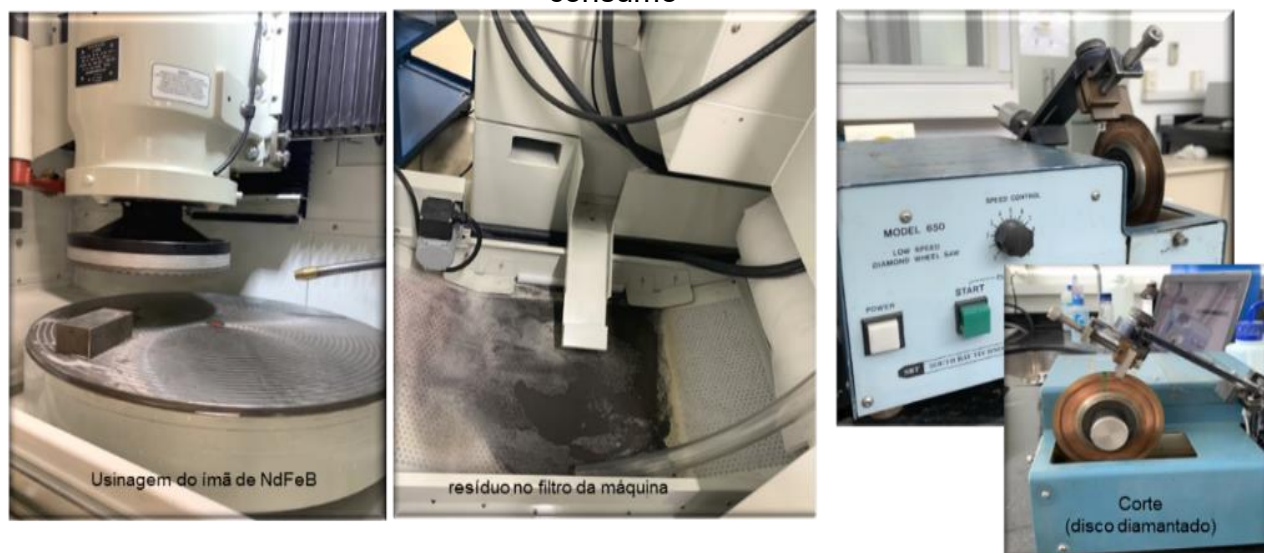
Neste contexto, o percentual de perda de material (*losses*)⁴, depende do formato do ímã, sendo contabilizada perdas maiores para ímãs de maior complexidade, como por exemplo, anéis ou segmentos de arco. Esta quantidade

⁴ Perdas (*losses*), refere-se ao potencial de recuperação de material secundário e consequente mitigação de impactos econômicos

elevada de sucata e resíduos, pode chegar até 30% da liga inicial, isto é, pode ser “perdida” durante todo o processo incluindo o polimento (Binnemans *et al.*, 2013). As técnicas utilizadas em escala industrial para usinagem são a eletroerosão a fio e a lapidação, além de corte utilizando ferramentas diamantadas, como fio e disco diamantado. Estas operações utilizam fluido de lubrificarrefrigerante, pois o pó seco produzido no processo de usinagem tem efeito pirofórico.

Em uma representação esquemática (Figura 13) é possível verificar na prática o “resíduo” da etapa de usinagem em processo de produção, representando uma fonte alternativa de terras raras.

Figura 13 – Esquema representativo da etapa de usinagem do ímã de NdFeB pré-consumo



Fonte: Autora (2023)

Enfim as etapas de revestimento para a proteção contra a corrosão e a magnetização foram apresentadas na seção anterior. Após confeccionado, o ímã pode ser embalado para transporte. Os ímãs no final de vida podem ser reciclados dos produtos que os contém, devido a relevância deste tema será abordada uma seção sobre as soluções tecnológicas para recuperação de ETR a partir de ímãs de NdFeB. De forma a fixar o conceito de material secundário pré e pós-consumo, a Figura 14 representa a visão macro do processo dos ímãs de NdFeB. É essencial entender que os materiais secundários são aqueles que já passaram por um ciclo de uso e podem ser reaproveitados ou reciclados. O material secundário pré-consumo refere-se a resíduos gerados durante o processo de fabricação, isso inclui sobras e defeitos que, se bem geridos, podem ser reintroduzidos na cadeia produtiva. Por outro

lado, o material secundário pós-consumo é aquele que resulta da utilização final dos produtos, como embalagens e itens descartados pelo consumidor.

Figura 14 – Visão macro da cadeia de ITR da mineração até produtos pós-consumo



Fonte: Autora (2023)

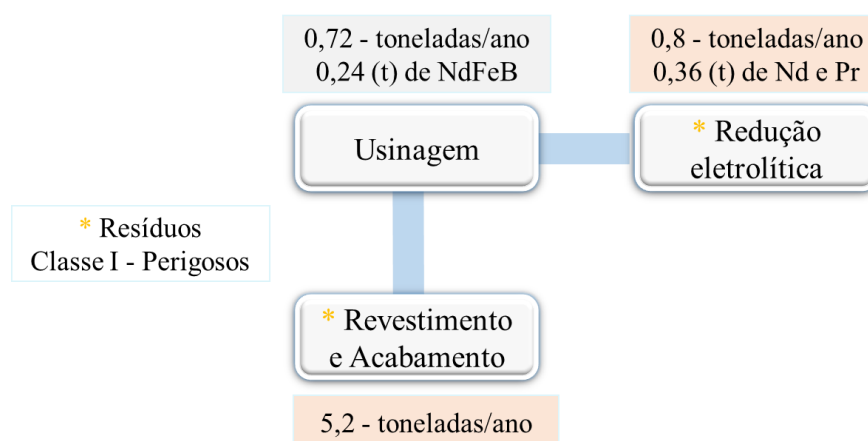
Assim, observa-se que o material secundário provém do pré-consumo dentro do processo produtivo dos ímãs de NdFeB, e os materiais secundários pós-consumo são advindos do componente ímã obtido a partir de equipamentos em fim de vida. Na subseção a seguir será abordada as principais etapas do processo de fabricação dos ímãs de NdFeB que gera resíduo, como fonte potencial de material secundário no pré-consumo.

2.2.2 Material secundário pré-consumo obtido a partir da produção de ímãs de NdFeB

O LabFabITR entrará em operação, com capacidade produtiva anual de 93 toneladas (CERTI, 2017). Em resgate ao que foi pontuado no item 1.3.2, estima-se uma geração de resíduos de 6,7 toneladas/ano, proveniente das etapas do processo fabril (Fernandes, 2019). Diante disso, é importante ressaltar a classificação desse resíduo pré-consumo, quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. Essa classificação, por sua vez, foi caracterizada de acordo com a NBR 10.004:2004, e a Ficha de Informações de Segurança para Produtos Químicos (FISPQ) do respectivo elemento químico quanto sua disposição final.

Os resíduos classificados como Classe I - perigosos (NBR 10.004:2004), foram identificados nas etapas que compõem a produção dos ímãs de NdFeB, sendo estes os processos de redução eletrolítica, acabamento e revestimento (Fernandes, 2019). Na Figura 15 uma estimativa da quantidade de material secundário gerados no processamento de ITR no LabFabITR, é apresentada.

Figura 15 – Estimativa da quantidade de resíduos (material secundário) gerados durante o processamento de ITR no LabFabITR.



Fonte: Autora com base em Fernandes (2019)

Assim, observa-se que a geração estimada de material secundário no processo de revestimento e acabamento se destaca com 5,2 toneladas/ano de resíduos perigosos. O processo de redução eletrolítica aparece na segunda posição quanto a geração de resíduos, com 0,8 toneladas/ano, destes, 0,36 toneladas de Nd e Pr. No processo de usinagem e acabamento a geração é de 0,72 toneladas/ano, dos quais 0,24 toneladas são de NdFeB.

Ainda, considerando o processo de fabricação dos ímãs de NdFeB, estima-se que 6 a 73% dos materiais magnéticos são desperdiçados como limalha ou pó (Chowdhury *et al.*, 2021). Os autores Patcharawit *et al.* (2022), enfatizam que a quantidade exata de material magnético desperdiçado no processo de fabricação de ímãs de NdFeB pode variar dependendo do processo específico de fabricação utilizado. Além disso, os autores observaram uma perda significativa de neodímio no resíduo lixiviado e o processo de torrefação oxidativa 76,46%, enquanto a lixiviação total resultou em apenas 31,62% no caso de resíduos sinterizados (Patcharawit *et al.*, 2022). No entanto, é importante considerar que os estudos existentes são baseados na matriz energética da China, como base o carvão.

Os impactos ambientais em processo fabril são observados pelos autores Zhang *et al.* (2017) indicam o valor de 0,1 de CO₂ equivalente para cada kg de Nd reduzido, enquanto Vogel e Friedrich (2017) apresentaram um valor de 688 kg de CO₂ equivalente. De forma a atender o mercado nacional, haverá uma ampliação da produção de ímãs de NdFeB, a qual ocasiona aumento de “resíduos do processo fabril”, e no que tange às emissões deve-se ser possível compensá-las por meio de ações ambientais.

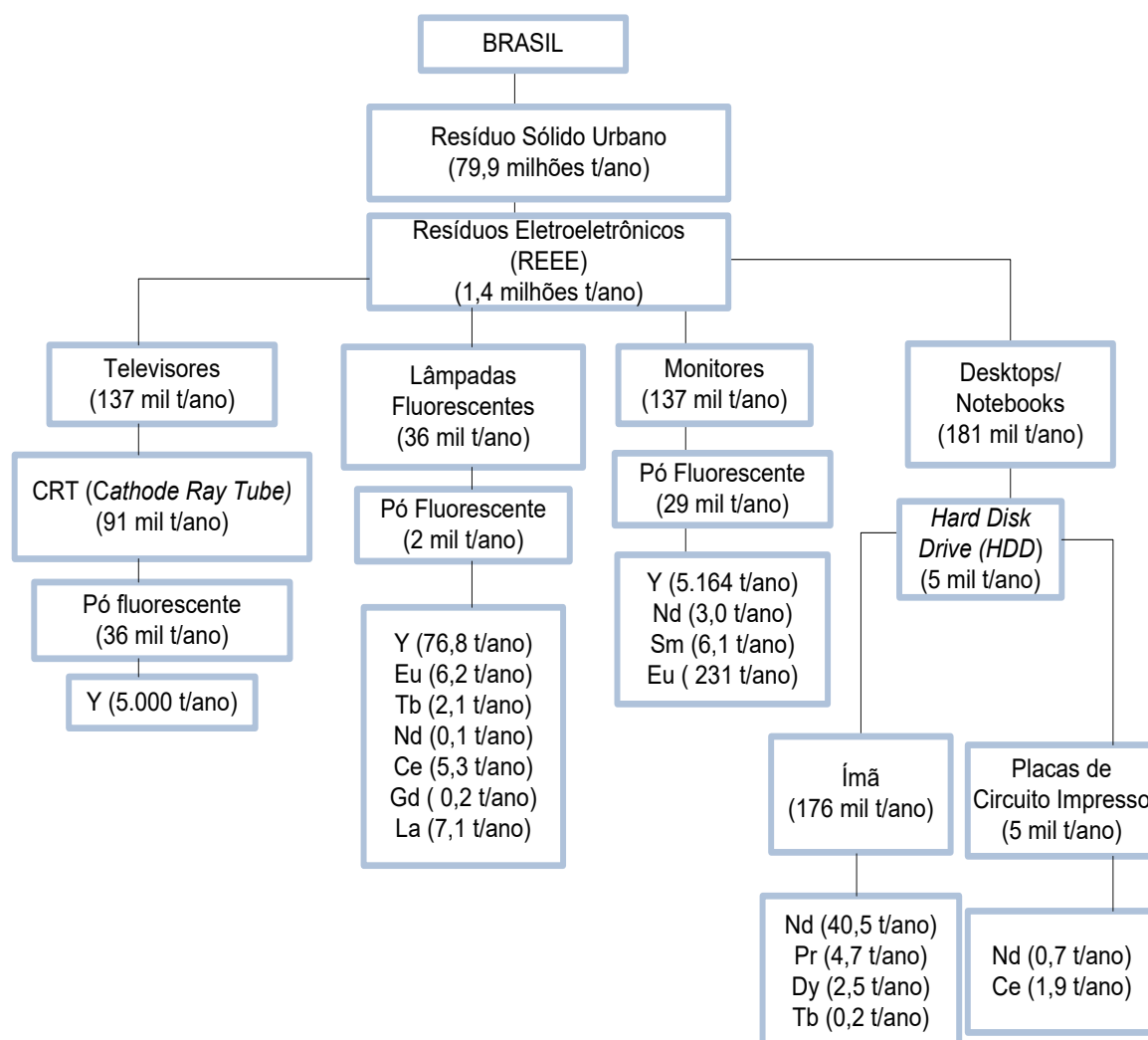
Deste modo, os resíduos da produção também representam uma fonte alternativa de terras raras. Portanto, as duas fontes pré e pós-consumo, devem ser geridas para garantir o fornecimento contínuo de ETR para a indústria brasileira.

2.3 TEOR DE ETR NOS EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

A demanda por cada categoria de produto induz uma demanda de neodímio, que foi obtido da literatura e de informações do fabricante/indústria produtora. Dado que o teor de Nd não está diretamente disponível para a maioria dos produtos, são encontradas como estimativa de diferentes fontes e podem divergir de uma fonte para outra. Por esse motivo, valores confiáveis são muito difíceis de encontrar (Yang *et al.*, 2017).

Segundo Yang *et al.* (2017), os principais setores de aplicação de ímãs permanentes são automóveis convencionais (43%), turbinas eólicas (17%), HDD de computador (15%), veículos elétricos/híbridos (VEHs) (14%) e bicicletas elétricas (12%). Assim, a quantização dos ETR presentes nos REEE é fundamental para determinar o tipo de solução tecnológica que pode ser aplicada à recuperação de material secundário (Silva *et al.*, 2017). Além disso, a Figura 16 pode nos dar um parâmetro da quantidade de fontes secundárias de ETR a partir de produtos eletroeletrônicos pós-consumo no Brasil.

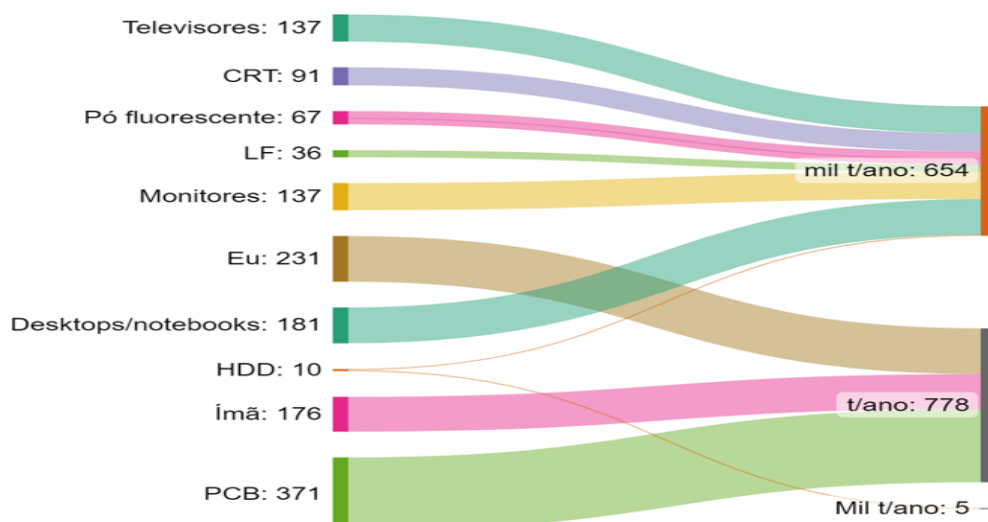
Figura 16 – Quantidade estimada de ETR nos REEE descartados nos últimos 6 anos no Brasil.



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2017 p. 14)

Assim, observa-se na Figura 16 que no *Hard Disk Drive* (HDD) de computador a quantidade de Nd é de 40,5 t/ano, maior do que os demais equipamentos avaliados. Cabe destacar que as lâmpadas e luminárias de diodo emissor de luz - LED (*Light-Emitting Diode*) são equipamentos eletroeletrônicos e para seu acionamento é preciso um (*driver*) (ABILUX, 2023). Ainda, conforme Gomes (2015), em território nacional pode-se citar as empresas de grande porte como SAMSUNG e GE, que utilizam ímãs permanentes em seus produtos, gerando uma grande demanda por estes componentes. O fluxo de material dos produtos/componentes de REEE no Brasil é exibido na Figura 17.

Figura 17 – Fluxo de material dos resíduos eletroeletrônicos no Brasil



Fonte: Autora com base em Silva *et al.* (2017 p. 14)

Para chegar nesse resultado os autores Silva *et al.* (2017), dividiram as quantidades de ETR de acordo com os REEE descartados por ano. Logo, a ampla gama de vida útil de diferentes produtos deve ser cuidadosamente considerada. Por exemplo, um estudo descobriu que 38% dos HDD pós-consumo são reutilizáveis (Peeters *et al.*, 2018). A proporção em massa de ETR em ímãs permanentes é representada na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química média (% em massa) dos ímãs de NdFeB

Autores	Ano	Composição					
		Nd	Pr	Dy	Fe	B	Co
München e Veit	2017	21,48	3,31	1,37	65,10	0,93	1,00
Ueberschaar e Rotte	2015	23,04	2,77	0,97	63,03	0,58	1,50
Vander Hoogerstraete et al.	2014	25,95	0,34	4,21	58,16	1,00	4,22

É importante relatar que as proporções previstas dos ETR nos ímãs de NdFeB são diferentes de acordo com a composição dos óxidos ou metais usados na elaboração dos mesmos (München; Veit, 2017). Conforme Campos *et al.* (2015), a proporção estimada em peso desses elementos é de um terço do peso total do ímã. Neste sentido, se for utilizado Nd e Pr, as proporções são: (~ Nd-75% e Pr-25%).

Segundo Imholte *et al.* (2018) para o caso do Nd e Dy, podem ser estimadas em proporções de até 80% e 20%, respectivamente. No caso dos ímãs mais complexos, como os utilizados em carros elétricos e híbridos, o elemento disprósio pode estar presente em até 9% da composição em massa da liga. Os autores Menad

et al. (2016) apresentaram a determinação do percentual em peso de ímãs nos dispositivos eletrônicos, os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Porcentagem em peso de ímãs em diferentes componentes eletrônicos

Origens	% em peso de ímãs
Auto-falantes de computador	4 – 6
HDD do computador da unidade central	2,5 – 2,8
HDD do Laptop	2 – 3
Pequenos motores elétricos (A)	22 – 26
Pequenos motores elétricos (B)	0,8 – 2

Fonte: Autora adaptado de Menad *et al.* (2016)

De acordo com o relatório anual de acompanhamento e performance da *Green Eletron* (GREEN ELETRON, 2022), em 2021, foram coletadas 118,7 toneladas de REEE no Brasil no Estado de São Paulo. Já o Relatório anual de desempenho da ABREE (ABREE, 2022), registra a coleta de 1.084,05 toneladas de REEE no Estado de São Paulo em 2021, sendo o responsável pela maior quantidade de REEE coletado. Dessa forma, o descarte adequado, bem como seu processamento viabiliza a possibilidade de incentivar a economia circular e impulsionar o desenvolvimento social e econômico, resultado da recuperação ETR que esses materiais pós-consumo contêm (Awasthi *et al.*, 2019; Savini, 2021).

Os REEE contêm materiais valiosos, incluindo quantidades significativas de materiais estratégicos essenciais não apenas economicamente, mas também para a competitividade no setor de tecnologia da informação (Cenci *et al.*, 2021). No entanto, apenas 17,4% desses resíduos são tratados de maneira adequada, com a documentação necessária, devido às dificuldades tecnológicas na coleta, armazenamento e gestão enfrentadas pelos participantes dessa cadeia (Forti *et al.*, 2020). Binnemas *et al.* (2018) analisaram a composição dos ímãs de NdFeB pós-consumo, evidenciada na Tabela 4 pela sua relevância em turbinas eólicas e motores de carros elétricos.

Tabela 4 – Composição dos ímãs de NdFeB por aplicação tecnológica

Aplicação	Composição % ou Peso kg (Valores aproximados)	Representatividade
Motor (carros elétricos)	31% Nd - 4,5% Dy - 2% Co - 61,5% Fe - 1% B	1 motor de 55KW, necessita de 0,65 kg de liga de (Nd-Dy-Co-Fe-B), o que representa 200g de neodímio (3,6g/kW) e 30g de disprósio (0,55g/kW) por motor.
Turbina eólicas (acionamento direto)	700 - 1200 Kg	De Nd-Fe-B por MW – Correspondente a 175-420 kg de neodímio puro por MW

Fonte: Autora adaptado de Binnemans *et al.* (2018)

Outro mercado em rápido crescimento é o de bicicletas elétricas, que possuem em seu motor ímãs de NdFeB, com aproximadamente 350g a 86g de Nd por bicicleta elétrica (Binnemans *et al.*, 2018). Ao contrário dos eletroeletrônicos em que o tempo de vida é mais curto, a vida útil dos aerogeradores é entre 20 a 35 anos, podendo ser de eixo vertical ou horizontal. Dentro da nacele, dependendo de cada modelo se encontra o sistema de ímãs (Ocharan *et al.*, 2018). A seguir serão explanados as turbinas eólicas e os motores elétricos.

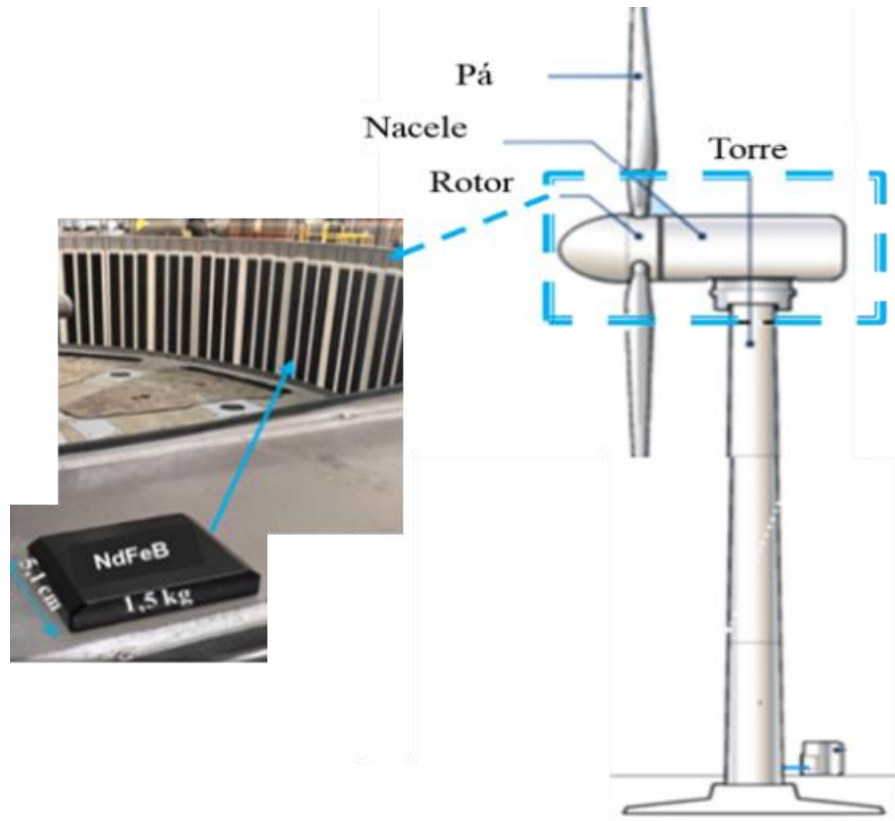
2.3.1 Turbinas eólicas

Esta seção é dedicada à demanda e ao mercado das turbinas eólicas diante da quantidade expressiva de ETR dentro dos ímãs de NdFeB. Logo, o mercado eólico é dominado por instalações *onshore* (instalados no continente) (CODEMIG, 2016). A tendência tecnológica é aerogeradores com ímãs para parques eólicos *offshore* (instalados no mar), que atingem elevadas potências energéticas (Rabe *et al.*, 2017; CODEMIG, 2016).

Atualmente, três tipos de turbinas eólicas são produzidos: i) sistema de transmissão tradicional; ii) transmissão direta e iii) sistemas híbridos. Apenas os dois últimos contêm ímãs NdFeB. Enfatizando que o sistema de transmissão direta e sistema híbrido requer menos manutenção e ambos empregam os ímãs de NdFeB, sendo que a primeira demanda menos manutenção, pois operam sem engrenagens (Reimer, 2018). Ambos os sistemas, no entanto, utilizam ímãs de NdFeB para maximizar a eficiência do gerador. A escolha entre um sistema direto e híbrido pode depender de outros fatores além da manutenção, como custos iniciais e requisitos específicos de projeto. Segundo Santos (2023), os ímãs são acoplados ao

aerogerador com a função de transformar a energia mecânica em energia elétrica através de suas conversões eletromecânicas. A Figura 18 representa o local exato em que os ímãs de NdFeB estão alocados com sua respectiva dimensão e peso.

Figura 18 – Imagem representativa do ímã de NdFeB no aerogerador

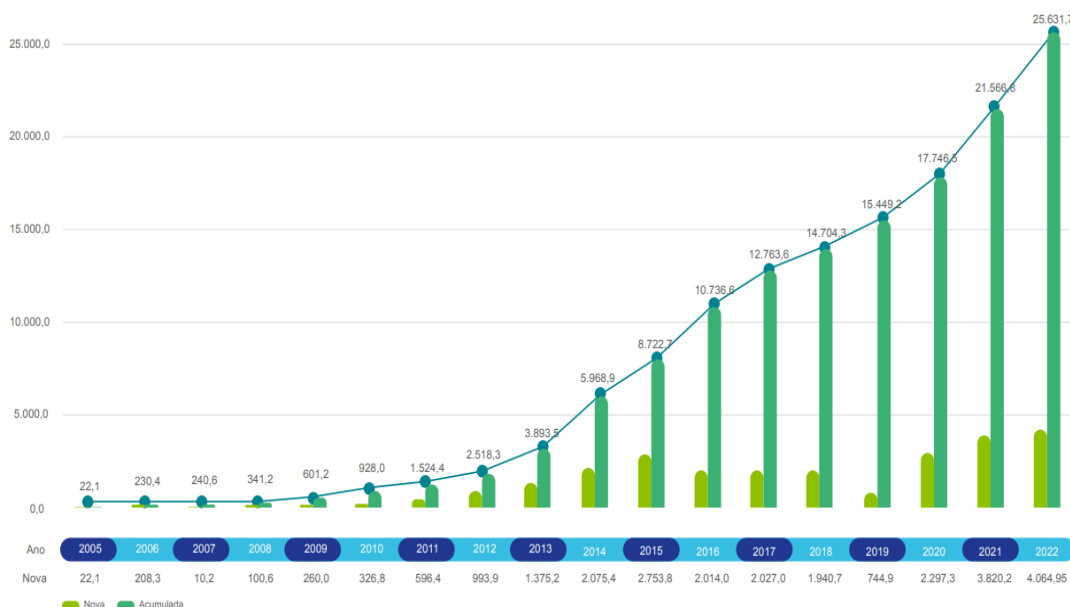


Fonte: Autora com base na ilustração do aerogerador de Pengky (2023)

Conforme a Figura 18, observa-se que os ímãs de NdFeB são empilhados em cada repartição do rotor, exemplificado pela flecha em azul. Sendo que um aerogerador pode conter mais de 2000 Kg de NdFeB (Lixandru *et al.*, 2017; Habib, 2019). Os ímãs de NdFeB usados para turbinas eólicas não requerem adição de disprósio, pois é improvável que ocorram altas temperaturas em uma turbina eólica bem projetada. Além disso, o vento pode ser usado para resfriar os ímãs (Binnemans *et al.*, 2018).

As empresas como Iberdrola, Enel Green Power, Vestas, Siemens Gamesa, GE *Renewable Energy* estão na vanguarda do setor de energia eólica no Brasil e desempenham papéis cruciais no desenvolvimento e expansão da capacidade eólica do país (ABEEólica, 2022). A evolução da capacidade instalada e o crescimento da fonte eólica no Brasil é expressa na Figura 19.

Figura 19 – Capacidade de energia eólica (MW) instalada no Brasil



Fonte: ABEEólica (2022 p. 13)

Os dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica, 2023), indicam que a energia eólica representa 13% da matriz elétrica brasileira, sendo que nos últimos três anos (2020-2023) a capacidade instalada foi expandida em (~ 27%). A estimativa é de que a energia eólica continue crescendo nos próximos anos, se firmando definitivamente como a terceira principal fonte de energia elétrica do país e trazendo, na sua esteira, espaço para a instalação de outras tecnologias, como placas solares (TECMUNDO, 2023).

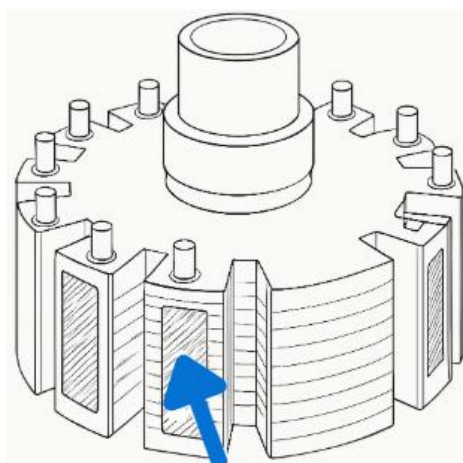
Diante do cenário nacional, estimativas direcionadas ao LabFabITR evidenciam escassez de 1.525 toneladas de ímãs e 3.314 toneladas de OTR. Portanto, a comparação de massa entre ímãs de terras raras e óxidos de terras raras não é direta, pois dependem das suas composições e dos formatos em que são usados. Essas estimativas indicam uma lacuna significativa entre a demanda projetada e a oferta atual desses insumos, o que pode impactar a capacidade do LabFabITR de atender às necessidades do mercado (Ocharan *et al.*, 2018). A busca de soluções para mitigar a vulnerabilidade estratégica do abastecimento desses materiais para o setor é perceptível, será necessário ajustar a produção para suprir a demanda e evitar paradas na operação ou atrasos em projetos e otimizar a cadeia de suprimento e garantir a entrega eficiente dos insumos.

2.3.2 Motores elétricos

Segundo a Associação Brasileira de Veículo Elétrico, a quantidade de carros vendidos no ano de 2019 foi de 11.858 unidades, para o ano de 2020 houve um aumento para 19.745 unidades, chegou a 1% do total de veículos no Brasil. Atualmente a frota total de automóveis elétricos ou híbridos em circulação no país corresponde a 158.678 unidades (ABVE, 2023). Com o crescimento do setor, há estimativa para o ano de 2040 que a frota de veículos leves possa atingir 11 milhões de unidades (M&C, 2023).

Além disso, vale destacar que, no Brasil, empresas como a EMBRACO e a BOSCH utilizam ímãs de NdFeB em aplicações diversas, incluindo motores elétricos, sistemas de ventilação, eletrodomésticos e outros segmentos industriais e tecnológicos relevantes (Lima, 2012). A Figura 20 representa o rotor do veículo elétrico, a flecha azul exemplifica o local exato da instalação do ímã de NdFeB.

Figura 20 – Representação do posicionamento do ímã de NdFeB no rotor



Fonte: Autora (2022)

Na literatura, constata-se que o peso de cada um dos ímãs em cada motor varia de 1 a 2,4 kg, conforme seu tamanho, potência e condições de funcionamento (Schulze; Buchert, 2016). Segundo Paula Júnior (2017), a demanda por neodímio para a fabricação de ímãs de NdFeB em 2050 é estimada em 1.000 toneladas, devido ao total de 5.267.678 veículos híbridos e elétricos no Brasil. Balaram (2019) identificou que a quantidade de ETR, pode ser de 1 kg, para um volume secundário, dentro de um automóvel híbrido típico. Com a expansão da adoção dos veículos elétricos, os motores de pós-consumo representam uma fonte alternativa aos depósitos geológicos

para a obtenção dos ETR. Assim, grandes montadoras sinalizam o fim dos motores de combustão, há estudos que apontam o ano de 2026 promissor e uma aceleração na adoção da eletrificação e até o ano de 2030 um em cada quatro novos carros de passeio vendidos será um veículo elétrico (M&C, 2023).

Diante disso, as montadoras já consideram desdobramentos de curto prazo no período de hoje até 2025, a seguir:

- Global: US\$ 250 bilhões de investimento;
- BMW: pelo menos um modelo totalmente elétrico em praticamente todos os segmentos-chave, 30% de participação de veículos eletrificados até 2025;
- Volkswagen e Audi: fim dos desenvolvimentos de novos modelos ICE;
- Jaguar: 100% EV até 2025;
- Ford: dobra investimentos em veículos elétricos de US\$ 11 bilhões para US\$ 22 bilhões até 2025;
- GM: investimento de US\$ 35 bilhões em EV e AV até 2025; 40% de EVs no portfólio de produtos; 30 novos modelos de veículos elétricos em todo o mundo; e
- Stellantis: 30 bilhões de euros de investimentos em veículos elétricos até 2025.

Além disso, empresas como a Hyundai, Kia, Ford, Volkswagen, Honda, Toyota, Nissan, Mazda, Mitsubishi e Subaru enfatizam o comprometimento com a neutralidade de carbono (ADIMB, 2023). No entanto, é necessário garantir a Logística Reversa (LR) e a consequente disponibilidade desses equipamentos pós-consumo. Ainda, para fechar o ciclo dos ETR, estratégias relacionadas à circularidade dos ímãs devem ser desenvolvidas. Assim, investimentos nos setores de reutilização, logística, transporte e recuperação de metais por meio da reciclagem, pode criar também mercados para os materiais recuperados, que geram impactos positivos na economia (Pereira, 2018; Xavier *et al.*, 2023).

A seção a seguir aborda a mineração urbana, uma ferramenta da EC que busca recuperar materiais valiosos a partir de resíduos pós-consumo, incluindo os REEE e os ímãs de NdFeB.

2.4 ESTADO DA ARTE DA MINERAÇÃO URBANA

Esta seção apresenta os principais conceitos para gestão direcionada à recuperação dos ímãs de NdFeB, contidos em produtos em fim de vida, conhecido como mineração urbana.

O termo “mineração urbana” foi criado por volta de 1980 pelo professor Hideo Nanjyo na Universidade Tohoku no Japão (Nakamura, 2014). De forma a fornecer outra fonte de metais para auxílio da mineração primária (Tunsu *et al.*, 2015). Conforme definido por Xavier e Lins (2018. p. 23), “a mineração urbana é a recirculação ou reciclagem de produtos e materiais pós-consumo na forma de matéria prima secundária”. Já o autor Habib (2019), descreve em seu estudo que as minas urbanas são “recursos antropogênicos”, ou seja, aqueles criados pelo homem, cujo estoque é acumulado na sociedade compondo uma fonte potencial de recursos secundários quando é possível reciclá-los.

Para Tunsu *et al.* (2015) o significado da mineração urbana é a recuperação dos metais raros, por meio dos processos de reciclagem. Assim, há um esforço para a valorização de resíduos da mineração urbana, com intuito de buscar um futuro sustentável e edificar uma EC (Zhang *et al.*, 2019).

A quantidade estimada pelas Nações Unidas de pessoas no planeta terra atingirá 8,5 bilhões até o ano de 2030 (Ali *et al.*, 2017). Portanto, conforme a população aumenta o consumo de recursos naturais também é crescente, principalmente nas cidades, se tornando um dos maiores geradores de resíduos, consequentemente uma fonte potencial de materiais secundários (Peiró *et al.*, 2020).

A recuperação de ETR de recursos secundários é uma oportunidade para se criar riqueza a partir de resíduos (Jyothi *et al.*, 2020). Neste sentido, recuperar elementos críticos de resíduos que comportam de ETR pode ser viável do ponto de vista econômico e técnico, contribuindo para as incertezas de fornecimento (Binnemans *et al.*, 2013).

Ainda, conforme Diehl *et al.* (2018), uma dessas fontes potenciais é recuperar ímãs de NdFeB de produtos pós-consumo, o qual recupera valor e diminui os riscos de abastecimento associada à importação, beneficiando a economia.

Portanto, a recuperação do valor dos ímãs de NdFeB pode fornecer um complemento importante para as reservas de ETR de uma forma ecológica e economicamente precisa (Jin *et al.*, 2018a). Complemento este, maior do que nos

minérios extraídos das minas, mantendo as propriedades físicas e químicas mesmo com a deterioração nas superfícies do ímã devido a contaminação, e ao processo de corrosão ao longo do tempo (Yue *et al.*, 2019).

A recuperação de ETR a partir de equipamentos de grande porte é mais favorável do que os ímãs embutidos em produtos eletrônicos de consumo, por exemplo, os pequenos alto-falantes, telefones celulares, devido a difícil separação dos demais materiais, o qual normalmente é triturado junto com seu produto final dificultando a recuperação (Zakotnik; Tudor, 2015).

A MU aliada aos processos de descarte adequado, reciclagem e reuso de REE convergem para a implementação de uma economia circular, com a qual objetiva-se minimizar os impactos gerados pelo descarte incorreto dos equipamentos eletroeletrônicos, evitando-se que estes dispositivos sejam dispostos em lixões ou aterros (Sharma; Joshi; Kumar, 2020).

A coleta desses resíduos muitas vezes é realizada por catadores, do mesmo modo como observado em outros países em desenvolvimento (M. Wagner *et al.*, 2022), decorrendo em outro desafio, que é a integração dos catadores nessa cadeia com devido treinamento. Deste modo, o ciclo de vida do produto passa a agregar o conceito da circularidade desde a concepção e/ou design até o fim-da-vida útil pós-consumo e a consequente reciclagem para geração de novos produtos (Yang *et al.*, 2023).

2.4.1 Economia circular

Nos últimos 200 anos, a economia global evoluiu, controlada pelo modelo linear de produção, caracterizado pela sequência: “pegar-fazer-usar-descartar” do inglês (*take-make-use-dispose*) ou economia linear (EL), da mina ao lixão (Ashby, 2015). Nesse sistema, a indústria produz produtos a partir de matérias primas virgens, estes são vendidos, usados e descartados como resíduos.

No modelo de EL, os processos para reutilização e reciclagem dos materiais e ou, produtos foram desencorajados, pela não cobrança dos mecanismos de regulação aos produtores relacionados ao impacto desse processo no ecossistema (Ellen Macarthur Foundation, 2013).

Já a EC integra a reutilização dos bens de consumo em minerar insumos valiosos a partir de materiais descartados, de maneira eficiente obtendo lucros a partir de resíduos ao mesmo tempo que diminui os impactos ambientais (Duth; Lins, 2017).

O conceito de EC recentemente atualizado, promovido pela Organização Internacional de Normalização (ISO), é a seguinte:

“economia circular: sistema econômico que utiliza uma abordagem sistêmica para manter um fluxo circular dos recursos, por meio da adição, retenção e recuperação de seu valor, enquanto contribui para o desenvolvimento sustentável.

Nota 1: Os recursos podem ser considerados tanto em estoques quanto em fluxos.

Nota 2: Da perspectiva de desenvolvimento sustentável, a entrada de recursos virgens é mantida a menor possível, e o fluxo circular de recursos é mantido o mais fechado possível para minimizar as emissões e perdas (desperdícios de recursos) do sistema econômico”.

Fonte: Norma ISO 59004 – DIS: janeiro, 2023 (tradução livre).

Este modelo circular atende as necessidades das futuras gerações como auxílio no esgotamento de recursos, além de reduzir o impacto dos resíduos do sistema linear de produção (Kirchherr; Reike; Hekkert, 2017).

Atua de forma a maximizar a eficiência dos recursos e na redução e ou gestão dos resíduos, mantendo os recursos em uso pelo maior tempo possível (HABIB, 2019). Desta forma, incentiva técnicas de reparo, reaproveitamento, recondicionamento, e propicia o uso de matéria prima secundária, gerando emprego e oportunidades de crescimento (*Ellen MacArthur Foundation*, 2013).

O conceito de EC é econômico e estratégico, o qual se baseia na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia, em um processo integrativo e fechado, de forma a preservar a acentuada exploração das minas naturais (Barreto; Xavier, 2019). Assim, tem-se o conceito de cadeia de suprimentos em circuito fechado (*Closed Loop Supply Chain – CLSC*), tornando necessário criar uma cadeia de suprimentos reversa sustentável, que se traduz no gerenciamento eficiente da devolução de produtos e emprega atividades de recuperação de valor de materiais secundários (Islam; Huda, 2018). Porém, a EC nem sempre se expressa em princípios de valor econômico, isto é, nos países em desenvolvimento o valor monetário dos materiais para os catadores é menor, do que uma recicladora ou fabricante reversa (Rebehy *et al.*, 2017).

Na EC os produtos podem ser desmantelados facilmente e os respectivos componentes separados quando descartados, bem como, podem ser feitos de materiais que são mais bem absorvidos pelo meio ambiente. De forma, a EC prioriza a qualidade e não a quantidade, ou seja, os materiais podem retornar à cadeia produtiva para gerar outros produtos com atributo superior, isto é, denominado de valorização (*upcycling*), a partir do qual produtos e serviços podem ser melhorados (Bridgens *et al.*, 2018). Essência que deriva da Ecologia Industrial, que possibilitou conhecer a viabilidade dos processos de reaproveitamento de resíduos, ou seja, matéria prima secundária, como insumo em diferentes processos (Ashby, 2015).

A recuperação dos materiais é consequência da coleta, processamento e destinação de produtos e componentes pós-consumo por meio da LR (Xavier, 2019). De forma que, a LR de pós-consumo é uma prática ambiental, sendo considerada na mineração urbana como o fechamento do ciclo da cadeia produtiva, ou seja, uma parte do ciclo da EC, visto que o resíduo sai de um ciclo produtivo e entra em outro, logo após sua geração, sendo reaproveitado, assim gerando um ciclo infinito (Guarnieri; Streit; Batista, 2018). Portanto, a LR, a qual se define, como:

“Instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010).

Diante da definição de logística reversa, percebe-se que o envolvimento dos fabricantes na gestão e reciclagem, dos fornecedores com relação a embalagem e reparo, e clientes no excesso de estoque e reparos no processo reverso é primordial para que as empresas alcancem os melhores resultados no fluxo logístico reverso (Dornier *et al.*, 2000). Há que se citar também que os princípios em uma EC surgiram como i) circuitos fechados: nos quais estão essencialmente ligados à reciclagem de resíduos pós-consumo, e em ii) desaceleração: no qual refere-se à retenção do valor do produto (Bocken *et al.*, 2017; Kirchherr; Reike; Hekkert, 2017). Esta retenção do valor do produto em um modelo circular, é efetivamente realizada pelas vias de circularidade, significando que os recursos têm um valor intrínseco às noções econômicas de valor (Ottoni; Dias; Xavier, 2020). O Quadro 2 exhibe essas vias de circularidade como exemplo no gerenciamento de resíduos eletrônicos.

Quadro 2 – Vias de circularidade aplicadas no gerenciamento de resíduo eletrônico

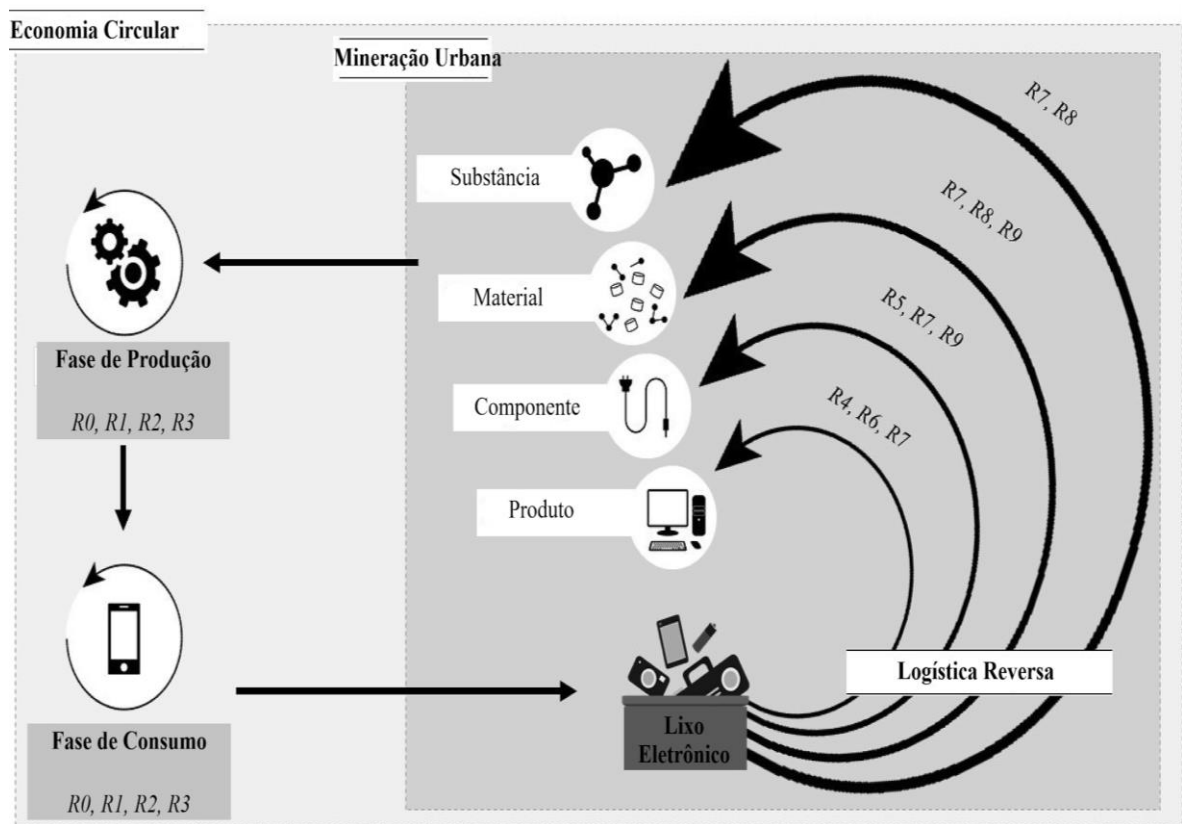
Via de Circularidade		Definição
R0	Recusar	Abstenha-se de comprar tornar o produto redundante (abandonando sua função ou oferecendo esta função com um produto diferente).
R1	Reduzir	Use menos, use mais; recentemente: compartilhar o uso de produtos; aumentar a eficiência na fabricação ou uso do produto consumindo menos recursos naturais e materiais.
R2	Reutilizar / Revender	Compre em segunda mão (em boas condições, cumpra a sua função original), ou encontre comprador para o seu produto não usado ou possivelmente alguma limpeza, pequenos reparos.
R3	Reparar	Fazendo o produto funcionar novamente, reparando ou substituindo peças deterioradas.
R4	Re-furbish	Restaure um produto antigo e atualize-o.
R5	Re-fabricar	Use partes do produto descartado em um novo produto com a mesma função.
R6	Repropôr / Repensar	Compre novo produto com nova função
R7	Reciclar	Processe os materiais para obter a mesma (alto grau) ou qualidade inferior (baixo grau). O consumidor deve descartar separadamente; comprar e usar materiais secundários.
R8	Recuperar (energia)	Produção de energia como subproduto do tratamento de resíduos.
R9	Re-mine	Compre e use materiais secundários de aterros.

Fonte: Adaptado de Ottoni, Dias e Xavier (2020)

Conforme os autores Reike, Vermeulen e Witjes (2018), a menor forma de retenção de valor de materiais na realidade são a reciclagem e a incineração, visto que os pesquisadores dependem de um conjunto de informações públicas sobre a taxa de coleta e reciclagem, já os dados sobre reutilização ou redução de entrada de recursos ainda são difíceis de obter. Portanto, estratégias como recusar (R0), reduzir (R1), reutilizar (R2) e reparar (R3), podem ser soluções antes que os produtos sejam considerados resíduos (Kirchherr; Reike; Hekkert, 2017).

A literatura não descreve o momento em que um produto se transforma em resíduo. Porém, no estudo de Ottoni, Dias e Xavier (2020) a cadeia de resíduos inicia com a destinação, sendo direcionada ao sistema de LR, como pode-se observar na Figura 21, na qual a EC é aplicada à gestão do resíduo eletrônico.

Figura 21 – Vias de circularidade para valorização de resíduo eletrônico por meio da mineração urbana e logística reversa.



Fonte: Adaptado de Ottoni, Dias e Xavier (2020)

Nesta figura podemos observar que em uma EC se preza tanto aos conceitos de MU, quanto à LR, remanufatura e redesenho, com a finalidade de padronizar o fluxo do resíduo eletrônico na implementação da circularidade.

Em suma, o conceito de EC está intrinsecamente relacionado aos princípios dos 3Rs, reduzir, reutilizar e reciclar e são as principais etapas da LR e da mineração urbana (XAVIER *et al.*, 2019). Os 3Rs têm sido considerados uma opção favorável para superar o risco potencial de fornecimento de recursos e o conceito de EC recebeu recentemente uma atenção em todos os setores (HABIB, 2019). Segundo Cossu e Williams (2015), a integração dos conceitos de gestão do ciclo fechado (*closed-loop*) e a EC fortalecem o conceito de mineração urbana. Assim o Quadro 3 apresenta as áreas de gestão com seus respectivos conceitos.

Quadro 3 – Áreas de gestão e seus conceitos

ÁREAS DE GESTÃO	CONCEITOS
Mineração Urbana	Conjunto de operações para poder recuperar matérias-primas secundárias a partir de resíduos.
Logística Reversa	Mecanismos para viabilizar coleta e retorno dos resíduos ao setor empresarial, para sua reinserção nos ciclos produtivos.
Reciclagem - Transformação	Alteração das propriedades físicas/físico-químicas/biológicas dos resíduos, para seu uso como insumos ou novos produtos.
Remanufatura	Reparo de partes e produtos pós-consumo para seu uso futuro em processos produtivos.
Manufatura Reversa	Transformação dos materiais em partes e peças, sem a obtenção de novos produtos.

Fonte: Adaptado de Xavier e Ottoni (2019 p.10)

Tem-se, a partir do que foi exposto acima, o esclarecimento das áreas de gestão, como um conjunto do “modelo de sistema integrado, restaurativo e regenerativo para valorização de materiais, ou seja, a EC (XAVIER; OTTONI, 2019 p. 10). A valoração a partir de resíduos e a potencialização da eficiência de materiais e energia, são os aspectos tecnológicos principais que abrangem os modelos circulares (Schroeder *et al.*, 2019).

Neste contexto, na literatura pode-se observar que há alternativas para a recolha e processamento de resíduos em países diferentes. No entanto, observa-se que há resíduos migrando para países que possuem indústrias e refinarias mais sofisticadas e desenvolvidas (Lepawsky, 2018).

Para Ottoni e Xavier (2019), isto se deve à falta de uma logística reversa eficiente, que possa coletar e reciclar quantidades significativas de resíduos eletrônicos. Uma solução seria a colaboração integrada das partes interessadas que atuam no país para coleta e gerenciamento da matéria prima secundária, bem como na caracterização dos materiais que compõem os produtos pós-consumo, e na estruturação de modelos compatíveis com a regulamentação vigente.

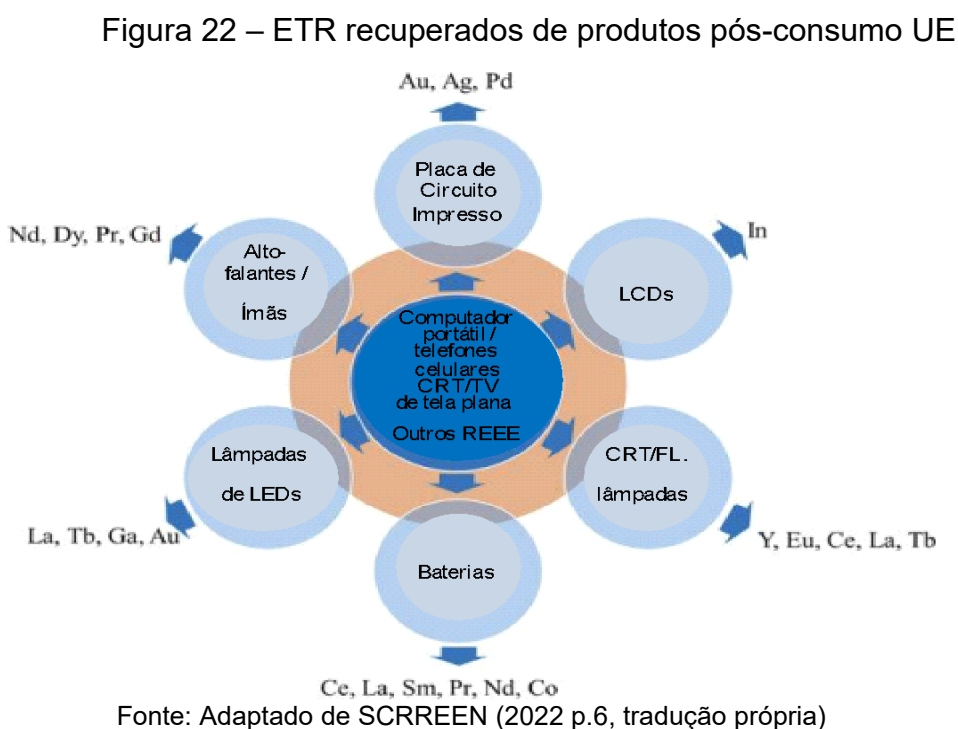
O estudo de Habib (2019), apresenta uma visão holística do potencial da circularidade, nos recursos críticos, como o Nd e Dy, com uma proposta para caracterizar as minas urbanas de produtos contendo ímãs de NdFeB ao longo de sua cadeia de valor. O mesmo enfatiza que a coleta é a primeira etapa para o gerenciamento de resíduos eletrônicos (rota logística), após tem-se processos manuais, mecânicos e químicos com a finalidade de recuperar os ETR.

2.5 RECUPERAÇÃO DE ETR A PARTIR DE ÍMÃS DE NdFeB

Nesta seção, o progresso da recuperação de ETR a partir de ímãs NdFeB, será revisado com ênfase nas soluções tecnológicas para reciclagem e na qualidade dos ímãs reciclados. Conforme Yue *et al.* (2019), os recursos secundários são de duas fontes: a primeira inclui os resíduos industriais, denominado de pré-consumo ocorrendo dentro do processo fabril (mencionado no capítulo 2.2.), e a segunda são os recursos em fim de vida, denominado pós-consumo provenientes de produtos fora de serviço que contém quantidade significativa de ETR em sua composição.

Existem diferentes processos metalúrgicos para recuperar os ETR a partir de ímãs de NdFeB em vários níveis de prontidão tecnológica (TRL) (Firdaus *et al.*, 2016). A seção 3.1.4 no capítulo de métodos apresenta sobre os níveis da TRL com detalhes.

Hoje, a taxa de reciclagem ainda é muito baixa, geralmente inferior a 1%, especialmente na Europa porque há falta de sistemas de recolha eficientes e dos custos proibitivos de construção de capacidades de reciclagem de ETR (ERECON, 2014). A Figura 22 apresenta os ETR recuperados de produtos pós-consumo da União Européia (UE).



As taxas mais elevadas de reciclagem de európio, ítrio e térbio só são comunicadas graças à reciclagem de lâmpadas fluorescentes. Os ímãs permanentes

são os principais recursos secundários para a recuperação de neodímio, praseodímio, disprósio e samário. As limalhas resultantes da moldagem e do corte do ímã final são uma fonte potencial de materiais secundários, embora a sua exploração em larga escala seja dificultada por alguns problemas.

A composição química tipicamente encontrada nos resíduos de NdFeB pós-consumo é apresentada na Tabela 5. A maioria dos resíduos com baixo teor de ETR provém de resíduos industriais, enquanto resíduos com teor médio são originados de produtos pós-consumo e os de alto teor de ETR vêm do pré-consumo.

Tabela 5 – Composições químicas de ímãs NdFeB pós-consumo (% em peso)

ETR contido	Nd	Fe	B	Pr	Dy	Co	La	Nb	Gd	Cu	Al	Ni
Baixo	10,70– 14,00	78,00– 79,20	5,75– 6,00	≈2,68	0,43– 0,60	≈0,79	-	-	-	≈0,11	≈0,19	-
Médio	21,00– 28,00	61,09– 70,60	0,73– 1,04	0,12– 2,62	1,00– 6,30	0,57– 3,34	-	≈0,37	≈0,02	≈0,15	0,20– 0,95	1,00– 3,00
Alto	19,4– 30,73	58,16– 67,15	0,96– 1,02	0,07– 7,10	0,79– 5,93	0,42– 4,22	≈1,58	≈0,83	≈1,51	-	0,34– 1,04	≈0,02

Fonte: Adaptado de Xiao *et al.* (2023)

O estudo Yue *et al.* (2019), constataram por meio da revisão de literatura que há várias técnicas desenvolvidas para transformar os resíduos pós-consumo (pós/fitas magnéticas) em novos ímãs sinterizados. Desta forma, as propriedades gerais dos ímãs de NdFeB reciclados demonstraram ser semelhantes às propriedades dos ímãs originais, de modo que podem atender à demanda na aplicação prática, conforme valores médios exibidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas dos ímãs reciclados x originais

Ímã de NdFeB	Resistência à flexão / MPa	Resistência à compressão / MPa	Dureza Vickers /kg.mm ⁻²	Resistência à fratura / MPa.m ^{1/2}
Reciclado	341	974	553	1,54
Original	363	1011	554	1,50

Fonte: Yue *et al.* (2019)

Observa-se na Tabela 6 que a resistência à flexão e a resistência à compressão dos ímãs reciclados são 6,1% e 3,7% menores do que as dos ímãs originais, enquanto a resistência à fratura dos ímãs reciclados é 2,7% maior do que a dos ímãs originais. Além disso, a dureza de ambos os ímãs é semelhante. Sob

temperatura de sinterização ideal, os ímãs reciclados exibiram Br de 12,38 kGs, H_{cj} de 24,89 kOe e (BH)_{max} de 36,51 MGOe. Em comparação com o ímã residual original, o ímã reciclado restaurou 99,20% de Br, 105,65% de H_{cj} e 98,65% de (BH)_{max}.

A recuperação é garantida de diversas maneiras e algumas dessas soluções tecnológicas têm sido aplicadas em processos de mineração de metais. Algumas empresas do Japão, bem como a indústria francesa *Rhodia Solvay*, desenvolveram processos, mas visando principalmente uma tecnologia para recuperar ETR de ímãs usados em unidades de ar condicionado (Roskill, 2021). A Universidade de Birmingham e parceiros europeus também testaram com sucesso essas tecnologias.

Duas metodologias principais foram desenvolvidas para a reciclagem de ímãs pós-consumo contendo ETR (Samouhos *et al.* 2020). A primeira, denominada processamento de circuito curto ou reciclagem direta, visa uma abordagem “ímã a ímã”, após a desmagnetização da sucata, tratamento térmico e religação pela adição de compostos ETR adicionais no material pós-consumo. O baixo impacto ambiental constitui a principal vantagem do processo de reciclagem curta ou direta. Pesquisadores da Universidade de Birmingham otimizaram a reciclagem direta de ímãs NdFeB por meio da tecnologia de decrepitação de hidrogênio. Esses materiais processados também poderiam ser enviados para refusão com materiais de liga primária.

A segunda metodologia de reciclagem diz respeito à recuperação elementar de Nd, Pr, Dy e Sm através de técnicas clássicas hidro e piro metalúrgicas. A Universidade de Delft desenvolveu uma rota metalúrgica baseada em lixiviação de sucata e extração de ETR através de precipitação seletiva. Várias entidades incluindo Geomega e *A Cyclic Materials* no Canadá também desenvolveram fluxogramas hidrometalúrgicos para essa finalidade.

Porém foram listadas barreiras tecnológicas que devem ser superadas antes da comercialização da extração de ETR de ímãs pós-consumo. As mais significativas são: i) automação da desmontagem de ímãs, (ii) redução do impacto ambiental de lixiviação e (iii) a separação/purificação eficaz de ETR dentro do lixiviado. Além disso, alguns gargalos estão presentes para recuperar e reciclar os ETR a partir de ímãs de NdFeB como:

- a) sistematização de coleta eficientes ainda não estão disponíveis;

- b) o tamanho do ímã contido em produtos pequenos é difícil de serem recuperados;
- c) a variabilidade na composição dos ímãs complica a implementação de esquemas genéricos de reciclagem; e a
- d) falta de impulso da expansão do mercado de ímãs de grande porte como: turbinas eólicas e veículos elétricos, embora o grande tamanho destes tipos de ímanes torne a sua utilização coleta mais fácil, sua longa vida útil (10-20 anos ou mais) impacta significativamente no tempo em que estes materiais estarão disponíveis como material secundário (Roskil, 2016).

A reciclagem de ETR contidos em ímãs de NdFeB desempenhará um importante papel complementar no fornecimento total de ETR no futuro (Yang et al., 2017). O potencial total de recuperação teórica de 2016 a 2040 é de cerca de 233.000 toneladas de NdFeB, o que equivale a 66.600 toneladas de Nd e 7.900 toneladas de Dy (Reimer *et al.*, 2018; Xiao *et al.*, 2023). A partir da composição química dos ímãs, é fácil concluir que o potencial de recuperação de Fe nos ímãs de NdFeB pós-consumo será mais que o dobro dos ETR. Além disso, os pesquisadores München, Stein e Veit, (2021), apresentam em sua pesquisa o potencial de recuperação gerado por unidades de disco rígido e o desperdício de telefones celulares no Brasil, estimado em 170,88 t de Nd, 26,89 t de Pr, 9,64 t de Dy e 3,89 t de Tb para o período 2010 a 2019. Os resíduos magnéticos são exportados para China e Japão para reciclagem metalúrgica.

A próxima seção será abordada as soluções tecnológicas para transformar os resíduos pré e pós-consumo, bem como o uso direto dos ímãs pós-consumo.

2.6 SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS

Conforme mencionado na seção anterior 2.5, a maioria das soluções tecnológicas para recuperar os ETR são adaptadas de processos minero-metalúrgicos tradicionais, utilizados na cadeia primária. Essas soluções podem combinar técnicas quando houver necessidade, sendo elas: hidrometalurgia, pirometalurgia e biohidrometalurgia (Amato *et al.*, 2019; Yue *et al.*, 2019). Dessa forma, esta seção apresentará os processos convencionais e inovadores possíveis para reciclar os ímãs de NdFeB.

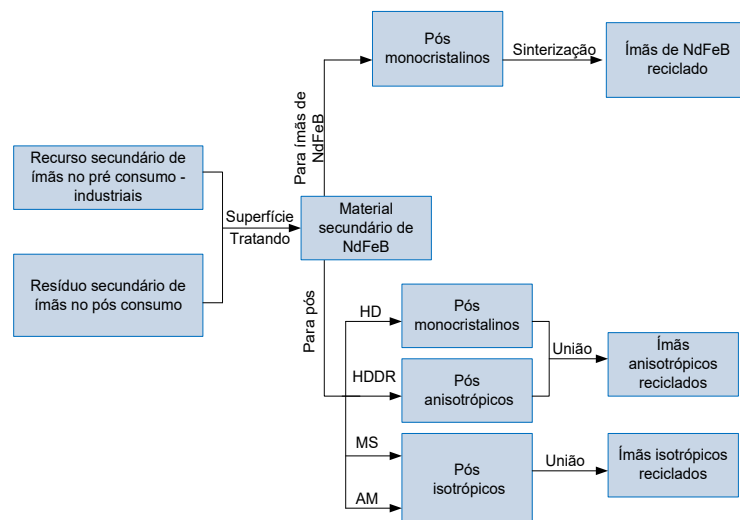
2.6.1 Processo de reutilização direta

A rota mais atrativa ecológica e economicamente seria reutilizar este ímã diretamente, para casos em que a composição desejada do novo ímã for igual à anterior (Zhang *et al.*, 2018). Esta opção só é possível em ímãs grandes e de fácil acesso, como os utilizados em turbinas eólicas, veículos híbridos e elétricos.

Já Firdaus *et al.* (2016), complementam que esta estratégia de caminho mais curto só é viável se os ímãs puderem ser rastreados e coletados pós-consumo para evitar contaminação. Porém, mesmo restringindo a coleta em ímãs do tipo NdFeB no final de sua vida útil, o estado de corrosão e o tipo de revestimento (multicamadas de Ni ou Zn), atualmente sem padrão, aplicados por *galvanoplastia* e *spray*, bem como formato, dimensão e composição diversificadas podem ser encontrados (Burkhardt *et al.*, 2020).

Após um simples pré-tratamento, esses ímãs podem ser utilizados diretamente no processo de produção para produzir novos ímãs de NdFeB. Este tipo de processo requer poucas etapas, tem impacto ambiental mínimo e produz ímãs a um custo muito baixo (Xiao *et al.*, 2023). O fluxograma referente ao processo de reutilização direta (Figura 23) incluem ressinterização do pó, fiação por fusão (MS), Decrepitação de Hidrogênio (HD) e Hidrogenação-Desproporção-Dessorção-Recombinação (HDDR) ou fabricação aditiva (AM).

Figura 23 – Fluxograma de recuperação de recurso secundário com a técnica de reutilização direta de resíduos de ímã de NdFeB pré e pós-consumo



Fonte: Adaptado de Xiao *et al.* (2023, tradução própria)

Observa-se na Figura 23, que a entrada de material secundário pré e pós-consumo, pode ocorrer por pós e pelo componente ímã de NdFeB. Os processos de tratamento podem ser via HDDR é um método tradicional para atingir diretamente o endurecimento magnético em lingotes de NdFeB fundidos. Os pós magneticamente anisotrópicos podem ser obtidos com este método (Yue *et al.*, 2019).

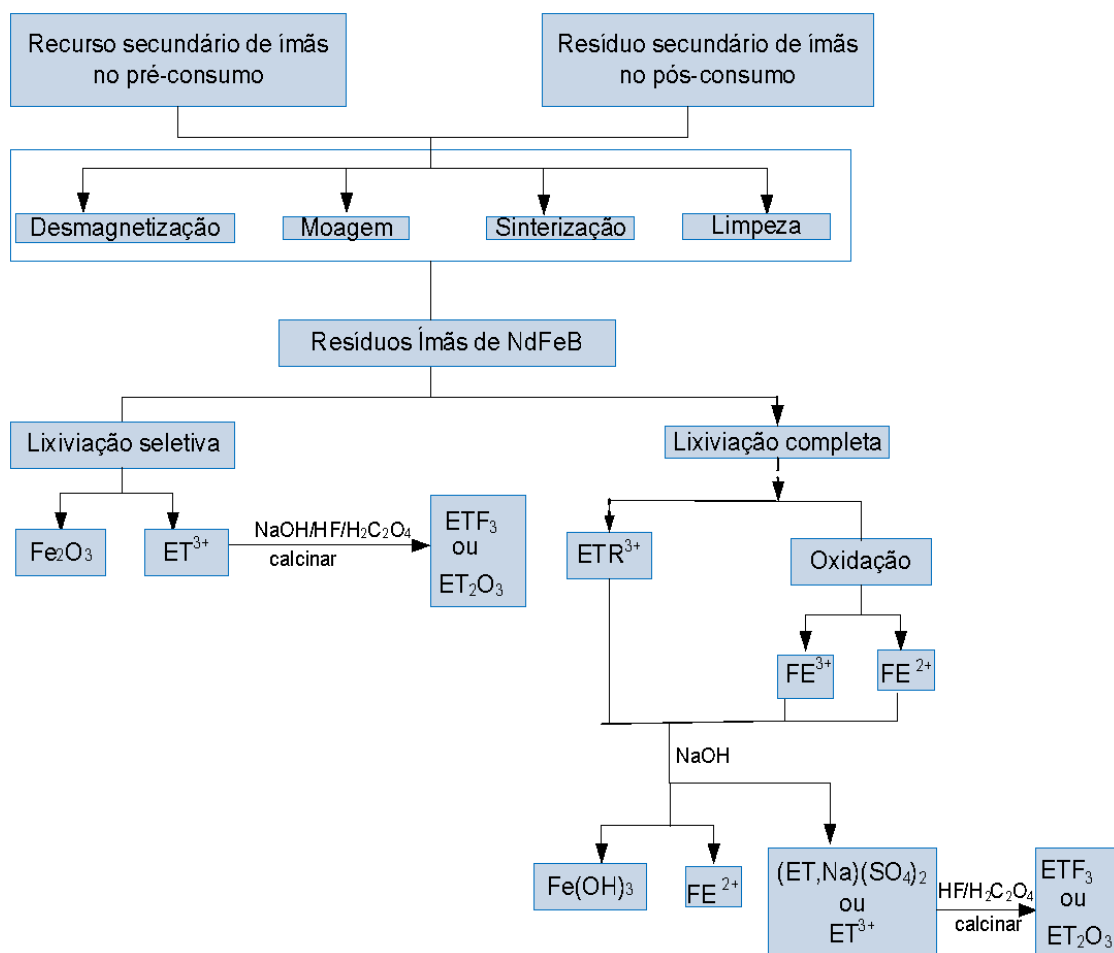
Quando os ímãs são expostos ao hidrogênio, o seu volume expande em até 5% ocasionando a fragmentação do material, podendo ser muito eficaz tanto para produzir pós anisotrópicos com alta coercividade para ligas de Nd-Fe-B sinterizadas, quanto o processo de moagem HD ou HDDR, pois o alto teor de oxigênio deve ser evitado para não prejudicar o desempenho do pó magnético (Sheridan; Harris; Walton, 2016). O processo HDDR para preparar pós magnéticos anisotrópicos a partir de ímãs de NdFeB (Ce, Pr, Nd) -Fe-B, utilizado pelos autores Zhao *et al.* (2022) mostrou que o pó HDDR obteve orientação dos grãos iniciais e a coercividade resultou em 83% de forma análoga aos ímãs iniciais sinterizados.

A pesquisa de Li *et al.* (2015), relata que os ímãs de NdFeB sinterizados de sucata foram reciclados como matéria prima para liga de ímãs usando o processo de decrepitação de hidrogênio (HD). Atualmente este procedimento é importante na fabricação de ímãs sinterizados de Nd-Fe-B, esta liga absorve hidrogênio muito rapidamente em temperatura ambiente com consequente decrepitação do material a granel em um pó friável. Este processo consiste em dois estágios, no primeiro o hidrogênio é absorvido pela fase de contorno do grão rico em Nd e no segundo pela fase matriz de Nd₂Fe₁₄B. Segundo os autores, esta técnica é vantajosa, porque os pós HD podem ser preparados sem danificar a microestrutura texturizada.

2.6.2 Processos Hidrometalúrgicos

Os processos hidrometalúrgicos são usados para a separação e purificação do metal. Este processo permite a facilidade da remoção de alta concentração de impurezas, portanto não há requisitos especiais para a origem da sucata de NdFeB (Takeda; Lu; Zhu, 2022). No entanto, a desmagnetização e a moagem como etapas de pré-tratamento podem melhorar a recuperação de ETR (Nd, Dy e Pr) dos ímãs NdFeB (Papagianni *et al.*, 2022). O fluxograma dessa solução tecnológica é exibido na Figura 24.

Figura 24 – Fluxograma dos processos hidrometalúrgicos a partir de ímãs de NdFeB.



Fonte: Adaptado de Xiao et al. (2023, tradução própria)

Conforme Lee (2013), no sistema de solução aquosa, tanto a soda cáustica (NaOH), quanto o ácido inorgânico (H_3PO_4 , H_2SO_4 , HNO_3 e HCl) têm sido utilizados no processo de lixiviação de ímãs de NdFeB pós-consumo. Segundo Gergoric, Barrier e Retegan (2019) alguns ácidos orgânicos, como CH_3COOH (ácido acético), $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ (ácido cítrico), e $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$ (ácido maleico) podem ser usados para lixiviar resíduo de ímãs de NdFeB. A lixiviação é a etapa central da solução tecnológica hidrometalúrgica, podendo ser utilizada para dissolver componentes úteis de acordo com a diferença nas propriedades químicas dos ímãs de NdFeB. Assim, conforme o grau de dissolução do ímã, o processo de lixiviação é geralmente dividido em lixiviação completa e lixiviação seletiva. No processo de lixiviação completa do ímã, o pré-tratamento do ímã pode melhorar a eficiência da lixiviação, como moagem e desmagnetização (Klemettinem et al., 2021). Os autores Xiao *et al.* (2023), ainda pontuam que os ácidos orgânicos apresentaram baixa seletividade.

Os pesquisadores Lee *et al.* (2017), adotaram em seu estudo o processo convencional hidrometalúrgico com pH variável para recuperar o Nd, na qual resultou na recuperação de (~92%) de Nd, sendo utilizado HCl para a dissolução do revestimento em Ni dos ímãs de NdFeB. Por este motivo, os processos hidrometalúrgicos são frequentemente preferidos a outros tipos de processos e são mais consolidados (Tunsu *et al.*, 2015). Esta solução tecnológica permite a separação e recuperação dos ETR das limalhas de ímãs de NdFeB (Binnemans *et al.*, 2013; Padhan; Nayak, Sarangi, 2017). Conforme Önal *et al.* (2017b), o método hidrometalúrgico pode ser ajustado para recuperar outros metais como o cobalto, níquel e cobre que coexistem no ímã.

Já o estudo de Kumari *et al.* (2018), combinam os métodos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos, isto é, a mistura das duas soluções tecnológicas, desenvolvida de forma a recuperar ETR de ímãs pós-consumo da turbina eólica, resultando na obtenção do óxido de terras raras misto com 99% de pureza (Kumari *et al.*, 2018). Ainda, conforme o estudo de Önal *et al.* (2017a), que proporcionou a extração de 95% dos ETR, este método pode ser ajustável a todos os ímãs de NdFeB, independentemente de sua composição, a maior parte do ácido nítrico consumido (isto é, o único produto químico usado) é reciclável, sendo ecológico e econômico.

A Solução tecnológica hidrometalúrgica apresenta vantagens sobre os processos pirometalúrgicos principalmente pelos seguintes motivos: reduzir o consumo de energia e as emissões de gás tóxico. Além disso, têm se mostrado mais eficientes, mais precisas e mais controladas em processos hidrometalúrgicos.

De acordo com a estimativa de Xu *et al.* (2019), são necessários 2.172 kg de H_2SO_4 para dissolver completamente 1.000 kg de resíduos de NdFeB, dos quais 1.900 kg são consumidos pela lixiviação de Ferro. Além disso, são necessários 1.600 kg de NaOH para remover o Fe do lixiviado e neutralizar o excesso de ácido. Como um importante substituto dos ácidos inorgânicos, os ácidos orgânicos também podem ser usados para dissolver ímãs. Stein *et al.* (2022), avaliaram o efeito de lixiviação de ácidos orgânicos em ímãs de NdFeB, segundo os autores, os ácidos orgânicos apresentaram baixa seletividade no processo de lixiviação, o ácido cítrico e o ácido acético lixiviam 60% em peso de ETR, e também lixiviam cerca de 60% em peso de Fe. A lixiviação é uma técnica metalúrgica extrativa que converte metais em sais solúveis em meio aquoso. As vantagens do processo de lixiviação em relação às operações pirometalúrgicas são a facilidade de operação, a ausência de poluição

gasosa e a baixa toxicidade. No entanto, há consumo de produtos químicos em grande quantidade e necessitam de processamento adicional (Lee *et al.*, 2017; Tunsu *et al.*, 2015).

De acordo com Pavón *et al.* (2018), a extração por solvente é uma técnica possível e promissora para recuperação de ETR de resíduos de ímãs de NdFeB usando extratores catiônicos, por meio de um processo industrial. Em geral, a pureza dos ETR produzidos usando extração com solvente é maior do que usando precipitação, em torno de 84,61% para Nd e 85,71% para o Dy (Padhan; Nayak; Sarangi, 2017).

O processo de Lixiviação, extração e precipitação com ácido é considerado um método ecológico e essencial para Kumari, Jha e Pathak (2020), no qual foi possível desenvolver um fluxograma para recuperar Nd. Este processo inclui ácido clorídrico (HCl), ácido sulfúrico (H₂SO₄), ácido nítrico (HNO₃), ácido ascórbico (C₆H₈O₆) para a separação individual de Dy e Nd, solução de amônia (NH₄OH) para ajuste de pH e outros produtos químicos como hidróxido de sódio (NaOH), fenolftaleína, usados durante o procedimento de titulação de ácido. No entanto, apesar de conter ácidos, concluíram que esta técnica parece ser viável para exploração comercial após aumento de escala ou testes piloto.

O estudo de Liu *et al.* (2019) permitiu a recuperação de ETR, Fe, B dos resíduos magnéticos de NdFeB por meio da lixiviação de pressão de ácido clorídrico seguida de precipitação de oxalato e recuperação de boro. Enfatizam que o desafio na reciclagem e remoção do boro, sendo necessário recuperá-lo para evitar o seu acúmulo em produtos ou águas residuais durante o processo de reciclagem. Comparando as metodologias convencionais esta rota reduz os níveis de água residual e quantidade de ácido oxálico.

Já Prodius *et al.* (2020), permite a lixiviação seletiva dos ETR contidos nos ímãs residuais de produtos de resíduo eletrônico, como unidades de disco rígido fragmentadas (HD) e motores elétricos esmagados. O sal de cobre (II) foi utilizado para dissolver os materiais magnéticos, eliminando o uso de ácidos tóxicos e voláteis nos processos de dissolução e separação. Além disso, é possível o reuso do teor de cobre II na cadeia de valor.

2.6.3 Processo Pirometalúrgico

A solução tecnológica pirometalúrgica visa a concentração do metal de interesse através de reações envolvendo altas temperaturas, para fundir ou “queimar” materiais, de forma a reduzir e extrair metais. Essa técnica é capaz de receber “qualquer tipo de resíduo, no entanto a presença de retardadores de chamas halogenados podem levar à formação de dioxinas, furanos, poluentes orgânicos polibromados entre outras substâncias tóxicas” (Xavier *et al.*, 2023).

Para Amato *et al.* (2019), os aspectos ambientais e econômicos foram avaliados, considerando três processos: pirometalurgia, extração por solvente e lixiviação para extrair metais, aplicados as lâmpadas fluorescentes, catalisadores de craqueamento catalítico e ímãs de NdFeB. Além disso, a pegada de carbono foi utilizada para indicar a sustentabilidade, e para os ímãs a relação foi baseada no preço de mercado concluindo que a produção secundária reduz o custo econômico em até 70 vezes.

Os processos para a recuperação de Nd como fase metálica podem ser agrupados em i) processos metalúrgicos utilizando metais líquidos reativos (por exemplo, Mg e Ag), que formam rapidamente intermetálicos com Nd em altas temperaturas, bem como, ii) processos eletrolíticos em cloretos fundidos seguido de ionização seletiva de Nd a partir de NdFeB. De acordo com a diferença de afinidade entre os diferentes elementos do ímã e o cloro (oxigênio) e as diferentes propriedades do cloreto (óxidos) formado por cada elemento, as terras raras e o ferro metálico são separados para extrair ETR (Xu *et al.*, 2020).

Assim, processos pirometalúrgicos permitem a re-fusão das ligas ETR (fusão direta) ou extração dos ETR de metais de transição no estado metálico (extração de metal líquido). Os processos pirometalúrgicos são mais adequados para a reciclagem de ETR de ligas magnéticas parcialmente oxidadas (refino por eletroescória ou método de escória de vidro) (Binnemans *et al.*, 2013). O processo é mais adequado para resíduos pré-consumo grandes e relativamente limpos, por exemplo, ímãs quebrados durante o processo de fabricação. No entanto, um ímã que será submetido a reciclagem para extração dos ETR, como entrada para a produção de uma liga, essa tecnologia não é muito adequada, pois o processo não é adequado à separação das terras raras dos metais de transição.

As técnicas de extração pirometalúrgica incluem processamento eletroquímico, extração em fase gasosa, gás-sólido e sólido-líquido, processo de escória de vidro, torrefação, extração de escória fundida, extração de metal líquido, fundição extração de sal e fundição (Omodara *et al.*, 2019). Entre estes, a fundição é comumente em OTR que são posteriormente dissolvidos em uma fase de escória (Lukowiak *et al.*, 2020). Essa técnica permite recuperar ímãs de NdFeB extraíndo ETR, resíduos de circuito impresso, pó fluorescente para lâmpadas (Omodara *et al.*, 2019). Entretanto apesar de ser a tecnologia elementar, o grande problema da indústria pirometalúrgica está no controle do gás de combustão resultante da presença de orgânicos como dioxinas, retardadores de chama, furanos e fenólicos (De Oliveira; Benvenuti; Espinosa, 2021). Além do mais, o processo está associado a problemas de corrosão, tem altas demandas de energia e é caro (Lukowiak *et al.*, 202; Li *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2021)

No processo pirometalúrgico a fase metálica fundida apresenta a maior concentração de metais, enquanto os oxidados se concentram na escória. Para extrair os metais de interesse, etapas subsequentes de refinamento como a eletrólise são necessárias (Xavier *et al.*, 2023).

2.6.4 Processo Eletroquímico

A eletrólise do sal fundido, como parte sobreposta dos métodos térmicos e eletroquímicos, tem sido amplamente desenvolvida no campo da separação e extração de ETR. Como meio de reação de alta temperatura, os sais fundidos são superiores às soluções aquosas no campo da pesquisa eletroquímica devido à sua alta estabilidade química, alta condutividade, alta taxa de reação, ampla faixa de temperatura aplicável e baixa pressão de vapor (Xu *et al.*, 2022).

Os eletrodos normalmente consistem em metal sólido, metal líquido, carbono ou semicondutores, enquanto o eletrólito é geralmente uma solução líquida, por exemplo, água ou sal fundido, que contém íons, como H^+ , Cl^- ou Na^+ . Os diferentes métodos de eletrólise diferenciam-se na temperatura, produtos e eletrólitos (München; Stein; Veit, 2021). O comportamento das emissões gasosas altera-se quando é adicionado óxido de praseodímio ao óxido de neodímio em uma eletrólise de sais fundidos.

Segundo Xu *et al.* (2020), o método eletroquímico desenvolvido apresenta-se como o mais ecológico e fácil para a reciclagem de ímãs de NdFeB. Demonstraram que tanto os ETR quanto o Fe podem ser recuperados por duas etapas, eletrólise e precipitação seletiva. Assim, reduzindo o consumo de produtos químicos e evitando a geração de resíduos sólidos à base de Fe e o descarte de efluentes, sendo um método econômico e ambientalmente atrativo para aplicação industrial.

A recuperação de Nd e Pr de matéria prima de fonte secundária é investigada por Yang *et al.* (2020), autores utilizaram a eletrólise em LiF-CaF₂, sem liberar nenhum gás anódico, os autores concluíram que as taxas de separação de Nd e Pr aumentam com o aumento da corrente, enquanto a taxa de reação de oxidação foi proporcional à corrente. Quando o ímã faz contato elétrico com o catodo de titânio, o hidrogênio explode e se transforma em um pó com tamanho de partícula inferior a 50µm. As propriedades magnéticas deste pó fino de hidreto de NdFeB (Nd₂Fe₁₄BH_{3.31}) não são tão boas quanto os ímãs pós-consumo, mas o pó pode formar novos materiais magnéticos após o processamento (Kaplan *et al.*, 2022).

2.6.5 Processo biohidrometalúrgico

Este processo utiliza microrganismos como fungos, bactérias, algas para extração de metais de determinado substrato, de forma a transformar em sais solúveis em meio aquoso. Conforme Kidde *et al.* (2020) o processo divide-se em biolixiviação, onde os microrganismos oxidam e/ou liberam agentes para oxidação e solubilização dos metais e em biossorção que necessita de microrganismos vivos para interagirem e extraírem substratos de metais.

Trata-se de uma solução tecnológica que elimina o uso de reagentes tóxicos, promove a economia de insumos e reduz o consumo energético. Contudo, requer cuidados como a manutenção e o condicionamento de microrganismos por períodos prolongados, sendo esse um processo lento (Xavier *et al.*, 2023). A combinação de biolixiviação e biossorção caracteriza-se como um processo limpo, isento de componentes tóxicos, atendendo à necessidade de evitar reagentes nocivos e a geração de resíduos na recuperação de materiais de alto valor agregado. Portanto, a combinação da biolixiviação e biossorção não apenas se apresenta como uma alternativa viável e limpa, mas também como um motor para a inovação no setor de mineração, capacitando uma transição para práticas mais responsáveis e alinhadas

com os princípios da economia circular. Prosseguir nessa direção é fundamental para enfrentar os desafios globais relacionados à escassez de recursos e às exigências ambientais contemporâneas.

2.6.6 Impacto das soluções tecnológicas

Com base nas informações descritas sobre as soluções tecnológicas para recuperar ETR a partir de ímãs de NdFeB um processo combinado é uma escolha melhor para contornar as desvantagens de vários métodos de recuperação (Xiao *et al.*, 2023).

Assim, fazendo uma comparação com os métodos abordados, a recuperação de elementos individuais pelo método convencional hidrometalúrgico, quando comparadas ao pirometalúrgico e eletroquímico, relacionado a nível de tecnologia é mais maduro. Este método possibilita a alta pureza do produto, pode ser aplicado às correntes complexas em final de vida, mesmo com provável presença de contaminantes (Silvestri *et al.*, 2021). Neste contexto o Quadro 4 exemplifica os métodos de recuperação mais utilizados com suas vantagens e desvantagens.

Quadro 4 – Diferentes métodos de recuperação de ITR vantagens e desvantagens

(continuação)

	Método	Vantagens	Desvantagens
Produto	Reutilização direta na forma /formato atual	- Forma mais econômica de reciclagem (baixo consumo de energia, sem consumo de produtos químicos); - Sem resíduos gerados.	- Apenas para grandes ímãs facilmente acessíveis (turbinas eólicas, grandes motores elétricos e geradores em veículos híbridos e elétricos).
Substância	Reprocessamento de ligas para ímãs após decrepitação de hidrogênio (HD)	- Menor consumo de energia necessário do que para rotas hidrometalúrgicas e pirometalúrgicas; - Sem resíduos gerados; - Especialmente adequado para unidades de disco rígido (pouca mudança de composição ao longo dos anos).	- Não aplicável à alimentação de sucata mista, que contém ímãs com grandes variações de composição; - Não aplicável a ímãs oxidados.
	Hidrometalúrgicos	- Geralmente aplicável a todos os tipos de composições magnéticas; - Aplicável a ligas não oxidadas e oxidadas;	- Muitas etapas do processo necessárias antes de obter novos ímãs; - Consumo de grandes quantidades de produtos químicos;

Material	(conclusão)		
	Hidrometalúrgicos	- Mesmas etapas de processamento que aquelas para extração de terras raras de minérios primários.	- Geração de grandes quantidades de águas residuais.
	Pirometalúrgicos	- Geralmente aplicável a todos os tipos de composições magnéticas; - Sem geração de águas residuais - Menos etapas de processamento do que métodos hidrometalúrgicos; - A fusão direta permite a obtenção de ligas principais; - A extração de metal líquido permite a obtenção de ETR em estado metálico.	- Maior entrada de energia necessária; - Fundição direta e extração de metal líquido não podem ser aplicadas a ímãs oxidados; - O refino por eletroescória e o método da escória de vidro geram grandes quantidades de resíduos sólidos.
	Biohidrometalúrgicos	- Baixo custo de implementação e operação; - Baixo consumo de energia; - Baixa emissões gasosas e impacto ambiental.	Alta ineficiência de recuperação de metais; Mão de obra. Consumo de água e tempo longo de processo

Fonte: Adaptado de Binnemans *et al.* (2013); Silvestri *et al.* (2021) e Kidde *et al.* (2020)

No Quadro 4, observa-se a categorização do método de recuperação de material secundário, abrangendo produtos como "componentes ímãs", substâncias e materiais em forma metálica ou composto químico. Os principais objetivos desse processo são baixos riscos ambientais, consumo mínimo de energia e a aplicação de processos em circuito fechado. (Xavier *et al.*, 2021).

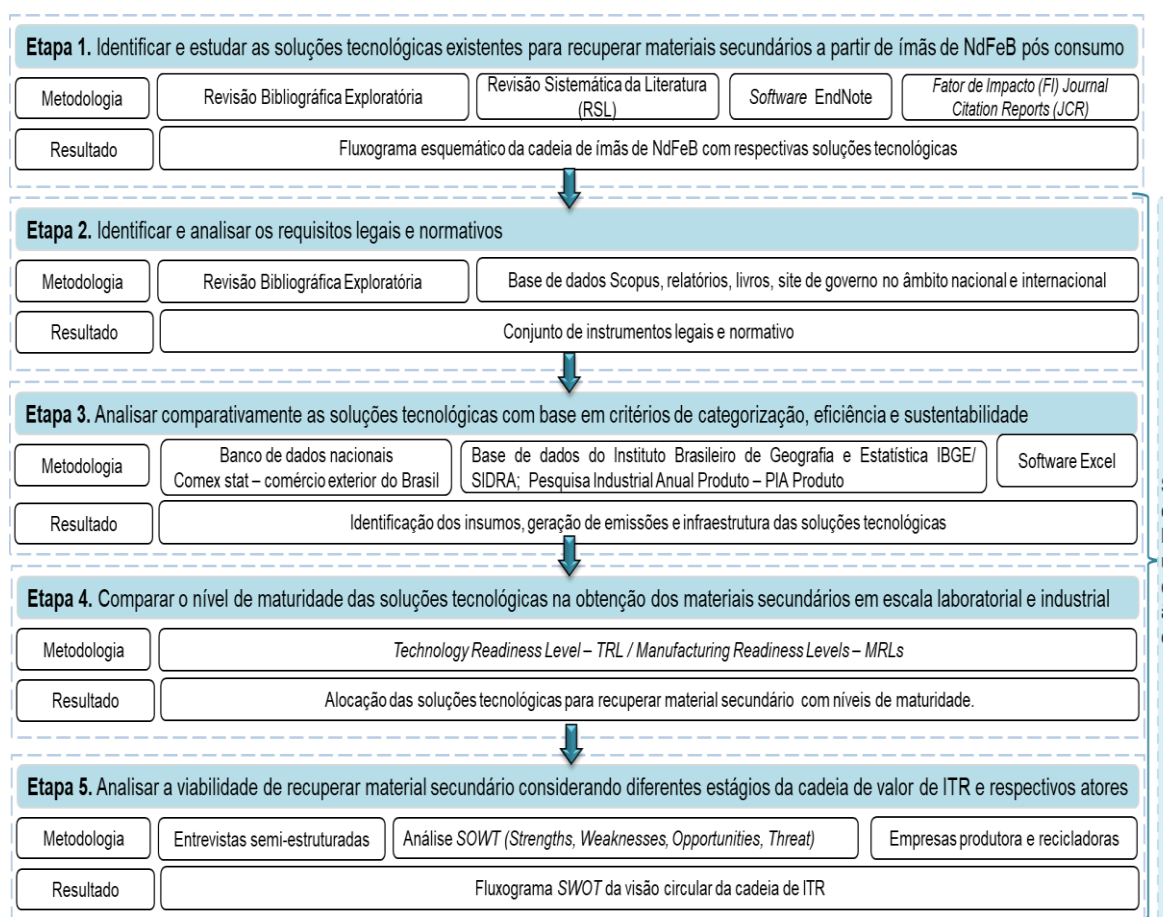
Os processos hidrometalúrgico e biohidrometalúrgico têm alcançado alta seletividade de metais (Isildar *et al.*, 2018). Porém, todas as soluções tecnológicas de recuperação de materiais secundários a partir de ímãs de NdFeB pós-consumo através da mineração urbana necessitam de um volume mínimo de forma que possa garantir a viabilidade técnica e econômica do empreendimento.

Portanto, a partir do que foi apresentado nesse capítulo de fundamentação teórica, observa-se que as soluções tecnológicas existentes apresentam uma base teórica robusta e em evolução. No entanto, deixam claro também sobre a necessidade da proposição de um modelo voltado para economia circular envolvendo os atores da cadeia de ITR. Dessa forma, no intuito de apresentar o estudo alinhado a uma aplicação prática com os envolvidos no setor, esta tese apresentará a realidade atual dos materiais pós-consumo, normas existentes, quantidade de ímãs em território nacional, entre algumas particularidades adaptadas às necessidades do LabFabITR.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa possui metodologia categorizada como: i) exploratória-descritiva, desenvolvida a partir de levantamento bibliográfico (análise de documentos/relatórios, respaldados em legislações no âmbito nacional e internacional), além de entrevistas com especialistas e profissionais das áreas de ITR, reciclagem de REEE e uma indústria produtora de grande porte que aplicam os ímãs de NdFeB em seus produtos no Brasil; ii) análise quantitativa é desenvolvida a partir da coleta de informação em banco de dados nacionais para representar um panorama real da quantidade de ITR no Brasil. Os procedimentos metodológicos são compostos de cinco etapas apresentadas na Figura 25.

Figura 25 – Etapas da pesquisa com respectivos resultados



Fonte: Autora (2023)

As duas primeiras etapas desta pesquisa são cruciais para estabelecer uma base teórica sólida sobre o tema, permitindo a identificação de insumos, emissões geradas e a infraestrutura das soluções tecnológicas. A execução da terceira, quarta

e quinta etapas fornecem material suficiente para apoiar o processo decisório na busca por soluções tecnológicas para a recuperação de material secundário da cadeia produtiva de ITR no Brasil, bem como apresentar as oportunidades, fragilidades que contribuem com setor de recuperação/reciclagem a partir de ímãs de NdFeB.

3.1 ETAPAS DA PESQUISA

3.1.1 Etapa 1: Identificar e estudar as soluções tecnológicas existentes para recuperar materiais secundários a partir de ímãs de NdFeB pós-consumo

A primeira etapa desta pesquisa é composta por duas fases, sendo elas:

- a) Revisão exploratória narrativa: buscou-se o máximo de teorias possíveis já publicadas na forma de documentos nacionais e internacionais, normas, relatórios, manuais sobre mineração urbana e economia circular, livros, trabalhos acadêmicos e artigos na base de dados *Scopus*®, para análise e compreensão de como vem sendo desenvolvida a questão de criticidade dos materiais e a gestão para recuperar material secundário de produtos pós-consumo; e
- b) Revisão sistemática da Literatura (RSL): nesta fase empregou-se um método capaz de compor uma base teórica confiável, eliminando a subjetividade, identificando lacunas na literatura, além de fornecer uma base de conhecimento existente para apoiar novas pesquisas (Kitchenham *et al.*, 2009) e fornecendo subsídios para análise do estudo de caso proposto (Yin, 2014).

O método envolve seguir um processo complexo para garantir uma análise com transparência, seguido de planejamento da revisão, condução da revisão e apresentação de resultados. Logo, para desenvolver este estudo de pesquisa o protocolo geral associado à realização da revisão foram as seguintes:

- i. Identificação o tema de estudo;
- ii. Triagem de estudos primários;
- iii. Avaliação a qualidade/relevância dos estudos;
- iv. Análise e síntese dos dados vinculados às questões para direcionamento do fluxograma circular da mineração urbana de ITR; e
- v. Consolidação dos resultados.

O protocolo da metodologia de RSL aplicado nesta pesquisa é apresentado no capítulo de resultados, na Figura 30.

Inicialmente neste processo é indicado dividir as questões de pesquisas em individuais, isto é, ligadas com a amostra ou população, período, resultados, metodologias, entre outros (Kitchenham, 2004). As questões da pesquisa foram classificadas em três categorias, conforme apresenta a Tabela 6.

Tabela 7 – Perguntas de pesquisa para o estudo de RSL publicados

Classificação	Perguntas
Geral	Quais as soluções tecnológicas existem para recuperar material secundário a partir de ímãs de NdFeB pós-consumo?
Específica	Quais as soluções tecnológicas para a recuperação do Nd,Dy,Pr? Quais vias de circularidade são possíveis para o retorno dos materiais secundários pré e pós-consumo?
Estatística	Quantos artigos foram publicados por ano? Quais foram os países de publicação?

Fonte: Autora (2023)

A categoria geral visa buscar estudos existentes que recuperam material secundário a partir de ímãs de NdFeB e quais seriam os métodos atuais utilizados. Utilizou-se de perguntas específicas para identificar estudos que desenvolveram soluções tecnológicas para recuperação dos ETR consolidados em escala laboratorial ou escala industrial existentes, bem como demonstrado a possibilidade e eficiência de extração dos materiais recuperados. Já na categoria estatística, foram usadas perguntas para determinar onde ocorrem mundialmente e qual a frequência das publicações no período de 5 anos.

Inicialmente, são decididas palavras-chave que levam a uma lista abrangente de estudos, após esse processo selecionou-se o banco de dados e delimitou-se a busca na base de dados *Scopus®* e *Web of Science®* por serem base de dados relevantes e mais recomendadas (Ferenhof; Fernandes, 2016). Para a pesquisa dos estudos de soluções tecnológicas e, por fim, a aquisição de resultados correspondentes através de critérios de seleção. Em seguida, foi criada uma lista de palavras com seus sinônimos e *strings* de busca construídas usando operadores booleanos, incluindo os termos em inglês “AND” e “OR” com seus respectivos conectores.

Os termos iniciais foram definidos como “recuperação” e “NdFeB”, enquanto os termos de pesquisa secundário foram “resíduo ou sucata de ímãs permanentes”. Assim, com o intuito de consolidar as soluções tecnológicas atuais de recuperação de material secundário a partir de ímãs de NdFeB. Dessa forma, incluiria estudos de qualquer situação em que “NdFeB” e “recuperação” estivessem relacionados ao “material pós-consumo” e “ímãs”.

O próximo passo, após uma abordagem de tentativa e erro dos termos, foi utilizar conectores para otimizar a combinação, aumentando a assertividade dos resultados e abrangendo o maior número possível de estudos. Para isso, os termos foram empregados em inglês. O asterisco (*), é o caractere de truncamento utilizado para substituir um dos vários caracteres, pode ser utilizado ao final (truncamento à direita), ou no meio de uma palavra.

Ao final, foi realizada uma análise preliminar das palavras chave como: “*circular economy*”, “*urban mining*”, “*recover*”, “*reverse supply chain*” e *recycl**. Verificou-se a necessidade de incluir novas palavras-chave na *string* de busca para maior assertividade nos resultados: “*end of life*” OR *recycl** OR *recover** AND waste OR *scrap** OR *swarf* AND *magnet** AND *permanente* OR NdFeB OR Nd-Fe-B OR *neodymium*”. Assim, proporcionou uma combinação lógica com os conectores.

A triagem, mediante critérios de inclusão e exclusão, foi aplicada para manter os resultados mais relevantes, e eliminar estudos que não atendem às perguntas iniciais de busca, bem como restringir o período de publicação dos estudos. Conforme Kitchenham (2004) reduzir a probabilidade de estudos não relacionados devem ser decididos durante as etapas iniciais para classificação confiável dos resultados. Os critérios de inclusão e exclusão usados neste estudo, estão exibidos a seguir:

- i. Inclusão 1: o estudo deve ser artigos completos;
- ii. Inclusão 2: o estudo deve ser em inglês;
- iii. Inclusão 3: o estudo deve estar relacionado às áreas de Ciência e Engenharia de Materiais, Minerais/Metais, Economia Circular/Sustentabilidade; e
- iv. Inclusão 4: estudos publicados nos últimos 5 anos entre (2018-2023), até o terceiro trimestre de 2023.

Os artigos que não estavam em conformidade com os critérios supracitados de inclusão foram eliminados e o restante submetidos aos critérios de exclusão:

- i. Exclusão 1: estudo publicado antes de 2018;

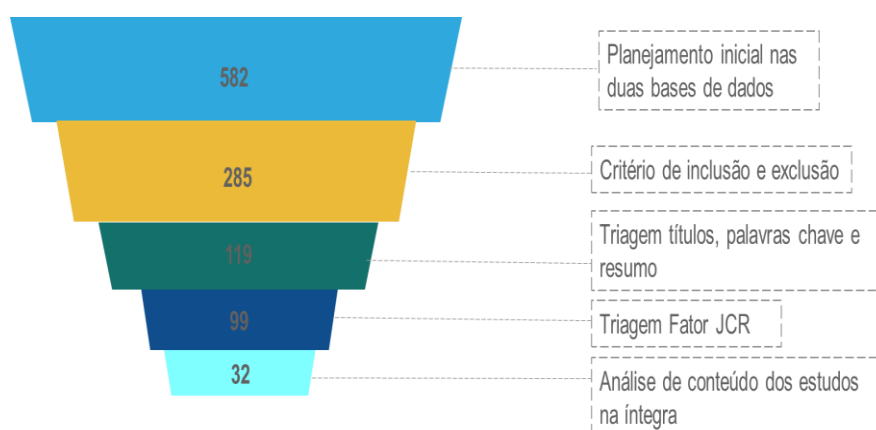
- ii. Exclusão 2: estudo publicado em congressos/dissertação/tese; e
- iii. Exclusão 3: estudo de autores duplicados; e
- iv. Exclusão 4: estudo não está relacionado com a recuperação de ETR.

Para melhor realizar o processo de inclusão e exclusão e eliminar estudos duplicados que não estavam no escopo desta pesquisa, foi necessário o uso do *software* de gerenciamento de artigos *EndNote*, eliminando subjetivismo para o processo de triagem. Na sequência, o *software* *Vosviewer*® foi utilizado para validação de cada chave de busca, estabelecendo conexões entre as palavras chave.

No processo de triagem dentro do gerenciador de referências a leitura foi efetiva no título, resumo e palavras-chave, estudos considerados como não relevantes ou que não estivessem relacionados ao escopo do estudo, foram removidos, após a triagem e obtido a matriz do conhecimento com base nos estudos selecionados. A matriz de estudos obtida foi lida na íntegra e passou por posterior análise de conteúdo.

A relevância da qualidade dos artigos selecionados foi a partir do último fator de impacto *JCR 2022* fornecido pelo *Journal Impact Factor (JIF)*⁵ lançado em junho de 2023. O fator de impacto é calculado dividindo-se o número de vezes que os artigos foram citados nos últimos dois anos pelo número total de publicações nesses dois anos. A Figura 26, demonstra a quantidade de estudos desde o início do planejamento da pesquisa até a análise de conteúdo.

Figura 26 – Triagem dos estudos da pesquisa



Fonte: Autora (2023)

Pode-se observar que o planejamento da RSL começou com mais de 500 estudos que foram reduzidos a 32. Os resultados desta RSL estão apresentados de

⁵ <https://jcr-clarivate.ez46.periodicos.capes.gov.br/jcr/browse-journals>

forma detalhada na seção 4.1 em resultados. O número de estudos em relação aos periódicos é obtido e a revista com maior publicação também. Descrever problemas e deficiências relacionados às próprias tecnologias, podem ser utilizados para pesquisas futuras, bem como levantar a situação atual das soluções tecnológicas para empresas do setor.

3.1.2 Etapa 2: Identificar e analisar os requisitos legais e normativos

Na etapa 2 é identificado o estado da arte no Brasil e no exterior a partir de uma revisão exploratória das regulamentações e normas, que abordam os produtos eletroeletrônicos, categoria em que os ímãs de terras raras estão inseridos.

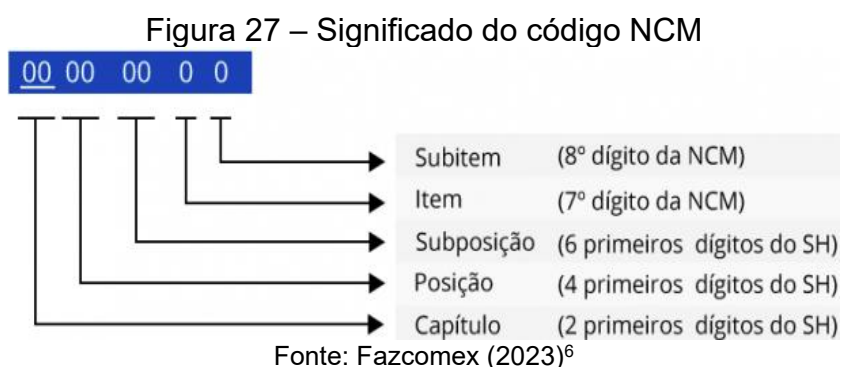
O projeto de pesquisa está alinhado com o processo de normalização da economia circular no âmbito internacional, com foco tanto no prolongamento da vida útil de produtos e materiais pós-consumo, como na recuperação/reciclagem destes materiais pós-consumo por meio da MU. Os níveis de padronização são internacionais (ISO), regional, nacional (ABNT) e corporativo. Assim, especialistas em temas de interesse são convidados a colaborar, por meio de fóruns que abrangem o desenvolvimento de normas e regulamentos técnicos. A participação voluntária caracteriza-se pela motivação dos participantes, mas também pode carecer da diversidade necessária para sustentar conceitos e propostas (Xavier *et al.*, 2023).

A participação nos grupos de trabalho (GT1, GT2 e GT3) com as propostas iniciais de posicionamento brasileiro aos documentos em *ballot* no ISO/TC 323 (ISO/DIS 59004, ISO/DIS 59010 e ISO/DIS 59020), auxiliaram para identificar as normas e instrumentos legais e poder contribuir com trabalho importantíssimo para o país. A entrevista realizada com empresa produtora auxiliou na busca por normas que apliquem ímãs de NdFeB em seus produtos, resultando em um conjunto de dados relevantes para a cadeia de valor e interesse mútuo.

3.1.3 Etapa 3: Analisar comparativamente as soluções tecnológicas com base em critérios de categorização, eficiência e sustentabilidade

A Etapa 3 foi subdividida em duas fases: **a)** identificação dos insumos; e **b)** geração de emissões e infraestrutura das soluções tecnológica.

Para a resolução do problema **a)** buscou-se a entrada de ITR nos últimos 20 anos no Brasil, o volume irá contribuir para construir por meio de inferência uma projeção da disponibilidade de material para reciclagem. O primeiro passo foi identificar a Classificação de Mercadorias, por meio de uma Nomenclatura Comum do Mercosul (NCM) (Figura 27), de forma específica para ímãs.



A NCM⁷ composta de oito dígitos, sendo os primeiros seis dígitos do código usado no Sistema Harmonizado de Descrição e Codificação de Mercadoria, é adotado internacionalmente pela Organização Mundial das Alfândegas (OMA). A referência aos códigos da NCM objetiva garantir a comparabilidade internacional, uma vez que, as nomenclaturas internacionais utilizadas para mensurar a produção industrial vinculam seus códigos aos do Sistema Harmonizado - SH, base da construção da NCM. Portanto, a NCM é um sistema de designação de produto aplicada para monitorar o fluxo de saída de mercadorias, importações e exportações do Brasil e para recolher o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) (IBGE, 2019).

Nesse entendimento, selecionou-se a “Seção XVI - máquinas e aparelhos, material elétrico, e suas partes; aparelhos de gravação ou de reprodução de som, aparelhos de gravação ou de reprodução de imagens e de som em televisão, e suas partes e acessórios” (Portal Siscomex, 2023). Em seguida, selecionou-se o capítulo 8505.1 - Ímãs permanentes e artigos destinados a tornarem-se ímãs permanentes após a magnetização. Dessa forma, foram obtidas e selecionadas as seguintes posições:

- 85051100: Ímãs permanentes e artigos destinados a tornarem-se ímãs permanentes após magnetização → metal;

⁶ <https://www.fazcomex.com.br/ncm/sistema-harmonizado-sh-o-que-e/>

⁷ <https://portalunico.siscomex.gov.br/classif/#!/sumario?perfil=publico>

- 85051910: Ímãs permanentes e artigos destinados a tornarem-se ímãs permanentes após magnetização → ferrita (cerâmicos); e
- 85051990: Outros, incluindo as partes.

A PRODLIST-Indústria é uma base de dados gerenciada pelo IBGE e atualizada visando a incorporação de novos produtos e ajustes em designações existentes, levando-se em conta as atualizações nos códigos da NCM, os resultados da PIA-Produto e as consultas junto às associações de classe empresariais (PIA-PRODUTO/IBGE, 2022). Na PRODLIST-Indústria, existem alguns códigos que possuem em sua descrição o termo “não especificados”. Esses códigos⁸ têm origem preponderante na classificação nacional amplamente usada no sistema estatístico e nos cadastros e registros da administração pública - Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), é derivada da *Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las Actividades Económicas - CIIU (International Standard Industrial Classification of all Economic Activities - ISIC)*.

Esses códigos estão compreendidos, sem, contudo, estarem listados em classes anteriores. Geralmente, a categoria dos “não especificados” reúne o conjunto de produtos cuja produção, individualmente, não possui peso suficiente dentro da classe de atividade econômica para justificar sua identificação com um código de produto específico.

Em seguida foi utilizado o PRODLIST-Indústria⁹, além do uso empresarial para organizar estatísticas dos segmentos em que atuam, também é utilizado por entidades de pesquisa, em estudos e análises que demandam a articulação de informações sobre a produção interna e sobre os fluxos de importação e exportação (IBGE, 2019).

A Lista de Produtos da Indústria - PRODLIST-Indústria adota um sistema de códigos numéricos de oito dígitos, com a seguinte formação:

- Os quatro primeiros dígitos correspondem aos da classe CNAE de predominância;
- O quinto dígito da PRODLIST 2019 indica a correspondência com a CNAE 2.0, da seguinte forma: o algarismo 2 para as mercadorias e o algarismo 9 para os serviços industriais; e

⁸ Pesquisa Industrial, v. 36 n.2, Produto, 2017. Notas técnicas

⁹ A documentação completa da PRODLIST-Indústria pode ser acessada na página sobre classificações estatísticas, disponível no portal do IBGE na Internet, no endereço: <<http://concla.ibge.gov.br>>.

- Os três últimos dígitos são uma sequência numérica para ordenamento alfabético 4 dos produtos no interior de cada classe.

Os produtos são agrupados por similaridade, aqui a cesta de produtos são ímãs permanentes, e optou-se por inserir os três códigos especificados acima para análise dos dados. Assim, significa inferir a identificação do estado que recebeu os materiais. No entanto, não significa que estes materiais ou produtos com ímãs contidos, sejam do estado UF que os recebeu, e sim, do endereço, isto é, o CNPJ responsável pela transação, seja ela importação ou exportação.

A quantidade em toneladas por ano também é obtida. A coleta desses dados foi por meio do portal *ComexStat/MDIC (2023)*¹⁰ com os códigos supracitados. Na opção “downloads” foi acessado o período de consulta entre os anos de 2002 a 2022 para o formato planilha Excel (.xls), após esse processo é possível obter os dados com as respectivas NCM. Assim, o resultado é uma série histórica da quantidade em toneladas/ano de ímãs/artefatos destinados a tornarem-se ímãs em cada estado brasileiro.

Nesse raciocínio, buscou-se consolidar as informações com dados da Pesquisa Industrial Anual do Produto – PIA-Produto, sobre a produção de bens e serviços industriais, em quantidade e valor, dos produtos fabricados nas principais empresas do país. A PIA-Produto está articulada com a Classificação Nacional de Atividades Econômicas - CNAE e com a NCM, possibilitando, assim, a análise da composição da produção industrial brasileira. Está é obtida no portal do IBGE¹¹ (Sidra/IBGE, 2023).

Deve-se ir em “Quadros” e selecionar a classe de atividades industriais de codificação 2790, fabricação de equipamentos e aparelhos elétricos não especificados anteriormente, em seguida ir em dados de 2005 a 2013 – Prodlist-Indústria 2013 e selecionar o número 5806, ao abrir deve-se selecionar na aba variável: número de informações (unidades), quantidade produzida (unidade de medida), valor da produção – percentual do total gerado; na aba Classes das atividades industriais e produtos-Prodlist selecionar a lupa (pesquisa) e digitar a codificação 2790; na aba ano selecionar todos 2005 a 2013. Por fim deve-se ir em “Download” e baixar a tabela 5806. Para a realização do problema **b)** aplicou-se o entendimento relacionado ao fluxo de matéria e energia, por meio da análise de conteúdo da RSL apresentada na

¹⁰ <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>

¹¹ <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pia-produto/quadros/brasil/2020>

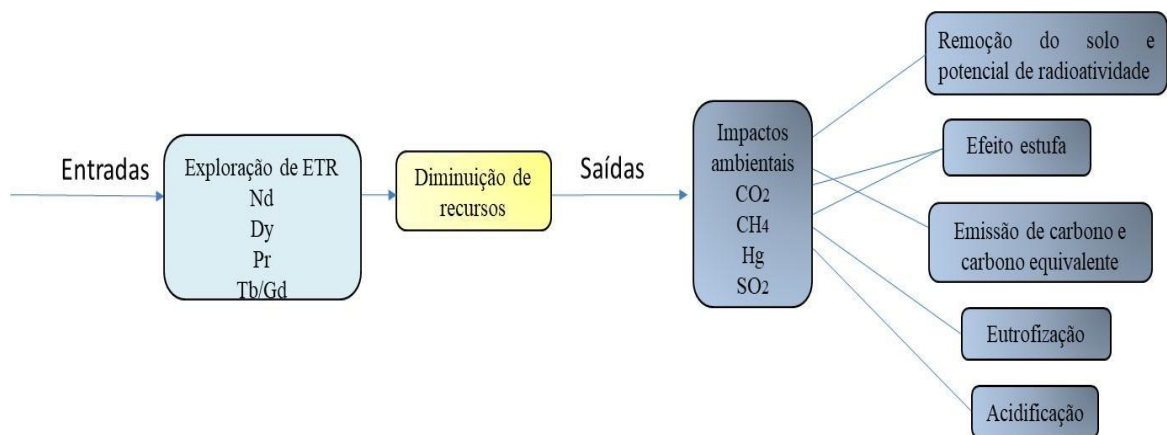
Etapa 1 item b. Logo, é de extrema utilidade o conhecido e o efeito que ele pode causar ao meio ambiente.

Reiterando que os dados levantados são obtidos dos estudos de recuperação de material secundário a partir de ímãs de NdFeB sob consequência da saúde humana, da qualidade do meio ambiente e da disponibilidade de materiais. Dessa forma, foram realizados os seguintes procedimentos:

- Identificação das categorias de impactos (critérios) como: esgotamento de recursos, impactos sobre a saúde humana e impactos ecológicos;
- Classificação das categorias de impactos.

A seguir é exibida a Figura 28 que apresenta um exemplo de como foram identificadas as categorias desse estudo.

Figura 28 – Associação dos resultados identificados com às categorias de impactos



Fonte: Autora (2021)

Nesta etapa algumas substâncias NO_x, CO, COV, hidrocarbonetos (aldeídos, compostos aromáticos, cetonas, álcoois, éteres, alcanos, ésteres, etc.) podem estar envolvidas, entre outras.

A análise é associar as substâncias identificadas nas soluções tecnológicas com a categoria de impacto. Com base no modelo de caracterização do *IPCC Panel Intergovernamental* sobre Mudança Climática, a fim de ter acompanhamento futuro já que estes números estão em constante ajuste. O IPCC (2023) é o grupo de cientistas estabelecido pelas Nações Unidas para monitorar e assessorar toda a ciência global relacionada às mudanças climáticas.

Para categorias de impacto relacionadas a recursos (uso de recursos, mineral, fóssil, uso de terra e água), se houver será utilizado o método *IMPACT World+* são

todos consistentemente construídos com base em uma abordagem de extração-consumo-competição-adaptação.

Assim, a partir da análise é possível obter os dados e descrevê-los de acordo com autor e processo, identificando as categorias de impacto presentes na literatura. Essa análise dá subsídios para a próxima etapa, evidenciando quais das soluções tecnológicas, apresentam menos desempenho relativo ao impacto ambiental a fim de acompanhamento futuro.

3.1.4 Etapa 4. Comparar o nível de maturidade das soluções tecnológicas na obtenção dos materiais secundários em escala laboratorial e industrial

Para a resolução da Etapa 4, é realizada uma abordagem indutiva da RSL, esta metodologia foi aplicada por Saunders, Lewis e Thornhill (2009) para levar em consideração a necessidade de organizar os dados no contexto relevante.

Diante disso, estruturas de nível de prontidão técnica são usadas como escalas de avaliação para as tecnologias. Assim, é de extrema importância saber qual das soluções tecnológicas estão maduras para gerenciamento de material secundário, oriundos de produtos pós-consumo.

O método de maturidade tecnológica e ou dos processos TRL/MRL (do inglês, *Technology Readiness Levels and Manufacturing Readiness Levels*) é utilizado para avaliar tecnicamente uma tecnologia e enquadrá-la em Níveis de Maturidade Tecnológica de um produto, ao passo que MRL (*Manufacturing Readiness Levels*) são usualmente empregados para designar os níveis de maturidade de um processo (Capdeville *et al.*, 2017).

A escala TRL/MRL é amplamente utilizada por instituições de pesquisa e desenvolvimento tecnológico em todo o mundo (Rybicka; Tiwari; Leeke, 2016). Assim, o TRL/MRL pode ser adaptado para auxiliar na compreensão das capacidades e recursos necessários para o desenvolvimento tecnológico em várias etapas (Corrêa *et al.*, 2022). Os níveis de maturidade tecnológica estão presentes na Tabela 8.

Tabela 8 – Definição dos níveis de maturidade tecnológica

Nível	Indicador	Descrição
1	TRL	Princípios básicos observados e reportados.
	MRL	Princípios básicos observados e reportados.
2	TRL	Concepção tecnológica e/ou aplicação formulada.
	MRL	Conceito de manufatura definido.
3	TRL	Prova de conceitos das funções críticas de forma analítica ou experimental.
	MRL	Processo de manufatura demonstrado (fazer funcionar).
4	TRL	Validação em ambiente de laboratório de componentes ou arranjos experimentais básicos de laboratório.
	MRL	(fazer funcionar apropriadamente).
5	TRL	Validação em ambiente relevante de componentes ou arranjos experimentais com configurações físicas finais.
	MRL	Capacidade de produzir protótipo do componente do produto em ambiente relevante de produção.
6	TRL	Modelo do sistema/subsistema protótipo de demonstrador em ambiente relevante.
	MRL	Capacidade de produzir o produto ou seus subconjuntos em ambiente relevante de produção. A tecnologia está em fase de testes sem alcançar a escala final.
7	TRL	Protótipo do demonstrador do sistema em ambiente operacional.
	MRL	Capacidade de produzir o produto ou seus subconjuntos em ambiente representativo de produção. A tecnologia está em comissionamento inativo. Isto pode incluir testes operacionais e testes de fabricação, mas é testado usando modelos/simuladores inativos compatíveis com o produto final
8	TRL	Sistema totalmente completo, testado, qualificado e demonstrado.
	MRL	Implementação da produção e minimização dos custos. Tecnologia em comissionamento ativo.
9	TRL	O sistema já foi operado em todas as condições, extensão e alcance.
	MRL	Uso do produto em todo seu alcance e quantidade. Produção estabelecida.

Fonte: Capdeville *et al.* (2017)

Essa abordagem permite que as organizações avaliem de forma sistemática o estágio de maturidade de suas tecnologias, facilitando a identificação de lacunas e oportunidades de melhoria. À medida que as inovações progridem através das diferentes fases, desde a pesquisa básica até a implementação comercial, o uso do TRL/MRL fornece um marco claro que orienta decisões estratégicas e investimentos. Além disso, essa escala pode ser utilizada para promover colaborações entre instituições acadêmicas, indústrias e governos, estabelecendo um diálogo mais eficiente sobre necessidades e expectativas em relação ao desenvolvimento tecnológico. Dessa forma, ter o nível de maturidade identificado, facilita a compreensão e validação das soluções tecnológicas.

3.1.5 Etapa 5: Analisar a viabilidade de recuperar material secundário considerando diferentes estágios da cadeia de valor de ITR e respectivos atores

A transição efetiva rumo a EC refere-se às organizações estarem cientes, quanto aos fatores internos e externos limitantes. Isso porque existem pessoas que as apoiam, meios e auxílios eficazes para superá-los (Agyemang *et al.*, 2019). Portanto, há necessidade de interações profundas entre os diferentes atores da cadeia para implementar estratégias circulares (Galvão *et al.*, 2020). Dessa forma, a coleta de dados da pesquisa utilizará a técnica de entrevistas semiestruturadas e os resultados serão analisados conforme a teoria desenvolvida por Bardin (2004, 2010, 2011), por meio de um roteiro de entrevista e análise de conteúdo para pesquisas qualitativas.

Na Etapa 5 foi estruturada toda uma comunicação passando por aprovação no Comitê de Ética sob o **Número do CAAE: 71710323.0.0000.0121**, apresentado no Apêndice C. Assim, a presente pesquisa foi classificada como aplicada, quanto à natureza. Quanto à abordagem, este trabalho está classificado como qualitativo.

A escolha da empresa produtora que utiliza ímãs de NdFeB em seus produtos, foi por meio de uma visita técnica informal que ocorreu no dia 7 de novembro de 2022. Esta empresa é localizada no Brasil. Tendo por objetivo a averiguação *in loco* dos processos que utilizam ímãs de NdFeB. Tal atividade justifica-se pela necessidade de compilar informações essenciais para o desenvolvimento da pesquisa, que visa estudar as possibilidades de implementação de estratégias da EC na cadeia nacional de ímãs de terras raras.

Primeiramente, foi realizada uma reunião para esclarecimento das pesquisas em vigor, discutindo a importância das estratégias circulares para a gestão dos ímãs.

Estavam presentes: uma aluna de doutorado da UFSC, dois professores que trabalham diretamente com ímãs na universidade e todos os responsáveis envolvidos com o tema na Empresa A.

Neste momento, apresentei a tese em estudo com os objetivos gerais e específicos, bem como a importância da recuperação de material a partir de ímãs pós-consumo tem sido alvo estratégico de empresas globais, que buscam garantir o fornecimento de materiais. Assim, evidenciamos a importância estratégica da recuperação/reciclagem dos ímãs de NdFeB com o intuito de despertar o interesse da

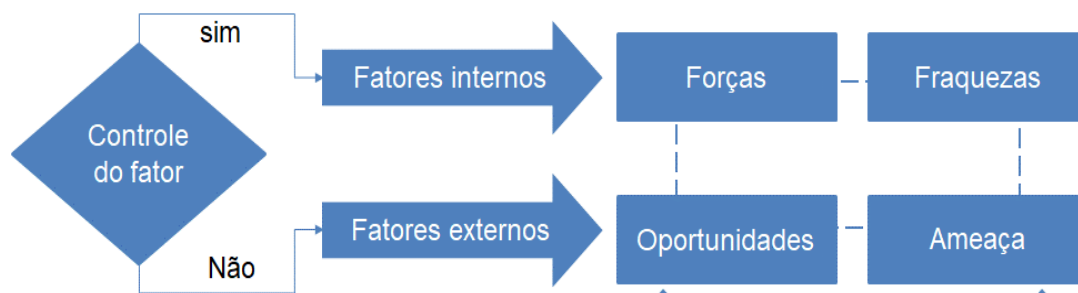
Empresa para a MU de produtos pós-consumo, em seus produtos que consomem os ímãs mencionados. Ainda, foram colocados em pauta os desdobramentos desta pesquisa:

- Roteiro de entrevista para empresa produtora em estudo denominada, Empresa A produtora (houve uma visita técnica para conhecer a fábrica e acoplamento dos ímãs de NdFeB em seus produtos). A partir dessa visita verificou-se a necessidade de envolvimento dos atores da cadeia de reciclagem de eletroeletrônicos no Brasil.
- Roteiro de entrevista para empresas recicladoras denominadas, Empresa B, Empresa C, e LabfabITR (na condição de reciclador/produtor). A escolha das empresas na área de reciclagem pode considerar ações do sistema para a recuperação de valor no setor de gestão de resíduos eletroeletrônicos, possibilitando a mineração urbana dos ímãs de equipamentos maiores como motores e aerogeradores. Nesta etapa também foi selecionada uma empresa recicladora internacional denominada, Empresa D, que coleta ímãs de produtos pós-consumo através da mineração urbana aqui no Brasil.

Para tanto, essa pesquisa utilizará das informações do roteiro de entrevista e a técnica de análise de conteúdo em pesquisas qualitativas, sob a teoria desenvolvida por Bardin (2011), combinada com a Análise *SWOT* (*Strengths, Weaknesses, Opportunities e Threats*, respectivamente: Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças) (Dantas; Melo, 2008), dividiu-se em (i) ambiente interno, onde as forças e as fraquezas referem-se à técnica propriamente dita, e (ii) ambiente externo, onde as oportunidades e ameaças referem-se à aplicação da técnica (levando em consideração a equipe de projeto, o espaço e o usuário/participante). A técnica se refere ao uso de soluções tecnológicas em seus processos.

Nesta fase o conjunto de soluções tecnológicas para recuperação de material secundário a partir de ímãs de NdFeB, bem como abordar fluxos reversos e diretos para o potencial de aplicação foi explanado aos participantes. Assim, os mesmos têm a liberdade para apresentar seu ponto de vista. Conforme a Figura 29 a seguir:

Figura 29 – Esquema representativo para a aplicação da matriz SWOT



Fonte: Autora (2023)

Contextualizando o uso da Análise *SWOT*, após sua aplicação, as características apontadas serão valoradas em relação a sua importância e magnitude.

As soluções tecnológicas com maior potencial serão selecionadas, observando-se a possibilidade de inserção em uma ou mais empresas recicladoras, bem como análise para planejamento, projeto e implementação, e verificando-se as questões de complementaridade e/ou exclusão das mesmas, para aplicação de uma planta de reciclagem/recuperação dos produtos pós-consumo no Brasil. Podendo-se inferir questões como ponto de coleta dos resíduos. Como resultado, um fluxo de EC dos ITR também será realizado a partir dessas entrevistas. Abaixo segue o instrumento de pesquisa:

- i. Elaboração de roteiro de entrevista (Apêndice A e B);
- ii. Aplicações *online* (Conferência Web, WhatsApp e e-mail);

Visita técnica à empresa produtora que utiliza os ímãs em seus produtos e ao LabFabITR que produzirá os ímãs de NdFeB.

As empresas selecionadas para a entrevista gerenciam resíduos eletroeletrônicos no setor de reciclagem no Brasil, incluindo uma empresa estrangeira que minera ITR pós-consumo nacional. Engenheiros estrangeiros foram entrevistados por videoconferência usando a técnica *snowball*, juntamente com o Diretor e dois Gerentes da primeira fábrica de ITR do Brasil, empregados da CODEMGE. Os participantes do estudo deveriam atender aos seguintes critérios: i) ter mais de 18 anos; ii) atuar (ou ter atuado) como engenheiro por mais de 2 anos; e, iii) participar voluntariamente. Os resultados desta pesquisa serão apresentados com mais detalhes na seção 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo está organizado da seguinte forma: i) fluxograma esquemático da cadeia de ímãs de NdFeB com respectivas soluções tecnológicas; ii) conjunto de instrumentos legais e normativos; iii) identificação dos insumos para projeções futuras sobre o fluxo de materiais, emissões e infraestrutura das soluções tecnológicas; iv) alocação das soluções tecnológicas para recuperação de material secundário com diferentes níveis de maturidade; e v) fluxograma *SWOT* da visão circular da cadeia de ITR, acompanhado de fotos da exportação de material secundário. Assim, são apresentados os resultados obtidos, que incluem coleta de dados da literatura, estudos de campo, incluindo uma pré análise do processo de reciclagem laboratorial e validação com os atores da cadeia de ITR.

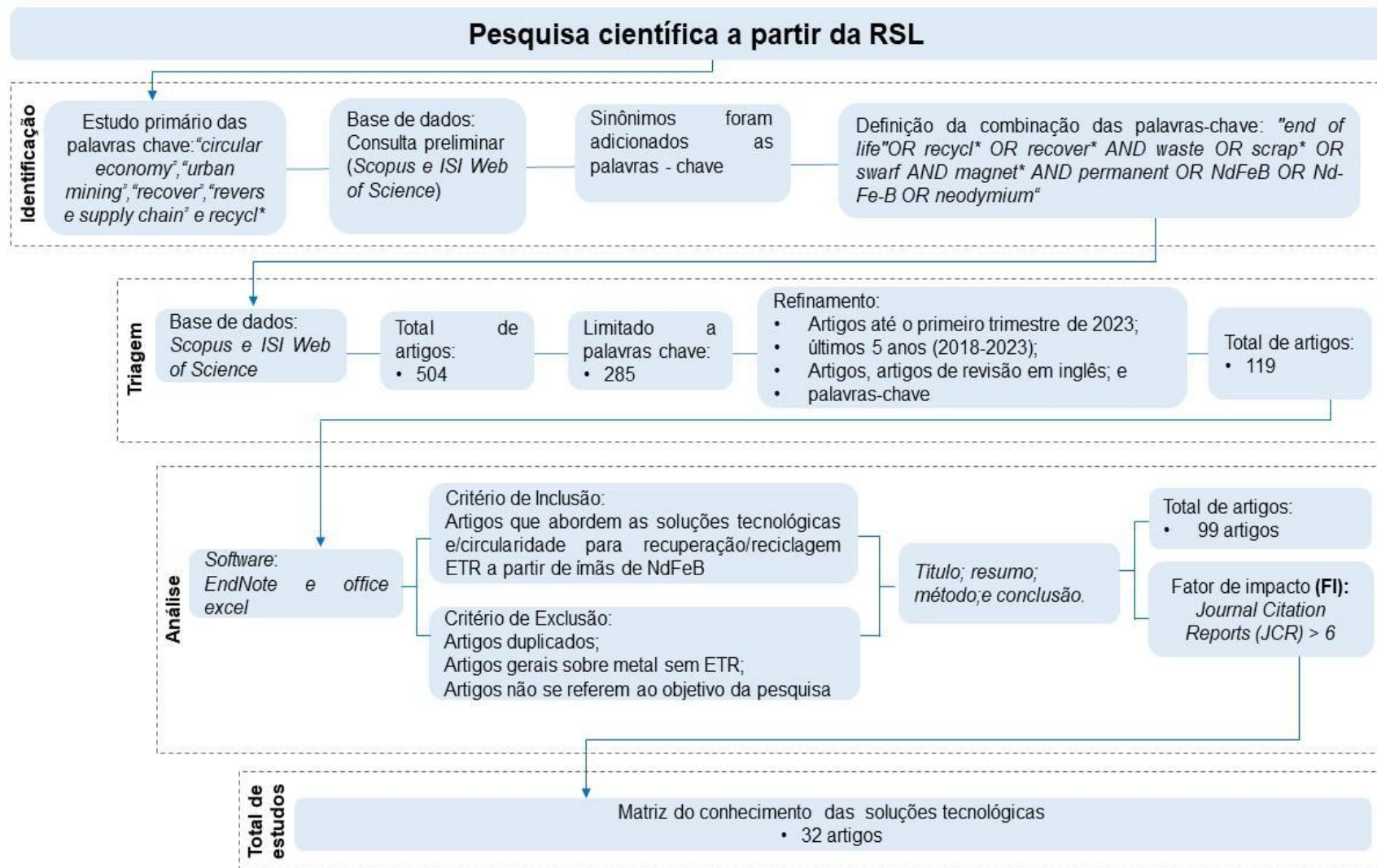
4.1 IDENTIFICAÇÃO DA CADEIA DE ÍMÃS DE NDFEB E RESPECTIVAS SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS

Esta seção tem como objetivo projetar os resultados através da RSL, para identificação das soluções tecnológicas existentes. Para tanto, procedeu-se a extração de dados da literatura inicialmente com um total de 504 artigos, após foi seguido o protocolo para triagem e análise, conforme apresentado na Figura 30, para registrar com precisão as informações coletadas.

Na sequência, o *software Vosviewer*® foi utilizado para validação da chave de busca, estabelecendo conexões entre as palavras chave, autores e os países de publicação. Dessa forma, pode-se ter uma visão macro da realização da RSL, bem como do Fator de Impacto (FI) de corte maior que 6 das revistas científicas, identificado a qualidade dos artigos selecionados a partir dos dados obtidos pelo *Journal Impact Factor*. Assim, resultando na matriz do conhecimento das soluções tecnológicas com um total de 32 documentos identificados no estudo.

Após seleção dos estudos, estes foram categorizados conforme o Fator de Impacto referente ao ano base de 2022. A Tabela 9 apresenta a qualidade assegurada dos estudos com uma matriz do conhecimento.

Figura 30 – Protocolo seguido no estudo de RSL



Fonte: Autora (2023)

Tabela 9 – Matriz do conhecimento dos artigos selecionados a partir da RSL

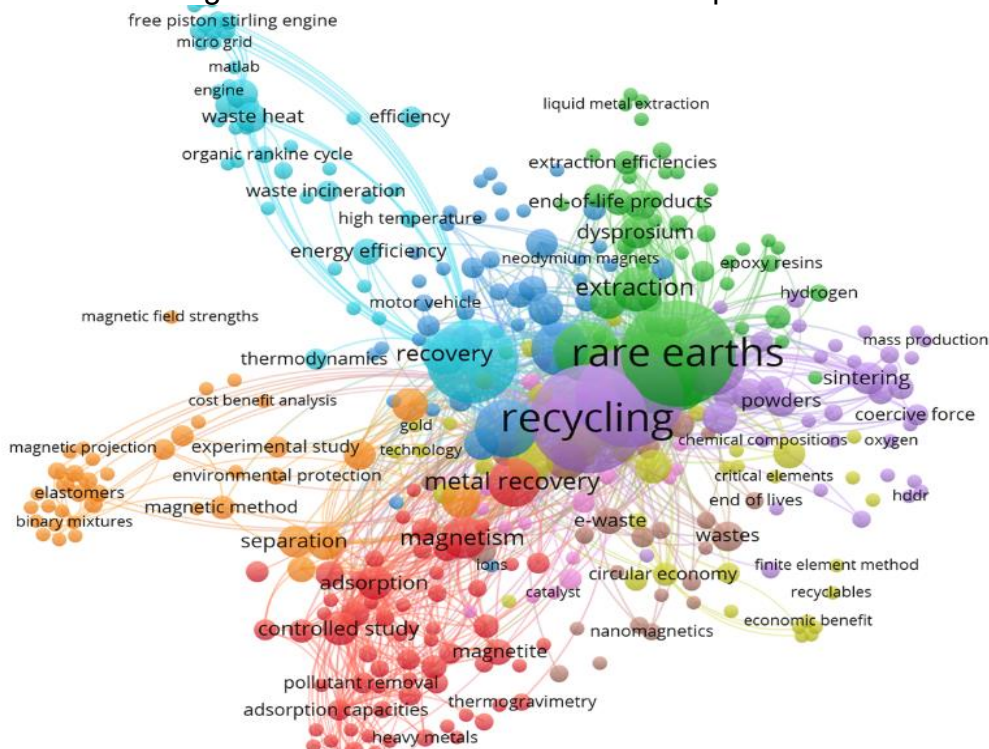
(continuação)				
Número	Título	Autor	Ano	Fator de Impacto (2022)
1	Recovery of rare earth elements from permanent magnet scraps by pyrometallurgical process	Bian, Y. Y. et al.	2022	8.8
2	Microbe Encapsulation for Selective Rare-Earth Recovery from Electronic Waste Leachates	Brewer, A. et al.	2019	11.4
3	Repurposing of nickeliferous pyrrhotite from mine tailings as magnetic adsorbent for the recovery of gold from chloride solution	Calderon, A. R. M. et al.	2020	13.2
4	Sustainable Recycling of Rare-Earth Elements from NdFeB Magnet Swarf: Techno-Economic and Environmental Perspectives	Chowdhury, N. A. et al.	2021	8.4
5	Recovering the “new twin”: Analysis of secondary neodymium sources and recycling potentials in Europe	Ciacchi, L. et al.	2019	13.2
6	Recycling of additively printed rare-earth bonded magnets	Gandha, K. et al.	2019	8.1
7	Recovery of rare earth elements from electronic waste by diffusion dialysis	Hammache, Z. et al.	2021	8.6
8	Highly Efficient and Precise Electrolysis Separation of Dysprosium from Neodymium for Magnet Scrap Recycling in Molten Salt	Hua, H. et al.	2022	8.4
9	The sintering mechanism of fully dense and highly coercive Nd-Fe-B magnets from the recycled HDDR powders reprocessed by spark plasma sintering	Ikram, A. et al.	2019	6.2
10	Environmentally sound technology development for processing of rare earth elements from waste permanent magnets synthetic leach solutions: recovery and separation perspectives	Jeon, J. H. et al.	2021	8.6
11	Life cycle assessment of emerging technologies on value recovery from hard disk drives	Jin, H. et al.	2020	13.2
12	The extraction of NdFeB magnets from automotive scrap rotors using hydrogen	Jönsson, C. et al.	2020	11.1
13	Hydrometallurgical recovery of neodymium from spent hard disk magnets: A life cycle perspective	Karal, E. et al.	2021	11.1
14	A comprehensive review on recycling of critical raw materials from spent neodymium iron boron (NdFeB) magnet	Kumari, A. and Sahu, S. K.	2023	8.6
15	Reforming Magnet Waste to Prussian Blue for Sustainable Sodium-Ion Batteries	Li, Q. Y. et al.	2022	9.5

				(Conclusão)
16	Implementation and analysis of remanufacturing large-scale asynchronous motor to permanent magnet motor under circular economy conditions	Li, Z. et al.	2021	11.1
17	One-step recovery of REE oxalates in electro-leaching of spent NdFeB magnets	Makarova, I. et al.	2020	8.6
18	Critical material content in modern conventional U.S. vehicle electronics	Nguyen, R. T. et al.	2020	8.1
19	Selective and fast recovery of rare earth elements from industrial wastewater by porous β -cyclodextrin and magnetic β -cyclodextrin polymers	Nkinahamira, F. et al.	2020	12.8
20	Recycling and substitution of light rare earth elements, cerium, lanthanum, neodymium, and praseodymium from end-of-life applications - A review	Omodara, L. et al.	2019	11.1
21	Neodymium recovery from NdFeB magnet wastes using Primene 81R·Cyanex 572 IL by solvent extraction	Pavón, S. et al.	2018	8.7
22	Forecasting the recycling potential based on waste analysis: A case study for recycling Nd-Fe-B magnets from hard disk drives	Peeters, J. R. et al.	2018	11.1
23	Magnetic and structural properties of multiple recycled and sustainable sintered Nd-Fe-B magnets	Schönfeldt, M. et al.	2023	6.2
24	A new strategy of thin oil film extraction for enhanced recovery and separation of praseodymium and neodymium	Sui, N. et al.	2022	7.7
25	Towards neodymium recycling: Analysis of the availability and recyclability of European waste flows	Van Nielen, S. S. et al.	2023	11.1
26	Nanoengineering cellulose for the selective removal of neodymium: Towards sustainable rare earth element recovery	Wamea, P. et al.	2022	15.1
27	Selective extraction of Nd(III) by novel carboxylic acid based ionic liquids without diluent from waste NdFeB magnets	Xue, W. et al.	2022	6.0
28	NdFeB magnet recycling: Dysprosium recovery by non-dispersive solvent extraction employing hollow fibre membrane contactor	Yadav, K. K. et al.	2018	8.6
29	Recovery of rare-earth element from rare-earth permanent magnet waste by electro-refining in molten fluorides	Yang, Y. et al.	2020	8.6
30	Dynamic neodymium stocks and flows analysis in China	Yao, T. et al.	2021	13.2
31	Aerionmetallurgical Extraction of Rare Earth Elements from a NdFeB Magnet Utilizing Supercritical Fluids	Zhang, J. et al.	2018	8.4
32	Synthesis of hard magnetic NdFeB composite particles by recycling the waste using microwave assisted auto-combustion and reduction method	Zhou, X. et al.	2019	8.1

Fonte: Autora (2023)

Os 32 estudos obtidos por meio da RSL foram encontrados para responder às perguntas iniciais da pesquisa. Apesar disso, nem todos os estudos foram capazes de responder de forma simultânea a todas as perguntas da pesquisa. Assim, é importante ressaltar que além do fator de impacto, a análise das palavras chave foi realizada para qualificar a pesquisa, conforme a Figura 31.

Figura 31 – Análise realizada com as palavras chave

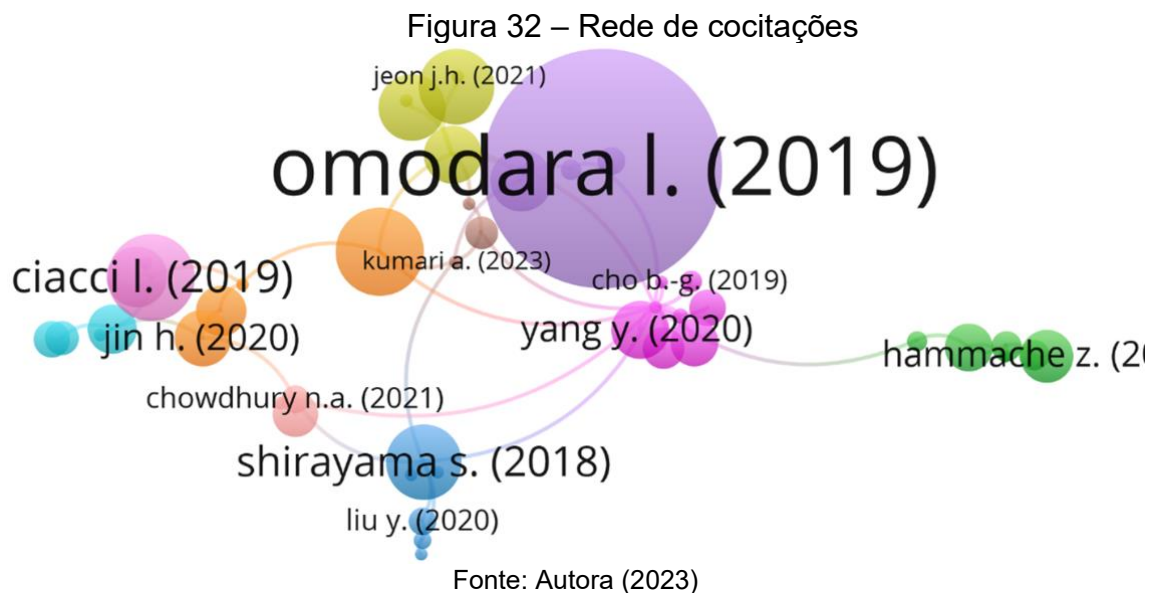


Fonte: Autora (2023)

Na análise realizada, infere-se que as publicações a respeito da recuperação de ETR a partir dos ímãs de NdFeB vêm ganhando destaque pelo mundo, a temática apresentada aqui explora os *clusters* formados. Basicamente temos três *clusters* indicados por grupos de cores. Pode-se observar (Figura 31) que a diversidade do tema destaca dois termos "*rare earths*" na cor verde e "*recycling*" na cor roxa, com maior incidência. Os termos "*recovery*" na cor azul e "*metal recovery*" na cor vermelha estão distribuídos aleatoriamente, porém possuem um número menor de termos relacionados. A partir da análise de cores pode-se inferir que a *string* de busca utilizada na pesquisa é confiável, diante das palavras-chave com maior intensidade.

A partir dos dados coletados da RSL também foi analisada a rede de citações, representada na Figura 32. Esta análise ilustra as referências mais citadas

pelos autores na rede dos artigos analisados. Um total de 11 referências foram identificadas, gerando outras ramificações, separadas por *clusters*.



Assim, considerando que a data de corte para a análise foi o ano de 2018, observa-se na (Figura 32) o artigo com maior incidência representado na cor roxa Omodara et al. (2019), por ser um artigo com FI (11.1) e com alto número (150) de citações na base de dados *Scopus*. Porém ao longo do tempo, a análise para essa rede de cocitações pode sofrer alterações.

Nesse contexto, ressalvo que “os estudos de citação são importantes ferramentas para o entendimento dos processos de comunicação científica” (Vanz; Caregnato, 2003, p. 255). Pode-se inferir também que a representação do nome da autora nessa rede com maior incidência significa maior similaridade entre os citados. Portanto, essas análises podem identificar a similaridade entre a produção que citou os demais autores citados.

A Tabela 10 apresenta os resultados da análise dos artigos publicados por ano da matriz de conhecimento. Pode-se observar que há um aumento no número de artigos ao longo dos anos. Podemos inferir aqui que o avanço da indústria de alta tecnologia, fez crescer também a produção acadêmica, dada a necessidade do conhecimento nas soluções tecnológicas para fabricação de ímãs, bem como obtenção de material secundário advindo pós-consumo para reciclagem dos mesmos.

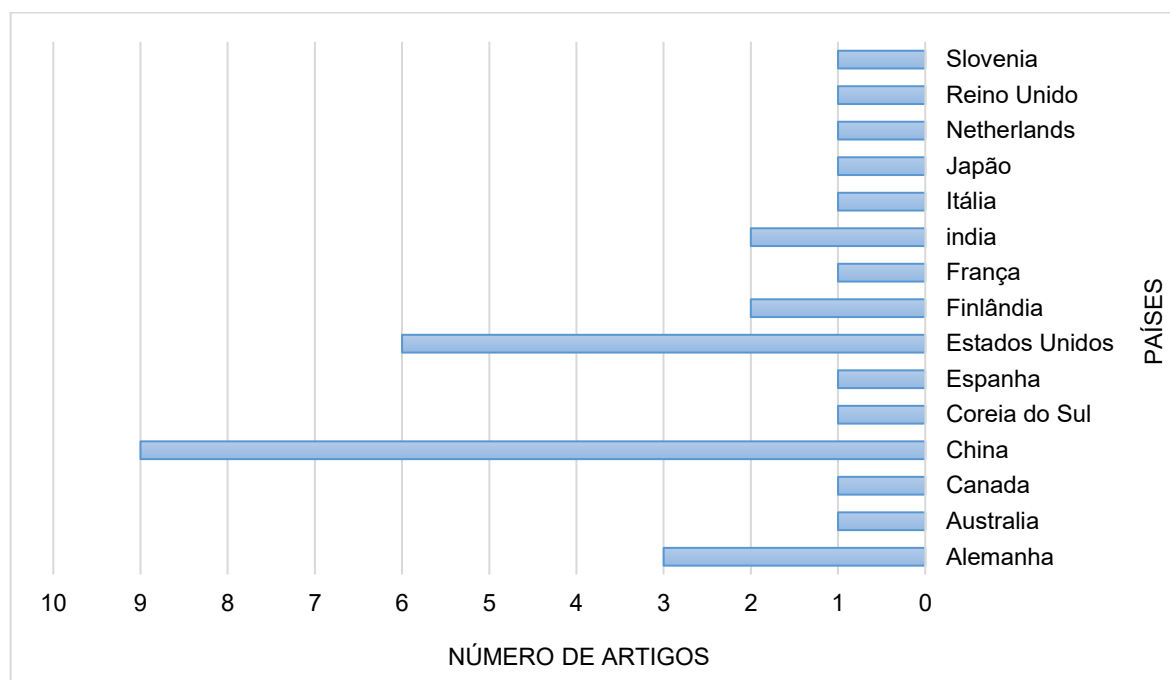
Tabela 10 – Quantidade de artigos publicados por ano

Autor	Nº artigos	Ano de publicação
Pavón, S. et al. Peeters, J. R. et al. Yadav, K. K. et al. Zhang, J. et al.	4	2018
Brewer, A. et al. Ciacci, L. et al. Gandha, K. et al. Ikram, A. et al. Omodara, L. et al. Zhou, X. et al.	6	2019
Calderon, A. R. M. et al. Jin, H. et al. Jönsson, C. et al. Makarova, I. et al. Nguyen, R. T. et al. Nkinahamira, F. et al. Yang, Y. et al.	7	2020
Chowdhury, N. A. et al. Hammache, Z. et al. Jeon, J. H. et al. Karal, E. et al. Li, Z. et al. Yao, T. et al.	6	2021
Bian, Y. Y. et al. Hua, H. et al. Li, Q. Y. et al. Sui, N. et al. Wamea, P. et al. Xue, W. et al.	6	2022
Kumari, A. and Sahu, S. K. Schönfeldt, M. et al. Van Nielen, S. S. et al.	3	2023

Fonte: Autora (2023)

Diante dos resultados dos países que mais publicam sobre a temática da pesquisa representado na Figura 33, encontramos a China em disparada, seguido dos Estados Unidos e Alemanha. Dessa forma, pode-se observar que a China se baseia fortemente na utilização de ETR, uma vez que em suas aplicações principais estão as energias limpas. Sendo assim, na próxima década, a demanda por ETR, principalmente Nd, Dy, La, Pr e Ce será crescente (Li *et al.*, 2019).

Figura 33 – Número de artigos publicados por país



Fonte: Autora (2023)

Essas questões desencadearam uma preocupação global relacionada à cadeia de suprimento de ITR uma vez que pode haver escassez de matérias primas (Dushyantha *et al.*, 2020). Estima-se que no mundo, a demanda anual por Nd excederá a produção até 2030 (Castilloux, 2019).

Diante dos fatos, nos últimos anos, o aumento de estudos sobre reciclagem de Nd reflete a importância do tema e o investimento no desenvolvimento de novas soluções tecnológicas, viáveis para recuperação de matérias primas críticas como é o caso do Nd. A análise do conteúdo explicitando as soluções tecnológicas para recuperação serão apresentadas na seção a seguir.

4.2 ANÁLISE DE CONTEÚDO DA RSL

A análise anual dos artigos selecionados indica que a recuperação de material secundário é um tema emergente, com estudos de 2020 até o terceiro trimestre de 2023 representando cerca de 68% da matriz dos artigos selecionados na RSL. Essa recuperação está relacionada principalmente aos ímãs de NdFeB usados em eletroeletrônicos, como discos rígidos (HDD). Após a análise de conteúdo, identificou-se que a mineração urbana foi abordada em sete diferentes tópicos: a) soluções tecnológicas convencionais para recuperar recurso secundário pós e pré-consumo; b)

abordagens químicas; c) abordagens elétricas; d) abordagens físicas e térmicas; e) abordagens biológicas; f) resíduos industriais, e g) gestão de recurso secundário pós-consumo. Essa análise pode ser melhor entendida na próxima seção.

4.3 SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS CONVENCIONAIS PARA RECUPERAR RECURSO SECUNDÁRIO PÓS E PRÉ-CONSUMO

O processo de reutilização direta é evidenciado em dois trabalhos (Jin *et al.*, 2020; Kumari; Sahu, 2023). Esta opção é considerada mais atraente ecológica e economicamente por reutilizar o ímã diretamente, limitada aos casos em que a composição desejada do novo ímã seja igual ao ímã pós-consumo disponível (Zhang *et al.*, 2018). No entanto, esta opção só é possível em ímãs grandes e de fácil acesso, como os utilizados em turbinas eólicas e veículos híbridos e elétricos - tecnologias que possuem ciclo de vida longo e, portanto, os estoques de ímãs ficam inacessíveis por um período considerável de tempo (Zang *et al.*, 2018; Kumari; Sahu, 2023).

Por sua vez, a recuperação do material secundário é possível por duas alternativas:

(1) reciclagem direta do ímã NdFeB, em que um ímã “resíduo maciço” pós-consumo é transformado em outro ímã de NdFeB ou (2) extração das terras raras a partir do ímã de NdFeB pós-consumo ou pré-consumo, pelo qual os ETR são extraídos e podem ser direcionados a outras finalidades.

Para a reciclagem direta do ímã, a abordagem de Decaptação de Hidrogênio (HD) foi evidenciada em dois artigos (Jönsson *et al.*, 2020; Schönfeldt *et al.*, 2023). O processo HD permite converter o ímã pós-consumo em grânulos ou pó. Este processo consiste em dois estágios: no primeiro o hidrogênio é absorvido pela fase de contorno do grão rico em Nd e no segundo pela fase matriz de Nd₂Fe₁₄B. Segundo Schönfeldt *et al.* (2023), esta técnica é vantajosa porque o processo HD não danifica a microestrutura texturizada inerente ao ímã. No entanto, essa solução tecnológica tem limitações quanto ao uso de ímãs oxidados e material triturado com alta contaminação (Jönsson *et al.*, 2020; Schönfeldt *et al.*, 2023). Ikram *et al.* (2019) apresentam outra solução tecnológica como a mais adequada para revitalizar os ímãs pós-consumo de NdFeB. Os autores consideraram a reciclagem direta de ímãs em quatro etapas: hidrogenação-desproporção-dessorção-recombinação (HDDR). Na hidrogenação os

ímãs de NdFeB são expostos ao hidrogênio, que se difunde na liga e provoca a formação de fases hidretadas.

Na desproporção os ímãs são aquecidos a uma temperatura em torno de 800°C, que faz com que as fases hidretadas se decomponham em fases elementares (Nd, Fe e B) e em fases intermetálicas (NdH₂ e Nd₂Fe₁₄B). Na dessorção, os ímãs desproporcionados são aquecidos a 1000°C, que faz com que o hidrogênio seja liberado da liga e saia do sistema. Por fim, na recombinação, os ímãs dessorvidos são resfriados a uma taxa controlada, que faz com que as fases elementares e intermetálicas se recombinem em nova fase de Nd₂Fe₁₄B, como uma estrutura cristalina diferente da original. A vantagem é obter pós anisotrópicos, com excelentes propriedades magnéticas, que podem ser usados para fabricar novos ímãs sinterizados (Ikram et al., 2019).

Gandha *et al.* (2019) apresentam a remanufatura aditiva como alternativa sustentável e econômica para aproveitar os ímãs NdFeB sinterizados que seriam descartados ou substituídos. Após passar pela etapa de HDDR, o pó magnético é misturado com um ligante polimérico para formar um compósito homogêneo. A proporção entre o pó e o ligante pode variar de acordo com o desempenho desejado.

Conforme os autores, o compósito é usado como material de impressão em uma impressora 3D que deposita camadas sucessivas do compósito sobre uma base, seguindo um modelo digital. Deste modo, é possível obter ímãs compósitos com diferentes formas e tamanhos. Além disso, a impressão 3D permite uma maior liberdade de design e personalização dos ímãs compósitos.

Para o processo de extração das terras raras a partir de ímãs de NdFeB, quatro artigos discutiram a recuperação de terras raras sob a ótica das soluções tecnológicas convencionais, como os processos hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos, e a combinação das técnicas (Omodara *et al.*, 2019; Karal *et al.*, 2021; Bian *et al.*, 2022; Kumari; Sahu, 2023). A solução tecnológica hidrometalúrgica para recuperar o elemento Nd foi abordada por Karal *et al.* (2021), indicando que o método consiste em pré-tratamento, lixiviação química (abordada no item 3.1.1 e 3.1.2) e precipitação de metal Nd. Verificou-se que, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, a produção de ímãs a partir de Nd recuperado teve um desempenho das propriedades magnéticas melhor do que a produção de ímãs virgens.

Os impactos ambientais do sistema de produção de ímãs NdFeB reduziram em até 65%, e os custos de produção também reduziram em 46,54% (KARAL *et al.*,

2021). Em geral, a hidrometalurgia é considerada um método preciso, altamente flexível e de fácil controle ao extrair o metal, bem como possibilita a alta pureza do produto, mesmo com provável presença de contaminantes.

Como desvantagem, cita-se a geração de grandes quantidades de águas residuais (Omodara *et al.*, 2019; Karal *et al.*, 2021). As soluções pirometalúrgicas concentram o metal de interesse através de reações envolvendo elevadas temperaturas. A capacidade de operação em grande escala é uma das vantagens desse processo, assim como, não há necessidade de um pré-tratamento dos resíduos, como ocorre em outros processos metalúrgicos (Bian *et al.*, 2022).

Geralmente, o processo pirometalúrgico é aplicável a todos os tipos de composições magnéticas, sem geração de águas residuais e menos etapas de processamento do que métodos hidrometalúrgicos. A fusão direta permite a obtenção de ligas principais e a extração de metal líquido permite a obtenção de ETR em estado metálico (Kumari; Sahu, 2023; Bian *et al.*, 2022; Omodara *et al.*, 2019). Como desvantagens desse processo, tem-se a necessidade de maior entrada de energia e a fundição direta e extração de metal líquido não é aplicada aos ímãs oxidados (Omodara *et al.*, 2019).

Conforme Zhang *et al.* (2018), a tecnologia inovadora “aeriometalurgia”, conhecida como extração de fluido supercrítico, é uma alternativa viável ao processo de pirometalurgia e hidrometalurgia para recuperar Nd, Pr e Dy, de ímãs Nd-Fe-B pós-consumo. Os autores indicaram que o processamento de 30kg de ímãs por hora atingiu uma pureza de 99% em peso e menos de 0,1% em peso de contaminação de metal. O processo utiliza CO₂ supercrítico como solvente, o qual é seguro, inerte e abundante, junto com o agente quelante tributil-fosfato-ácido nítrico (TBP-HNO₃) e 2% em peso de metanol como co-solvente.

4.3.1 Abordagem por métodos químicos

Um total de três artigos apresentaram a extração por solvente como solução tecnológica (Pavón *et al.*, 2018; Yadav *et al.*, 2018; Jeon *et al.*, 2021). Esta técnica é eficaz na remoção de íons metálicos na água e produz soluções e compostos únicos de terras raras de alta pureza, podendo ser usado comercialmente (Pavón *et al.*, 2018). Uma das desvantagens é a necessidade de uso de solvente e a restrição de aplicabilidade às soluções de íons metálicos não diluídos, o que prolonga o processo

(Yadav *et al.*, 2018). A recuperação de ETR a partir de solução de lixiviação foi possível no estudo de Sui *et al.* (2022). Já uma descoberta recente por Jeon *et al.* (2021) sugeriram que o Cyanex 272 é o melhor reagente para recuperação e potencial separação entre ETR.

4.3.2 Abordagens por métodos elétricos

Abordagens por métodos elétricos para separação de ETR são apresentadas em quatro pesquisas (Yang *et al.*, 2020; Makarova *et al.*, 2020; Hammache *et al.*, 2021; Hua *et al.*, 2022). A extração de ETR em solução ou célula eletroquímica, usando eletrolução (fonte que emite baixa frequência de campo magnético, exemplo, celulares, computadores, etc.) e hidrometalurgia integradas, tem a vantagem de baixo uso de reagentes químicos e menos consumo de energia quando comparado à pirometalurgia. A limitação desta técnica é a eficiência que diminui ao longo do tempo, sendo necessário a solução de lixiviação (Yang *et al.*, 2020; Makarova *et al.*, 2020; Hua *et al.*, 2022). Outra separação possível de ETR é pela abordagem de eletrodialise. Segundo Hammache *et al.* (2021), na eletrodialise a separação ocorre pelo fluxo de íons em uma membrana semipermeável com auxílio de um potencial elétrico. A vantagem é a eliminação de impurezas através de uma membrana de troca iônica, porém, a operação é de alto custo.

Em resumo, a abordagem química pode ser utilizada como uma etapa no processo hidrometalúrgico e também pode ser utilizada para isolar ou concentrar ETR do lixiviado, bem como métodos de eletrodialise (Karal *et al.*, 2021; Hammache *et al.*, 2021).

Durante a lixiviação, os ímãs são dissolvidos em uma solução ácida e o ETR é liberado na forma de íons (Pavón *et al.*, 2018; Yadav *et al.*, 2018). Segundo Jeon *et al.* (2021), as possibilidades de separação foram muito altas entre Dy e Tb. Uma variedade de sistemas aquosos podem ser usados para lixiviação, incluindo ácido sulfúrico, ácido clorídrico, ácido nítrico, ácido cítrico e ácido acético (Pavón *et al.*, 2018; Yadav *et al.*, 2018). Apesar do menor impacto ambiental comparado à pirólise, o uso e descarte de agentes lixivantes pode resultar em um elevado volume de efluentes residuais, ácidos e alcalinos.

4.3.3 Abordagens por métodos físicos e térmicos

Uma abordagem alternativa para recuperar material secundário a partir de resíduos de NdFeB altamente oxidados ou contaminados é proposta por Zhou *et al.* (2019). Neste estudo, o método de autocombustão assistida por micro-ondas seguido por um processo de redução e difusão é utilizado. As melhores propriedades magnéticas do produto final são obtidas quando a proporção de CaH_2 para óxidos é de 1:1:1, embora seja necessária uma otimização adicional. A vantagem desse processo são as características dielétricas que reduzem o tempo de aquecimento. No entanto, a autocombustão limita-se a grandes tamanhos de partícula insolúveis após torrefação de micro-ondas (Xu *et al.*, 2022).

4.3.4 Abordagens por métodos biológicos

Um total de dois artigos apresentaram abordagens biológicas para separação de ETR (Brewer *et al.*, 2019; Wamea *et al.*, 2022). As técnicas biológicas extraem metais valiosos de minérios de baixo teor, usando micro-organismos (bactérias).

Os custos operacionais dessa rota são baixos em comparação com métodos convencionais de mineração. Como limitação, destacam-se: são restritas a ambientes de pH elevado, dificuldade na reprodução de micro-organismos; toxicidade bacteriana e baixas taxas de reação.

Wamea *et al.* (2022) exploraram a remoção de íons neodímio de meios aquosos usando nanocelulose aniônica pilosa - um material sustentável promissor para a remoção de Nd^{3+} de soluções, o que pode permitir a reciclagem de neodímio de fontes secundárias, como resíduos eletrônicos e ímãs permanentes de NdFeB.

4.3.5 Resíduos industriais pré-consumo

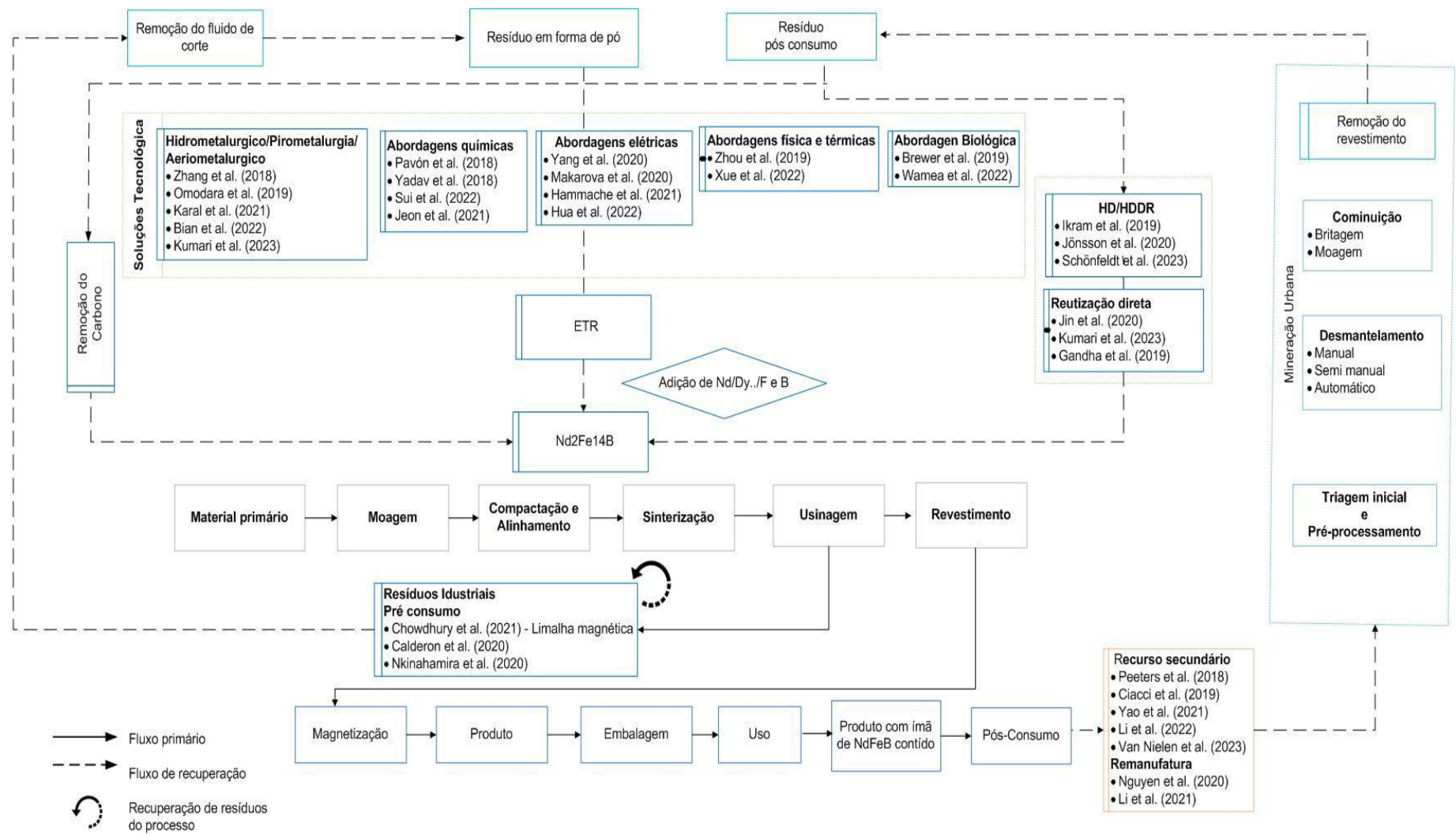
Um total de três trabalhos (Calderon *et al.*, 2020; Nkinahamira *et al.*, 2020; Chowdhury *et al.* 2021) discutiram a obtenção de ETR a partir de resíduos industriais. Calderon *et al.* (2020) investigaram o potencial de recuperação a partir do rejeito da mina primária. O resultado obtido foi uma pirrotita níquelífera magnética para recuperação de metais preciosos.

O estudo de Nkinahamira et al. (2020) utilizou um procedimento simples de lavagem com soluções ácidas diluídas para recuperar ETR de águas residuais industriais. Já Chowdhury et al. (2021) utilizaram nitrato de cobre (II) para dissolver limalhas magnéticas de NdFeB, em alternativa ao uso de ácidos fortes. A reciclagem do nitrato de cobre foi incorporada ao sistema produtivo dos ímãs para reduzir o consumo de matéria prima e a geração de resíduos. Isso resultou em melhorias significativas no resultado econômico e ambiental geral.

4.3.6 Gestão de recurso secundário pós-consumo.

Nesta sessão é apresentada a integração das soluções tecnológicas obtidas neste estudo com o processo de produção dos ímãs de NdFeB, o intuito é propor a integração considerando o retorno dos resíduos dos tipos pré e pós-consumo, através do modelo esquemático, conforme apresentado na Figura 34. Assim, compilou-se o processo produtivo do ímã ao circuito fechado para a circularidade dos materiais secundários, de acordo com as categorias de estudo identificadas na matriz do conhecimento.

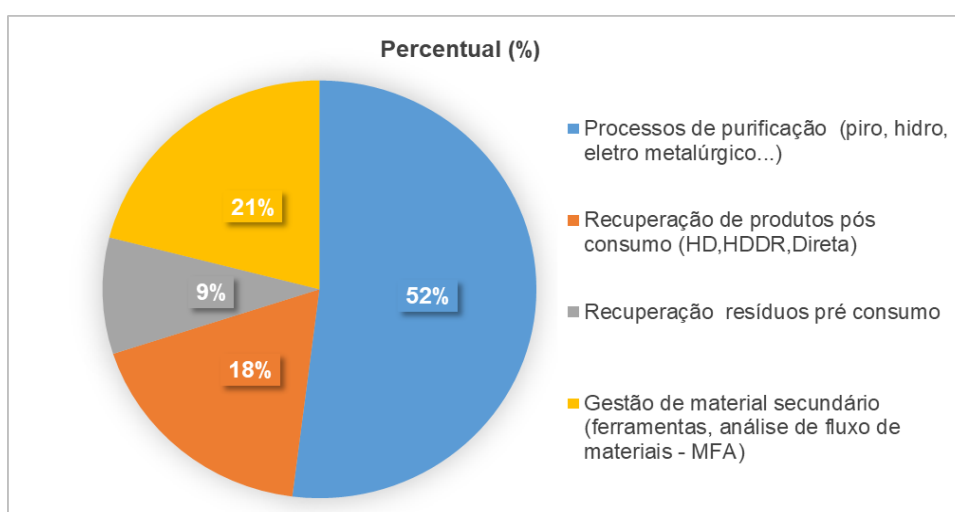
Figura 34 – Fluxograma circular da cadeia de ITR com as soluções tecnológicas RSL



Fonte: Autora (2023)

Diante do fluxograma supracitado, pode-se observar que a eficiência do método de recuperação depende das características do material secundário, seja um material pré-consumo ou pós-consumo. Pode-se observar que há ampla oportunidade para desenvolver processos eficientes para a extração seletiva e separação de metais de terras raras a partir de ímãs NdFeB. O gráfico apresentado na Figura 35, apresenta um percentual das abordagens mais estudadas na análise de RSL. Lembrando que um artigo pode pertencer a mais de uma categoria, por terem processos combinados.

Figura 35 – Percentual das abordagens mais estudadas na análise de RSL



Fonte: autora (2023)

A partir do percentual apresentado, pode-se observar que a maior parte dos estudos estão categorizados pós-consumo, nos processos convencionais advindos da metalurgia, e um percentual significativo de uso direto. No entanto, a escolha da solução tecnológica depende de fatores como a disponibilidade de material, custo energético, rendimento, qualidade do produto final (grau de contaminação) e impacto ambiental (Zhang *et al.*, 2018).

Diversas soluções tecnológicas têm sido desenvolvidas, com metodologias diferenciadas como o reúso direto, hidrometalurgia, pirometalurgia, eletroquímica e biológicas, etc. Contudo, apenas algumas são consideradas robustas, ecologicamente corretas e eficientes para serem aplicadas em escala industrial (Karal *et al.*, 2021). A partir da análise observou-se também que soluções tecnológicas para recuperar material secundário no pré-consumo precisam ser mais exploradas industrialmente. Para fechar o ciclo dos recursos, é fundamental considerar este tipo de resíduo como fonte alternativa de terras raras e, portanto, mais pesquisas são

necessárias. A escala industrial das soluções tecnológicas será abordada com mais detalhes na seção 4.5.

Soluções tecnológicas estudadas por Nguyen *et al.* (2020) e Li *et al.* (2021) abordaram a remanufatura como processo industrial, que consiste em desmontar o produto usado, limpar suas peças e reparar ou substituir as peças danificadas para montar novamente o produto, o que diferencia da reciclagem e da reutilização. Outros estudos vêm sendo desenvolvidos, e são orientados para a gestão dos recursos secundários, como pesquisas que apresentam estimativas de volume com Análise de Fluxo de Material (AFM) e da demanda futura por ímãs de NdFeB, evidenciando a quantidade futura nos depósitos antropogênicos (Ciacci *et al.*, 2019; Yao *et al.*, 2021; Wan Nielen *et al.*, 2023; Peeters *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2022).

Estudos como o de Chowdhury *et al.* (2021) podem ser benéficos para os fabricantes de ímãs de NdFeB, pois demonstram o potencial econômico e ambiental da adoção da tecnologia de dissolução sem ácido proposta para a reciclagem de OTR a partir de cavacos magnéticos de NdFeB. A reciclagem do nitrato de cobre foi incorporada ao sistema para reduzir o consumo de matéria prima e a geração de resíduos. Além disso, podem aumentar sua receita estabelecendo uma instalação de reciclagem de limalhas, colocalizada com a fábrica de ímãs. Da mesma forma, este trabalho referenciado pode ser estendido para abordagens de separação de óxidos de terras raras agregados em óxidos individuais.

O uso de recurso secundário tem vantagens significativas, como elevada economia de energia e redução de emissões de gás efeito estufa (GEE) (Ciacci *et al.*, 2019). Atualmente, o design do produto, a coleta no final da vida útil e as questões de preço do recurso secundário são os principais obstáculos à recuperação dos ETR (Ciacci *et al.*, 2019; Calderon *et al.*, 2020).

Contudo, para que o sistema circular apresentado (Figura 35) seja consolidado, é necessário garantir a gestão pós-consumo dos produtos que empregam ímãs NdFeB. Para isso, é fundamental envolver todos os *stakeholders* da cadeia de suprimentos de terras raras no Brasil. Pesquisas que consideram a etapa de coleta e transporte dos ímãs pós-consumo, considerando as singularidades do território nacional, devem ser exploradas. Para tanto, há necessidade do conhecimento normativo global e nacional existentes para que o gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos seja efetivo. Assim, o próximo capítulo apresenta um

conjunto de instrumentos legais e normativos para auxílio dos atores da cadeia de ITR.

4.4 CONJUNTO DE INSTRUMENTOS LEGAIS E NORMATIVOS

Esta seção apresenta os resultados de um conjunto de requisitos legais e normativos relacionados aos REEE nos países desenvolvidos e em desenvolvimento. Os resultados obtidos são explicitados de forma descritiva com base nos estudos exploratórios.

Estados Unidos, Rússia e Japão foram pioneiros na regulamentação da gestão de resíduos eletrônicos na década de 1990 (Xavier et al., 2023). Essas práticas visam garantir segurança, eficácia e sustentabilidade devido aos riscos associados ao resíduo eletrônico (Kumar; Holuszko; Espinosa, 2017). No entanto, o Japão foi o primeiro a aplicar a estratégia para a gestão dos REEE juntamente com estratégias de responsabilidade estendida ao produtor, abordando princípios da EC com uso dos 3Rs (reduzir, reutilizar e reciclar) (*Ministry of the Environment Government of Japan*, 2020). Assim, foram estabelecidos os tratados internacionais iniciais, relacionados às substâncias perigosas, por exemplo, a Convenção de Estocolmo, em que a finalidade é banir substâncias classificadas como Poluentes Orgânicos Persistentes (POP), foi a partir de uma conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Humano, em 1972, que ficou conhecida como conferência de Estocolmo, e se tornou um marco internacional (*United Nations*, 2020, online).

A Convenção de Roterdã, adotada em 10 de setembro de 1998 e em vigor desde 24 de fevereiro de 2004, regulamenta o comércio internacional de produtos químicos perigosos, sendo a primeira convenção internacional sobre substâncias perigosas. A Convenção de Minamata sobre mercúrio foi adotada em 10 de outubro de 2013 e entrou em vigor em 16 de agosto de 2017, estabelecendo limites ao uso de mercúrio e incentivando a substituição por substâncias de menor impacto (Xavier et al., 2023). Outra convenção importante é a Convenção de Basileia, adotada em 22 de março de 1989 e em vigor desde 5 de maio de 1992, que trata do controle dos movimentos transfronteiriços de resíduos perigosos e seu descarte (Baldé et al., 2021). Além dessas convenções, a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, adotada em setembro de 2015, inclui diversos objetivos relacionados à gestão sustentável de produtos químicos e resíduos. O Objetivo de Desenvolvimento

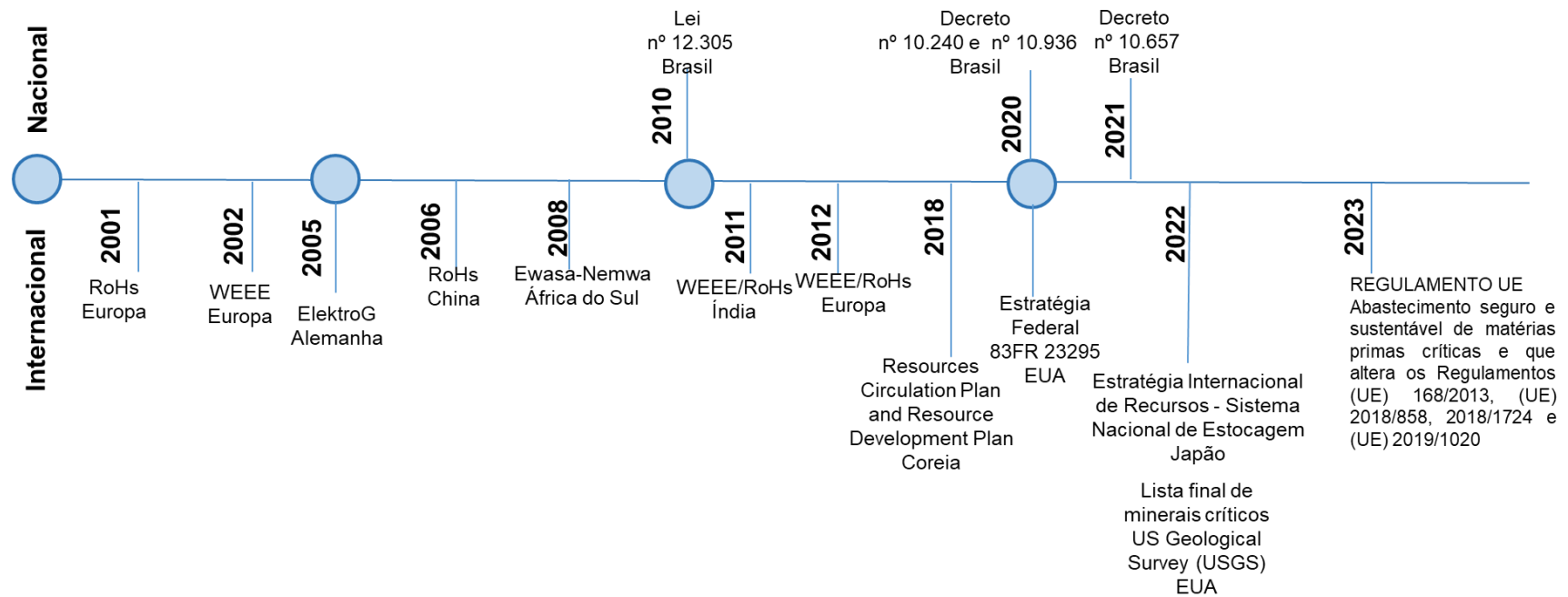
Sustentável, enfatiza a importância de garantir padrões de consumo e produção sustentáveis, promovendo práticas que busquem reduzir significativamente a geração de resíduos e o uso de substâncias perigosas. Esta abordagem global destaca a necessidade de colaboração entre países, setores e comunidades para implementar soluções que minimizem os riscos associados a substâncias químicas nocivas.

As Diretivas REEE que estabelecem a colaboração com a produção e o consumo sustentáveis ao estabelecer normas e metas para a prevenção de REEE, bem como o uso dos recursos primários, incentiva a reutilização e a reciclagem. O intuito é de facilitar a comunicação das partes envolvidas no ciclo de vida dos equipamentos eletrônicos e conter exportações ilegais. Adicionalmente, a Diretiva RoHS (*Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment*), além de restringir o uso e substituição de certas substâncias perigosas ao meio ambiente e saúde, por exemplo, retardadores de chama e plastificantes, proíbe o uso de seis substâncias: entre elas, cádmio (Cd), mercúrio (Hg), cromo hexavalente [Cr(VI)], bifenilos polibromados (PBBs), éteres difenil-polibromados (PBDEs) e chumbo (Pb), bem como viabiliza os resíduos recicláveis (Comissão Europeia, 2021).

A RoHS 2 (2011/65/EU) se tornou lei em 2011 e entrou em vigor em 2013. Em 2015 foram adicionadas outras substâncias, os ftalatos, bis(2-etil-hexilo) (DEHP), ftalato de dibutilo (DBP), ftalato de benzilbutilo. (BBP) e ftalato de di-isobutilo (DIBP), mas a norma só entrou em vigor em 2019. Nesse entendimento, tanto a Diretivas de REEE, quanto a RoHS servem de base para construção aos planos nacionais de cada Estado-Membro, bem como auxilia para construção de legislações de outros países e regiões (Xavier; Ottoni; Lepawsky, 2021; Zeng *et al.*, 2017). As diretivas são regulamentos da União Europeia, mas têm impacto em todo o mundo, já que muitos países exportam para a Europa.

Diante disso, os países passaram a atuar no sentido de buscar o equilíbrio entre os interesses econômicos e a preservação ambiental, bem como regular as responsabilidades e ações dos atores envolvidos, desenvolvendo políticas nacionais, regionais e locais para REEE, já priorizando medidas que se alinhem à EC (Baldé *et al.*, 2017; Forti *et al.*, 2020). Os países estão avançando ao longo dos anos com legislações específicas relacionadas aos REEE, sendo para prevenir, reutilizar, para remanufatura e ou reciclar dentro de padrões seguros. Diante disso, é exibida na Figura 36 uma linha do tempo representando o marco regulatório formal para REEE.

Figura 36 – Principais países com respectivos marcos regulatório formal para REEE



Fonte: Autora adaptado de (Xavier et al. 2023 p. 76)

A partir dos resultados exibidos na linha do tempo, infere-se que, os países avançaram sobre a adoção de medidas legislativas voltadas para a gestão dos REEE, em 2014 apenas 44% da população de 61 países ao redor do mundo, abordavam alguma legislação sobre REEE, em 2017 subiu para 66% da população em 67 países, e em 2019 esse percentual aumentou para 71% da população mundial e 78 países tem suporte legislativo para tais medidas (Forti *et al.*, 2020).

Os países destacados com políticas corretas com relação aos REEE na América do Sul, são o México, Costa Rica, Chile, Colômbia e Peru, que desde 2020 vêm trabalhando no aprimoramento de sistemas já estabelecidos. No entanto, somente o Brasil, apresenta o estabelecimento do marco regulatório formal para os REEE.

A gestão de REEE no Brasil iniciou-se com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) em 2010, que consiste no principal instrumento regulamentador, por meio da Lei Nº 12.305, legislando, entre outros, sobre a aplicação da responsabilização pelo ciclo de vida do produto como da responsabilidade compartilhada e da obrigação do sistema de LR dos produtos eletroeletrônicos e seus componentes (BRASIL, 2010). Ainda, foi recentemente estabelecido o Decreto 10.657:2021, que institui a Política de Apoio ao Licenciamento Ambiental de Projetos de Investimentos para a Produção de Minerais Estratégicos-Pró-Minerais Estratégicos. Diante disso, a Figura 37 apresenta uma visão macro da lista de bens minerais nacionais.

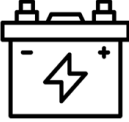
Figura 37 – Visão macro da lista de Bens Minerais para o Brasil



Fonte: Autora adaptado de (Castro e Nascimento, 2023)

As informações supracitadas relacionadas a lista de Bens Minerais para o Brasil apresentam uma gama de materiais, para explicitar o uso desses materiais a Figura 38 apresenta um *framework* da aplicação dos mesmos em produtos diversos produtos que detêm de alta tecnologia.

Figura 38 – Framework dos materiais aplicados nos produtos

Material						
Cobalto	x					x
Lítio	x				x	
Níquel	x		x		x	
Cobre	x	x	x	x		x
Grafita	x					
Nióbio	x		x	x		x
Manganês	x		x	x	x	x
Alumínio	x	x	x	x	x	
Ferro/aço	x	x	x	x	x	x

Fonte: Autora adaptado de (Xavier et al. 2021)

Diante dessa gama de materiais é importante destacar que no Brasil o Grupo de Trabalho RoHS Brasileira (Controle de substâncias perigosas em equipamentos eletroeletrônicos) – “GT RoHs Brasileira” da Comissão Nacional de Segurança Química – CONASQ. Propõem como estratégia arranjos institucionais e a minuta de legislação para controle do poder público, quanto às substâncias perigosas nos equipamentos eletroeletrônicos (MMA, 2023), é possível verificar as instituições que atuaram como membro do GT RoHs no Anexo A.

Além disso, incluiu a estruturação de redes de LR aos REEE a ser implantada pelos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes estabelecida em 2017 pelo Decreto Nº 9.177 (BRASIL, 2017).

Em 2019 foi firmado o acordo setorial entre o Ministério do Meio Ambiente (MMA) e representantes dos produtores e distribuidores de eletroeletrônicos para a implantação das redes de logística reversa dos REEE (MMA, 2019), regulamentada no ano de 2020 pelo Decreto Nº 10.240 (BRASIL, 2020). Portanto, a LR, a qual se define, como um

“Instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010).

Diante da definição de logística reversa, percebe-se que o envolvimento dos fabricantes na gestão e reciclagem, dos fornecedores com relação a embalagem e reparo, e clientes no excesso de estoque e reparos no processo reverso é primordial para que as empresas alcancem os melhores resultados no fluxo logístico reverso (DONIER *et al.*, 2000). No Quadro 5 podemos observar como os geradores e produtores gerenciam a gestão dos REEE nos países desenvolvidos e nos países em desenvolvimento.

Quadro 5 – Gestão de REEE países desenvolvidos e em desenvolvimento

Países Desenvolvidos (*) Em desenvolvimento (**)	Ano	Políticas e Gerenciamento de REEE
União Europeia (*)	2002	Diretivas Weee e RoHS. Planos da Comissão Europeia para a Economia Circular. Responsabilidade do produtor. Coleta e tratamento de resíduos formalizado e operada por empresas privadas.
Japão (*)	2001	Princípios da economia circular dos 3Rs. Programas para a sociedade sustentável. Responsabilidade estendida ao produtor. Coleta e tratamento de resíduos formalizado.
Estados Unidos (*) (país desenvolvido)	-	Os Estados do país têm políticas próprias para a gestão dos REEE. À nível nacional há regulação à certas substâncias. A maioria dos Estados aplica a Responsabilidade estendida ao produtor.
China (**)	2008	Economia circular como estratégia de desenvolvimento sustentável. Proibição da importação do resíduo eletrônico. Responsabilidade estendida ao produtor. Fundos que subsidiam redes de reciclagem a nível provincial. Coleta e tratamento de resíduos formal e informal.
Índia (**)	2011	Normas para a gestão e manuseio de REEE. Detalhamento das responsabilidades das partes envolvidas da cadeia produtiva. Responsabilidade estendida ao produtor. Validação de organizações autorizadas a assumir a responsabilidade da coleta e tratamento resíduos eletrônicos. Coleta e tratamento de resíduos formal e informal.
Brasil (**)	2010	Política nacional de resíduos sólidos. Acordo setorial e decreto presidencial para Implantação do sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes. Responsabilidade compartilhada. Validação de empresa gestora nacional para resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. Coleta e tratamento de resíduos formal e informal.

Fonte: Autora adaptado de (Franz, 2023 p.156)

Pode-se observar no quadro acima que um dos meios adotados na maioria dos países supracitados é o emprego de estratégias de responsabilidade estendida ao produtor, sendo que o Brasil adota a responsabilidade compartilhada, focada na LR. Outra questão, dos países desenvolvidos é a formalização do setor de coleta e tratamento de REEE, nos países em desenvolvimento essa coleta acontece e “tratamento” acontece pelo setor informal (Franz, 2023). O manejo adequado dos resíduos perigosos é apontado pelos países em desenvolvimento para que depois seja adotada e formalizada toda questão de logística reversa.

Nessa percepção os autores Gollakota, Gautam e Shu (2020) ressaltam a necessidade de estratégias nacionais e locais para gestão dos REEE tanto para países em desenvolvimentos, quanto em países desenvolvidos. Assim, os autores sugerem dez questões para que a gestão dos REEE seja eficaz, principalmente nos países em desenvolvimento, como: i) setores formais e informais integrados; ii) redes formalizadas por meio de registro; iii) aplicação de leis rigorosas; iv) regulamentação dos movimentos transfronteiriços; v) responsabilização dos produtores; vi) conscientização do consumidor; vii) projetos de ecodesign aprimorados; viii) investir em centro de reciclagem eficazes; ix) instalação de pontos/descartes melhorados e x) substituir técnicas tradicionais em tecnologias que sejam sustentáveis integrada em redes e sistemas que se comuniquem.

Diante disso, é importante enfatizar o apoio do governo no alinhamento da visão de mercado ao fomento da circularidade e aproveitamento dos recicladores e cooperados (coletores) locais (Baldé *et al.*, 2017; Forti *et al.*, 2020). Outrossim, regulamentar a responsabilização do produtor, oportuniza a geração de renda, formalização do setor informal, bem como inclusão social voltados ao nicho de mercado da reciclagem dos REEE (Tong; Tao; Lifset, 2018). Além disso, os autores articulam que as legislações que impõem regulamentações no mercado de reciclagem auxiliam em novos modelos de negócio, contemplando desde a coleta seletiva e sistemas de LR até soluções informatizadas entre consumidor e recicladores (Franz, 2023).

Dessa forma, torna-se um meio alinhado com tecnologia para facilitar, agilizar e garantir processos e produtos envolvidos. Uma síntese das normas nacionais é apresentada no Quadro 6, com foco na gestão dos REEE. Assim, pode-se verificar as primeiras normas específicas nacionais para REEE, como a ABNT NBR 15.833 revisada em 2018 e a NBR 16.156 em revisão. Diante disso, essas normas permitem

a circularidade dos produtos pós-consumo e a manufatura reversa, permitindo que as empresas que atuam no setor sejam certificadas.

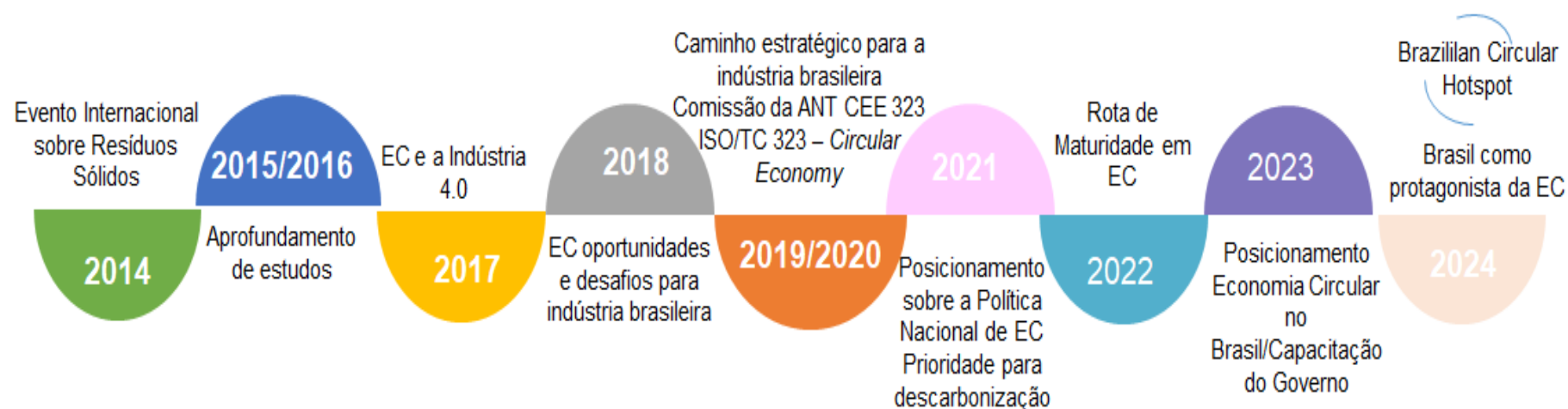
Quadro 6 – Síntese das normas nacionais para gestão de REEE

Norma ABNT NBR:	Descrição
10.004:2004 CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	Classifica os resíduos sólidos quanto aos seus potenciais danos ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente.
16.156:2013 RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS REQUISITOS PARA ATIVIDADE DE MANUFATURA REVERSA	Atualmente entrou em revisão, porém será uma norma nova em função das mudanças de regulamentação no Brasil. No cenário internacional será elaborada uma nova norma com previsão de publicação em 2024. Se aplica às organizações que realizam atividades da cadeia de manufatura reversa de resíduos eletroeletrônicos e estabelece requisitos que permitem o desenvolvimento de competências para a estruturação de um sistema de gestão voltado ao controle e mitigação das ocorrências de agressões ao meio ambiente e aos trabalhadores envolvidos nos processos de reciclagem de REEE. Adicionalmente, trata de requisitos específicos relacionados a responsabilidade por substâncias perigosas, a rastreabilidade dos resíduos recebidos e ao balanço de massa até a disposição
15.833:2018 MANUFATURA REVERSA DE APARELHOS DE REFRIGERAÇÃO	Trata dos procedimentos para o transporte, armazenamento e desmantelamento com reutilização, recuperação dos materiais recicláveis e destinação final de resíduos dos aparelhos de refrigeração
IEC 63.000:2019 Documentação técnica para a avaliação de produtos elétricos eletrônicos com relação à restrição de substâncias perigosas (RoHS – Restriction of Hazardous Substances)	Especifica a documentação técnica que o fabricante necessita compilar, de forma a declarar a conformidade com as restrições aplicáveis das substâncias, sob diversos regulamentos mundiais de restrições de substâncias. A base dessa Norma é a Norma Europeia EM 50581:2012, que, por sua vez, foi base para a Diretiva 2011/65/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 8 de junho de 2011 sobre restrição de utilização de determinadas substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrônicos RoHS.

Fonte: Autora (2023) com base em ABNT (2019)

O Decreto nº 7.404 de 2010, que regulamenta a PNRS, foi revogado e deu lugar ao “Decreto nº 10.936 de 2022 que trouxe uma revisão dos principais conceitos e tem viabilizado o estabelecimento de acordos setoriais e favorecido o estabelecimento de procedimentos eficientes para a gestão de resíduos” (Xavier et al., 2023 p. 84). Dessa forma, recentemente o país está formalizando uma norma por meio do comitê técnico TC 323, sobre EC. A ação envolve participantes de vários países entre eles: Suíça, Brasil, Japão, Índia, EUA, Alemanha entre outros. A Figura 39 apresenta uma linha do tempo relacionada à evolução da EC no Brasil.

Figura 39 – Evolução da Economia Circular no Brasil



Fonte: Autora (2023)

Diante da Figura 39, pode-se inferir que o Brasil por meio da criação do Fórum Nacional de Economia Circular, estão se posicionando para uma transição justa que fornece apoio às regiões e setores mais afetados pela transição. O destaque da política nacional de EC é o financiamento para inovação em tecnologias, processos e modelos de negócios, criação de banco de dados com informações sobre ciclo de vida, compras públicas sustentáveis, bem como, campanhas educativas, capacitação profissional, orientação para acesso a recursos e elaboração de projetos (ABNTweb, 2023).

Os objetivos da política nacional de EC envolve promover a gestão estratégica dos recursos naturais, mapeamento e rastreamento dos recursos naturais (material em quantidade e qualidade que sustente a reciclagem, identidade da indústria brasileira como sustentável com cooperação em um ambiente competitivo), fortalecimento das cadeias de valor por meio da adição, retenção e recuperação do valor dos recursos, conscientização da sociedade sobre o melhor uso de recursos (campanhas educativas amplas, capacitação profissional), produtos e materiais, promover novos modelos de negócios inovadores (orientação para acesso a recursos e elaboração de projetos) e incentivo à PD&I (inovação em design de produtos, desenvolvimento de métricas e indicadores de circularidade) para a promoção da circularidade (ABNTweb, 2023).

A EC exige uma nova definição de criação de valor e para 2024, há uma busca em como preparar o mercado para tornar o Brasil o protagonista da EC. Para isso é necessário verificar i) quais são os novos papéis e responsabilidades (é preciso integrar diversos atores e redefinir papéis); ii) expansão da fronteira e percepção de retorno (foco tem de ser no sistema com diferentes parceiros); iii) o facilitador e o olhar de estratégia (novos modelos de negócio/valores uma visão holística da cadeia de valor); iv) diretrizes, normas e estudos de caso como melhores práticas como base para o progresso da EC no país. Após quatro anos do manifesto circular foi criado o selo de engajamento para o *mindset* dos negócios circular¹² e ser o primeiro ponto de contato com a criação e adaptação de soluções globais adaptadas à realidade brasileira. Além disso, a demanda é criada e incorporada com diferentes partes da cadeia de valor, gerando novos empregos, novas demandas e facilitando todo ecossistema.

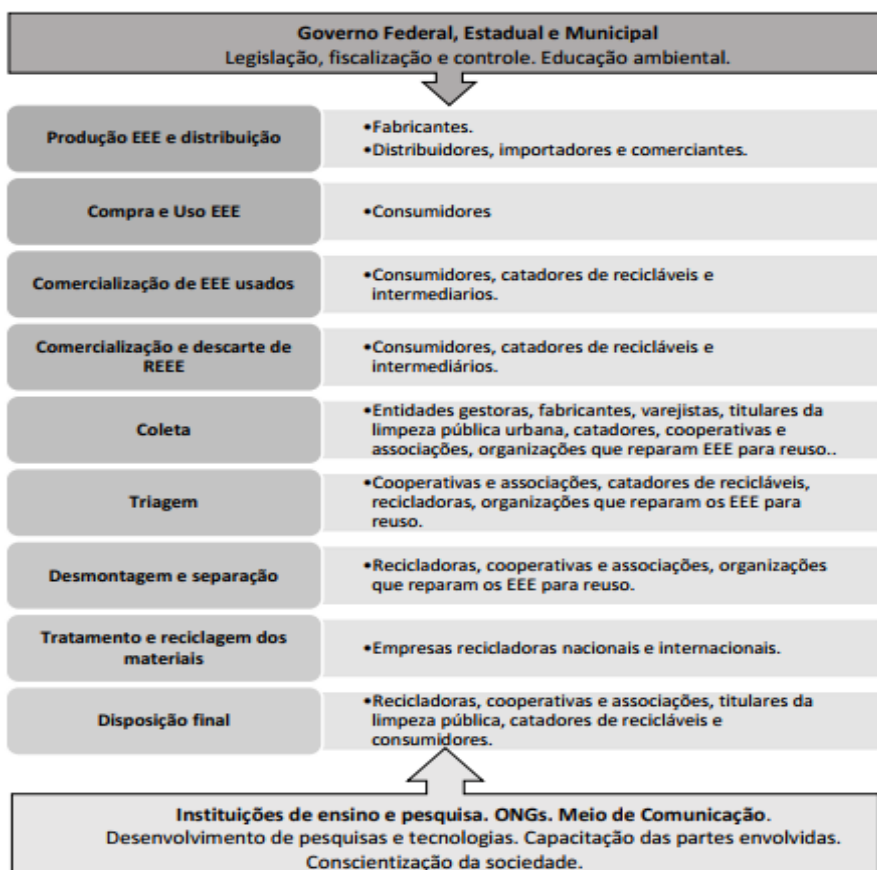
¹² www.e4cb.com.br

Isernia *et al.* (2019), enfatizam que as legislações nacionais sobre os REEE, aliada de investimentos para coleta, distribuição e desmantelamento demonstram muitas ações por fazer, sendo extremamente positivos nos canais de LR de REEE. Assim, justificando a mineração urbana nos sistemas circulares no qual os produtos retornam à cadeia de suprimentos por operações de logística cíclica, ao passo que pode conter o esgotamento de recursos reduzindo volumes de REEE em meio às cidades (Ottoni; Dias; Xavier, 2020).

Além disso, a EC prioriza a qualidade e não a quantidade, ou seja, os materiais podem retornar à cadeia produtiva para gerar outros produtos com atributo superior, isto é, denominado de valorização (*upcycling*), a partir do qual produtos e serviços podem ser melhorados (Bridgens *et al.*, 2018).

A recuperação dos materiais é consequência da coleta, processamento e destinação de produtos e componentes pós-consumo por meio da Logística Reversa (LR) (Xavier, 2019). A Figura 40 exibe as ações de LR evidenciadas no estado de São Paulo, uma vez que possuem ações específicas aos REEE em seus planos de resíduos sólidos.

Figura 40 – Cadeia de valor Brasil



Fonte: Franz (2023, p. 253)

De forma que, a LR de pós-consumo é uma prática ambiental, sendo considerada na mineração urbana como o fechamento do ciclo da cadeia produtiva, ou seja, uma parte do ciclo da EC, visto que o resíduo sai de um ciclo produtivo e entra em outro, logo após sua geração, sendo reaproveitado, assim gerando um ciclo infinito (Guarnieri; Strei; Batista, 2018).

Diante desse cenário, é importante reiterar que o governo é responsável por regular a cadeia de valor dos REEE, bem como integrar a sociedade conscientizando-os. Neste contexto, após a PNRS (2010), Lei nº 12.305 de 2010 (BRASIL, 2010) e Decreto nº 10.936 de 2022 (BRASIL, 2022), a atuação dos agentes na LR e na gestão de REEE é composto por consumidores, produtores, importadores, distribuidores e comerciantes.

Além desses agentes, considera-se ainda as entidades gestoras e os operadores, conforme proposto pelo Decreto nº 10.240/2020, que regulamenta a implantação dos sistemas de logística reversa no setor. Em estudo recente, a identificação dos agentes partiu do levantamento de informações para este conjunto e teve como base as informações do projeto¹³ DATARE (2021). Projeto desenvolvido pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), entre os anos de 2020 e 2021 por encomenda do MCTI. Essas empresas cadastradas como “empresas recicladoras” que atuam na cadeia para gestão de REEE, foram 384 empresas identificadas no primeiro ano e 23 responderam ao questionário, sendo possível verificar no Anexo B.

As empresas que atuam na gestão de REEE representam a categoria mais complexa do conjunto de agentes em razão da diversidade de atuação e classificação das atividades.

O mercado brasileiro de reciclagem de resíduos, que incluem os REEE, é formado historicamente por atores que desenvolvem atividades formais e informais. Conforme Abalansa *et al.* (2021) essa é uma característica presente sobretudo nos mercados de reciclagem de REEE dos países em desenvolvimento. A PNRS (2010) incluiu a atividade dos catadores de material reciclável e estimula a organização coletiva desses em cooperativas e associações para atuar desde que habilitados na logística reversa dos REEE. Os catadores estão inseridos na Classificação Brasileira de Ocupações (CBO) do Ministério do Trabalho como trabalhadores da coleta e

¹³ <https://sisdatare.cetem.gov.br/>

seleção de material reciclável (Código 5192), mas em sua maioria ainda desempenham a atividade na informalidade.

No Brasil é importante frisar que há organizações não governamentais e instituições de Ensino que apoiam muitas dessas cooperativas e associações, bem como os catadores. Um exemplo é o CETEM que conduz e promove programas de treinamento técnico e gerencial. Além disso, essa instituição ajuda a aumentar a conscientização pública sobre seu uso, promovendo o descarte sustentável por meio de projetos de educação ambiental, especialmente REEE. Na próxima seção serão abordadas as políticas, programas e projetos de reaproveitamento de Resíduos eletroeletrônicos no pós-consumo, bem como as regulamentações para uso de ímãs de NdFeB.

4.4.1 Regulamentações mundiais para uso dos ímãs de NdFeB

Esta seção apresenta o resultado obtido da revisão exploratória da literatura, com a identificação das regulamentações mundiais com a respectiva origem, conforme o Quadro 7. Dessa forma, é possível verificar as regulamentações mundiais e ter um panorama de como a temática normativa é vista perante os demais países.

Quadro 7 – Conjunto de instrumentos legais e normativos relacionadas aos ITR e REEE

(Continuação)

País	Ano	Regulamentação
Japão	1999	Evaluation Criteria for Energy Consumption Performance of Magnetic Disk Units, Notice No. 195, 1999
Japão	2021	Amendment - (on new energy efficiency standards for magnetic disks) Notice No. 96, 2021
Japão	2021	Rational Use of Energy, Enforcement Regulations, Ordinance No. 74, 1979 - Amendment - (on scope of magnetic disks, gas and oil water heaters excluded from specific energy consumption devices) Ordinance No. 42, 2021
Japão	2009	Evaluation of Standards for Manufacturers of Computers and Magnetic Disks under Top Runner, Report, December 2009
Japão	1979	Rational Use of Energy, Enforcement Regulations, Ordinance No. 74, 1979
Japão	2020	Measures to be Taken by Retailers of Energy Consuming Equipment, Notice No. 258, 2006 - Amendment - (on title, products in scope and establishment of mini label) Notice No. 243, 2020
Japão	2006	Measures to be Taken by Retailers of Energy Consuming Equipment, Notice No. 258, 2006
Austrália	2020	Consumer Goods (Toys Containing Magnets) Safety Standard, 2020
Austrália	2023	Review of the GEMS Determinations for Transformers and Electronic Step-down Converters for ELV Lamps Due to Expire in 2023, Consultation Paper, March 2022
Austrália	2022	Review of the GEMS Determination for Ballasts for Fluorescent Lamps, Consultation Paper, March 2022
Canadá	2011	Toys Regulations, SOR/2011-17 - Amendment - (on magnetic toys), Regulations, SOR/2018-138
Canadá	2009	Safety of Toys - Mechanical and Electrical Hazards, Draft Regulations, November 2009
China	2020	Catalogue of Products Subject to Energy Efficiency Labelling (15th Batch), Notice No. 640, 2020
USA	2022	Consumer Product Safety Act (CPSA), Safety Standard for Magnets, Final Rule, 16 CFR 1112 and 1262, 2022
USA	2020	Restrictions for Magnet Sets, Briefing Package, June 2020

(Continua)		
USA	2017	Appliance Efficiency Regulations, CCR Title 20, Sections 1601-1608 - Amendment - (on emergency regulations for Residential Pool Pump and Motor Combinations), Regulation, March 2017
USA	2014	Consumer Product Safety Act, Safety Standard for Magnet Sets, Final Rule, 16 CFR Part 1240, September 2014
Eurásia	2017	Approving Technical Regulations on Safety of Toys, Decision No. 798, 2011 - Amendment - (on safety requirements for magnetic toys) Decision No. 12, 2017
Bulgária	2008	Ordinance on Safety Requirements for Magnetic Toys, Decree No. 274/2008
Bósnia e Herzegovina	2008	Warning Labels for Magnetic Toy Parts, Decision, November 2008
Canadá	2021	Requirements and Test Methods for Magnetic Output From Handset Telephones for Hearing Aid Coupling and for Receive Volume Control, CS-03, Part V Issue 9, Amendment, 2021
Costa Rica	2019	Approving Technical Regulation RTCR 497: 2018 on Electrical Materials, Boards and Thermomagnetic Circuit Breakers, Switches, Sockets, Plugs and Connector Cords up to 1000 V, Draft Decree, January 2019
EU	2014	Restriction of Hazardous Substances (RoHS) Directive 2011/65/EU - Amendment - (on exemption for lead and cadmium in metallic bonds creating superconducting magnetic circuits) Directive 2014/9/EU
EU	2019	Study to Assess RoHS Exemption Request for Renewal of Annex IV Exemption 12, Lead and Cadmium in Metallic Bonds Creating Superconducting Magnetic Circuits in MRI, SQUID, NMR (Nuclear Magnetic Resonance) or FTMS (Fourier Transform Mass Spectrometer) Detectors, Project, December 2019
EU	2014	Restriction of Hazardous Substances (RoHS) Directive 2011/65/EU - Amendment - (on exemption for lead in solders in MRI equipment) Directive 2014/12/EU
EU	2020	Assistance to the Commission on Technical, Socio-Economic and Cost-Benefit Assessments Related to Pack 18 Exemptions from Substance Restrictions in Electrical and Electronic Equipment, Final Report, July 2020
Espanha	2020	List of European Standards Ratified as Spanish Standards in August 2020, Resolution, September 2020
Espanha	2019	List of European and International Standards Proposed for Adoption as Spanish Standards in November 2019, Resolution, December 2019
Espanha	2019	List of European Standards which have been Ratified as Spanish Standards in February 2019, Resolution, March 2019

(Continua)		
Taiwan	2013	Revision on Mandatory Commodity Inspection Schemes of "Other Keyboard" Category for Eleven Products, Announcement No. 10230020150, 2013
Taiwan	2017	Labelling Criteria for Electrical and Electronic Products, Announcement No. 10602403410, 2017
Taiwan	2022	Revised Mandatory Commodity Inspection Rules Including Restricted Substance Labelling for Printing or Copying Machines and 30 Other Commodities, Notice No. 11130001240, 2022
Tailândia	2021	Establishment of Industrial Standard TIS 62841-3(13) on Electric Motor-Operated Hand-Held Tools, Transportable Tools and Lawn and Garden Machinery - Safety - Part 3-13: Particular Requirements for Transportable Drills, Announcement No. 6235, 2021
Tailândia	2021	Establishment of Industrial Standard TIS 62841-1 on Electric Motor-Operated Hand-Held Tools, Transportable Tools and Lawn and Garden Machinery - Safety - Part 1: General Requirements, Announcement No. 5887, 2021
Montenegro	2018	Adopting Various European Standards and Related Documents, Decision, July 2018
Mexico	2018	Safety Requirements and Test Methods for Electronic Devices, Standard NOM-001-SCFI-2018
India	2013	Clarification on Compliance with the Electronics and IT Goods (Requirement of Compulsory Registration) Order 2012, Circular No. 3, August 2013
India	2021	Electronics and Information Technology Goods (Requirement of Compulsory Registration) Statutory Order S.O. 1248(E), 2021
India	2021	Electronics and Information Technology Goods (Requirement of Compulsory Registration) Statutory Order S.O. 1248(E), 2021 - Amendment - (on exemption for highly specialized equipment (HSE), etc.) Statutory Order S.O. 2844(E), 2021
Finland	2018	Limiting Public Exposure to Non-ionizing Radiation, Decree 1045/2018
Luxembourg	2021	New European Standards Applicable in the Electrotechnical Field, List, May 2021
Luxembourg	2022	: Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, Regulation, 30 July 2013 - Amendment - (on implementation of Directives (EU) 2011/78, 2011/79, 2011/80 and 2011/84) Notice, March 2022
Bulgaria	2021	: Approval of Exemptions on Restrictions on the Use of Hazardous Substances in Certain Materials and Components of Electrical Equipment, Order No. 289, 2016 - Proposed Amendment - (on exemptions for DEHP, BBP, DBP, DIBP, etc) Draft Order, December 2021

(Conclusão)		
Latvia	2014	Restrictions on the Use of Chemicals in Electrical and Electronic Equipment, Regulation No. 84, 2013 - Amendment - (on implementing certain exemptions) Regulation No. 275, 2014
Iran	1992	Energy Efficiency of Fluorescent Lamp Ballast, Standard ISIRI 10759, 1992
Malta	2022	Restriction of Use of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, Regulations, L.N. 84, 2013 - Amendment - (on implementing EU exemptions for phthalates) Regulations, L.N. 93, 2022
México	2017	Energy Efficiency of Lamps for General Use, Limits and Testing Methods, Standard NOM-028-ENER-2017
Tchéquia	2022	Restriction of Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, Regulation 481/2012 - Amendment - (on implementation of EU Directives 2011/65/EU, 2011/65/EU, 2011/65/EU etc.) Regulation 120/2022
Islândia	2022	Restrictions on the Use of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, Regulation No. 630/2014 - Amendment - (on implementation of EU Directives 2011/65/EU, 2011/65/EU and 2011/65/EU) Regulation No. 637/2022
Brasil	2018	Approving Target Program for Energy Efficiency of Electric Converters, Joint Ministerial Portaria, No. 3, 2018
Ucrânia	2022	Approving Technical Regulations on Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, Resolution No. 139, 2017 - Proposed Amendment - (on changes to Annexes 3 and 4) Draft Resolution, September 2022
Bélgica	2022	Restriction of Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, Royal Decree, 17 March 2013 - Amendment - (on transposition of RoHS exemptions Directive 2011/65/EU & others) Royal Decree, 1 May 2022
Vietnã		List of Potentially Unsafe ICT Products Subject to CERTification, Circular No. 11/2020/TT-BTTTT

Fonte: Autora (2023)

O conjunto de normas e instrumentos legais, permite o cumprimento aos requisitos básicos da característica do produto. Ter conhecimento nessas normas, regulamentações, abre espaço para a atuação da administração. Para que as organizações trabalhem de acordo com as normas e regulamentos técnicos relacionados às características dos produtos, cumprindo os requisitos básicos, bem como de segurança.

Assim, os produtos pós-consumo que não são adequadamente coletados, representam risco ao meio ambiente e à saúde devido à composição química desses materiais (Jain *et al.*, 2023). A próxima seção apresenta as questões ambientais, bem como a quantidade de ímãs de NdFeB nacional.

4.5 IDENTIFICAÇÃO DOS INSUMOS, GERAÇÃO DE EMISSÕES E INFRAESTRUTURA DAS SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS

O desenvolvimento da economia mundial está ligado ao consumo de dispositivos eletrônicos necessários para sociedade. Em 2019, a quantidade de REEE em todo o mundo foi: 53,6 milhões de toneladas (Forti *et al.*, 2020). Diante disso, é de extrema importância considerar o impacto ambiental que eles provocam (Liu *et al.*, 2023). Nesta seção os resultados foram em parte fragmentados da RSL, enfatizando um déficit de informações quanto as questões ambientais nos documentos analisados, havendo necessidade de pesquisa exploratória nesse tópico.

A busca empreendida aqui tem como um de seus pontos de destaque o estudo realizado por Küçüker *et al.* (2017), os autores consideraram inventário de ciclo de vida para o ímã de NdFeB, sendo um estudo pioneiro na área e abre possibilidades para o setor. Pode-se observar os dados de entrada e saída exibidos na Tabela 11, esses dados são calculados com base na massa, resultando em um inventário do ciclo de vida para reciclagem de 1kg de ímã de Nd.

Tabela 11 – Inventário de ciclo de vida para 1Kg de Nd reciclado

Entrada	Montante	Unidade
Pó magnético	4,11	kg
Eletricidade, média tensão, mistura de terras raras (filtragem)	0,071	kWh
Eletricidade, média tensão, mistura de terras raras (bombeamento)	25,12	KJ
Fábrica de produtos químicos, orgânicos (suposição de processos semelhantes)	8,23E ⁻¹¹	(unidades)
Ácido sulfúrico	40,15	kg
Água, deionizada, da água da torneira, no usuário (estequiometria)	183,8	kg
Hidróxido de sódio	4,11	kg
Saída	Montante	Unidade
Neodímio (hidróxido de neodímio)	1	kg

Fonte: Autora adaptado de Küçüker *et al.* (2017).

A partir da solução tecnológica hidrometalúrgica foi avaliado o impacto da reciclagem, conforme Karal *et al.* (2021) foram feitas análises para avaliar a carga ambiental e o custo de produção, a referência geográfica é Istambul, Turquia. O escopo tecnológico do estudo são experimentos realizados em escala laboratorial. A produção, utilização, recolha, triagem ou quaisquer outras fases relativas aos ímãs pós-consumo não faziam parte do sistema de recuperação de metal. Nesse estudo, os resíduos perdidos durante as diversas fases de produção estão fora dos limites do sistema. Os impactos do transporte para a Turquia seriam muito semelhantes aos de outras localidades da Europa, valores de mercado para OTR também foram usados no estudo. A análise de custos foi realizada por meio do banco de dados *Ecoinvent* 3.3 sem alterar o preço. Para comparar os custos associados à solução tecnológica da reciclagem de Nd e a produção primária, os autores assumiram o custo de produção simplificado. Os ímãs NdFeB são bastante frágeis. Portanto, os dados de aplicação industrial sobre o consumo de energia para desmagnetização são de 0,075 kWh para um ímã de 1 kg (Zakotnik *et al.*, 2016).

De forma geral a redução de óxido de Nd e a produção da liga de NdFeB é similar no processo primário, quanto no processo hidrometalúrgico (Sprecher *et al.*, 2014). Assim, a comparação da categoria de impacto ambiental das duas vias é expressa na Tabela 12, na qual exhibe valores e referência para um 1 kg de ímã NdFeB produzido. Os resultados da análise de ciclo de vida ajudam a destacar o perfil

ambiental numa fase inicial e contribuem para prevenir consequências ambientais não intencionais no futuro.

Tabela 12 – Comparação das categorias de impacto ambiental para recuperação de Nd a partir de ímãs de NdFeB

Categorias de Impacto Ambiental	Unidades	Nd primário	Nd secundário
Potencial de acidificação - Europa média	kg SO ₂ eq	0,26	0,3
Mudanças climáticas - GWP100	kg CO ₂ eq	30,5	22,8
Ecotoxicidade terrestre - TETP inf	kg 1,4-DCB eq.	0,47	0,16
Oxidação fotoquímica - alto NOx	kg etileno eq	0,013	0,0131
Eutrofização - genérico	kg PO ₄ eq	0,67	0,67
Ecotoxicidade aquática de água doce - FAETP inf	kg 1,4-DCB eq	16	13,8
Ecotoxicidade aquática marinha - MAETP inf	kg 1,4-DCB eq	6,74E ⁺⁰⁵	4,74E ⁺⁰⁵
Depleção da camada de ozônio - estado estável ODP	kg CFC-11 eq	3,96E ⁻⁰⁶	2,70E ⁻⁰⁶
Toxicidade humana - HTP inf	kg 1,4-DCB eq	72,8	52,5
Esgotamento de recursos abióticos - elementos, reservas finais	kg de antimônio eq.	0,00022	0,00043
Esgotamento de recursos abióticos - combustíveis fósseis	MJ	440	297

Fonte: Autora adaptado de Karal *et al.* (2021)

Diante disso é possível observar que os benefícios são evidenciados na ecotoxicidade terrestre, esgotamento dos recursos abióticos - combustíveis fósseis, ecotoxicidade aquática marinha, alterações climáticas, ecotoxicidade aquática de água doce e eutrofização. Os impactos de ecotoxicidade do Nd reciclado são menores, pois evitam os processos altamente poluentes utilizados na produção virgem de ETR. Segundo os autores Karal *et al.* (2021) processos tecnologicamente avançados utilizados na produção primária estão associados a uma procura de energia significativamente maior. Porém, a elevada utilização de ácido sulfúrico e outros produtos químicos na reciclagem hidrometalúrgica de Nd leva a uma utilização significativa de recursos abióticos e potencial de acidificação.

Dessa forma, este estudo, juntamente com os estudos limitados publicados na literatura, aponta claramente que a abordagem de reciclagem de Nd tem impactos ambientais significativamente menores do que a produção primária. O método de recuperação de metal reduziu o custo de produção do ímã de NdFeB e a maioria das categorias de impacto ambiental. Os pontos críticos eram o alto consumo de ácido e

o tratamento de águas residuais perigosas. No que tange aos custos nesse estudo a reciclagem também reduziu o custo de produção de 8,55 para 3,98 USD/kg.

Outro estudo os autores Cessel *et al.* (2023) mostraram que em 2019 no norte do Paraná (Brasil), foram coletadas 3,7 toneladas de eletroeletrônicos, e a fase de transporte para reciclagem emitiu 62 kg CO₂ eq. Os impactos ambientais gerados mais relevantes foram nas categorias de formação de material particulado fino, escassez de recursos minerais, e aquecimento global. A metodologia utilizada foi a Avaliação do Ciclo de Vida, junto com as normas ISO 14.040:2006 e ISO 14.044-2017:2022. Os resultados apresentados pelos autores foram produzidos utilizando a abordagem do IPCC, permitindo a observação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em kg CO₂ eq. Foi evidenciado a partir da Tabela 13 que a coleta anual resulta em uma emissão total de 62 kg de CO₂ equivalente, com a maior parcela sendo proveniente da rota entre Sarandi e Curitiba (representando 92% do total).

Tabela 13 – Emissões totais de GEE do transporte dos resíduos eletroeletrônicos

Categoria de impacto	Unidade	Total	Jandaia do Sul à Mandaguari (8KM)	Mandaguari à Sarandi (30KM)	Sarandi à Curitiba (343KM)
IPCC	Kg CO ₂ eq.*	62	1,60	3,93	55,58

*Quilograma de CO₂ equivalente ou Gás Carbônico

Fonte: adaptado de Cessel *et al.* (2023)

Diante dos resultados, pode-se inferir que a reciclagem é uma estratégia eficaz para gerenciar produtos que precisam de uma disposição pós-consumo. Entretanto, o estudo apresentado, evidenciou que a etapa da reciclagem também impacta o meio ambiente, iniciando-se no seu transporte. Assim, quanto maior a distância envolvida maior será o impacto. Os resultados indicaram que o transporte dos eletroeletrônicos de Jandaia do Sul até o ponto de reciclagem em Curitiba resultou na emissão total de 62 kg CO₂ eq de Gases de Efeito Estufa, além de uma demanda considerável de energia proveniente de energias fósseis e nucleares. Esses dados quantitativos relacionados aos impactos ambientais devem ser levados em consideração ao avaliar o ciclo de vida completo de um processo de reciclagem de dispositivos eletroeletrônicos.

4.5.1 Identificação dos insumos nacionais

Nesta etapa são apresentados os dados obtidos do resultado do potencial brasileiro de ímãs de NdFeB para futura projeção do fluxo de material. Com base nos achados da investigação conduzida para quantificar ímãs de NdFeB em território nacional, buscou-se a entrada de ITR nos últimos 20 anos.

Diante disso, o uso da NCM na nomenclatura internacional foi primordial, a partir disso, foi possível analisar o fluxo de mercadorias de importação e exportações. Conforme apresentado no capítulo 3, o código selecionado foi 8505.1 - Ímãs permanentes e artigos destinados a tornarem-se ímãs permanentes após magnetização (FAZCOMEX, 2023). É importante ressaltar que a coleta de dados incluiu um conjunto de NCM subsequente do código supracitado, (85051100; 85051910 e 85051990).

Salienta-se que foi agregado dados relacionados à base do IBGE a PRODLIST-Indústria, pelo fato da incorporação de novos produtos e ajustes nas designações existentes nos códigos NCM. Assim, as atividades industriais de codificação 2790 referem-se à Classificação Nacional de Atividades Econômicas – CNAE, estão compreendidos geralmente na categoria “não especificados” reúne o conjunto de produtos cuja produção, individualmente, não possui peso suficiente dentro da classe da atividade econômica para justificar sua identificação com um código de produto específico, inferindo-se aqui os ímãs de NdFeB contidos em HD com peso em gramas.

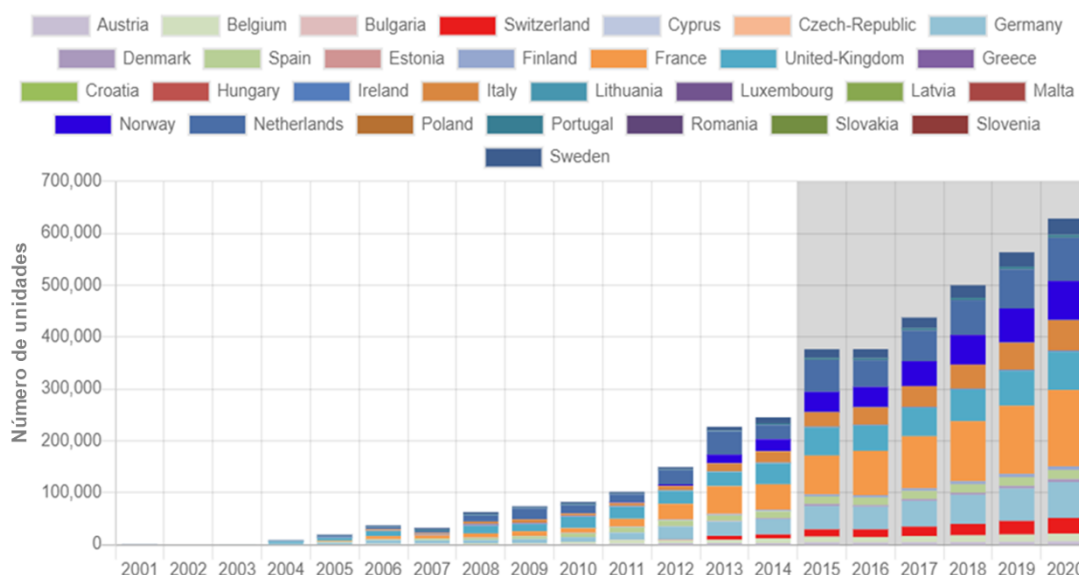
As versões utilizadas na pesquisa, compreende os dados de produtos e serviços industriais referente a PRODLIST-Indústria¹⁴, dos anos de 2005, 2006, 2007 com a versão CNAE 1.0, depois para os anos de 2010, 2013, 2016, 2019 e 2022 com a versão CNAE 2.0. Compreendendo, também, os dados revisados de 2014 e 2015 (IBGE, 2017).

Com respaldo à Europa projetou uma plataforma de mineração urbana (www.urbanmineplatform.eu), a qual facilita verificar por meio de filtros a quantidade de material gerado, coletado e reciclado, bem como os componentes em cada produto. Assim, como exemplo do resultado da busca na plataforma *Urbanmine* (Figura 41), na qual o filtro foi nos veículos e nos ímãs do motor de acionamento

¹⁴ <https://concla.ibge.gov.br/estrutura/produtos-estrutura/prodlist-industria>

elétrico, por meio de escala de cores representa os países compreendidos nessa plataforma.

Figura 41 – Número de unidades de ímãs do motor ao longo de 20 anos



Fonte: Autora a partir da plataforma *Urbanmine* (2023)

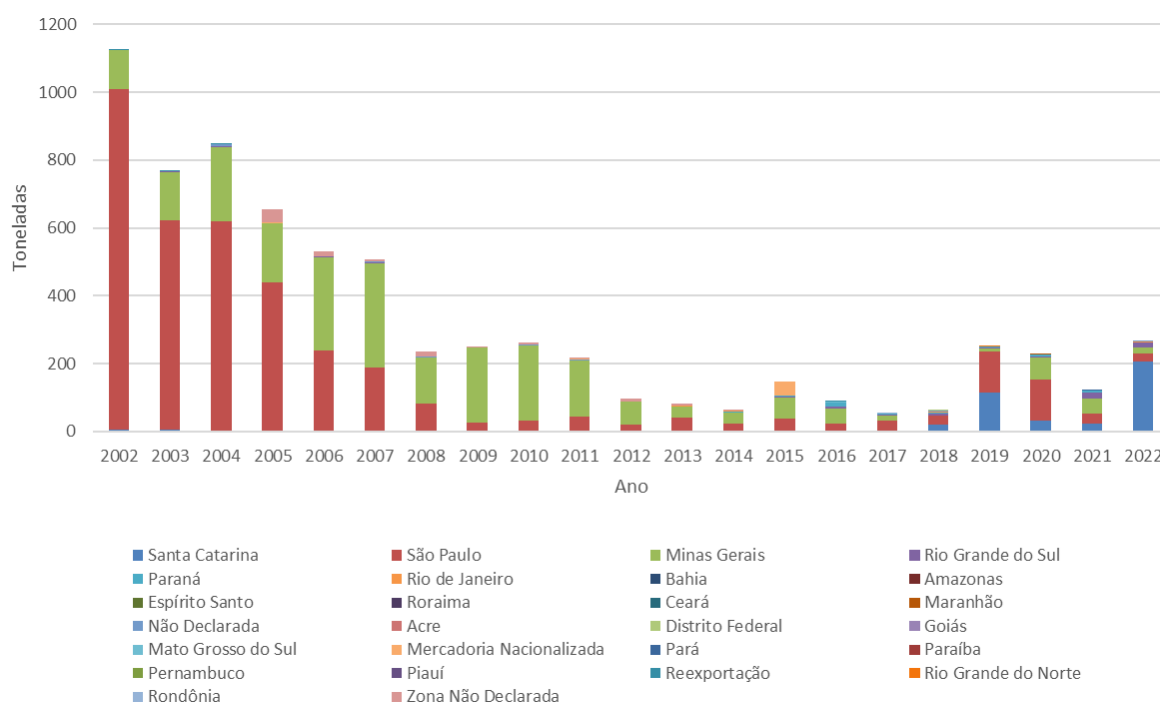
Dessa forma, infere-se que o gráfico acima supracitado apresenta dados da produção de uma gama de países que fabricam veículos elétricos e que cadastram as informações do número de unidades de ímãs no motor ao longo dos anos. Diante disso, podemos observar o aumento da quantidade de ímãs de 400 mil unidades no ano de 2015 para 600 mil unidades no ano de 2020 usados em veículos elétricos. Porém no Brasil, uma plataforma similar ainda é inexistente.

Outras ferramentas, como balanço de massa, potencial de reciclabilidade, índice de circularidade e a avaliação do ciclo de vida também podem ser aplicadas com a finalidade de análise do potencial de mineração urbana de um determinado material ou cadeia produtiva (Xavier *et al.*, 2021).

A técnica de análise do fluxo de materiais (do inglês, *material flow analysis – MFA*), também pode apoiar o gerenciamento de materiais que fornecem a base para a quantificação, avaliação melhoria ou planejamento estratégico (Tran *et al.*, 2018). As aplicações são bastante diversificadas desse método, bem como de análises que estima a geração de resíduos (Xavier *et al.*, 2021). No entanto, a cadeia produtiva de ímãs no Brasil ainda se encontra em fase inicial.

Assim, optou-se por trabalhar com um conjunto de dados nas bases nacionais (ComexStat/MDIC, 2023), que explicitam um valor estimado da quantidade de ímãs de NdFeB, tanto importada, quanto exportada em território nacional. A Figura 42 apresenta dados de exportação de produtos que contém ímãs e seus respectivos estados de saída para outros países.

Figura 42 – Exportação de produtos contendo ímãs ou artefatos destinados a tornarem-se ímãs após a magnetização das NCM (85051100; 85051910 e 85051990) no período de 2002 a 2022.



Fonte: Autora a partir de (ComexStat/MDIC, 2023)

Diante dos resultados da análise da quantidade exportada de ímãs permanentes ou artigos destinados a tornarem-se ímãs permanentes em toneladas/ano, observa-se que o total acumulativo para o ano de 2002 apresenta aproximadamente 1100 toneladas, sendo que 1000 toneladas é somente do estado de SP e 100 toneladas de Minas Gerais.

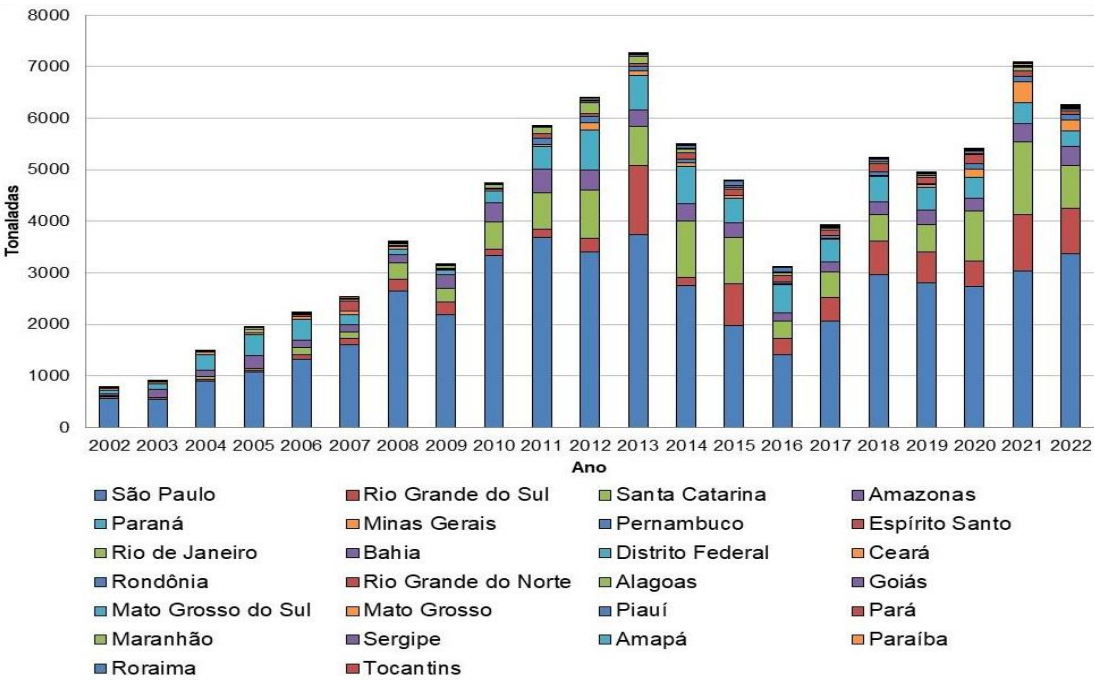
Além disso, é possível verificar que a exportação para o estado de São Paulo decresce de 2005 a 2008, o que é refletido no gráfico da Figura 43, onde há um aumento na importação de produtos com ímãs. Nesse caso infere-se que houve um remanejamento do mercado, aparentemente o consumo estava estável. Ainda, durante o período de 2008-2009 a economia brasileira sofreu uma desaceleração significativa. O PIB do Brasil cresceu apenas 0,3% em 2009, após ter crescido 5,1%

em 2008. Houve um aumento no desemprego devido à redução da atividade econômica e à diminuição da demanda por exportações. O mercado financeiro brasileiro também foi afetado, com quedas nas bolsas de valores e maior volatilidade nos mercados de capitais. O governo brasileiro implementou várias medidas de estímulo econômico para mitigar os impactos da crise, incluindo pacotes de estímulo fiscal e cortes nas taxas de juros. O mercado imobiliário dos Estados Unidos refletiu em vários setores da economia brasileira, interrompeu o crescimento do Ibovespa e afastou os investidores internacionais. Considerada por muitos economistas como a pior crise econômica desde a Grande Depressão (Paula; Pires, 2017). Embora o Brasil tenha enfrentado dificuldades durante a crise, o país conseguiu se recuperar relativamente bem em comparação com algumas economias desenvolvidas.

A Figura 43, apresenta um reflexo dos valores acumulados em toneladas dos dados de importação de ímãs, o que reflete no aumento para o mesmo período de 2005 a 2008. O país não havia estabilizado as exportações, e em 2011, infere-se que com as restrições no fornecimento de materiais críticos pela China o impacto na compra de matéria prima para uso em produtos brasileiros decresceu, reflexo na baixa em toneladas de ímãs para o ano, e crescimento na importação de produtos para o mesmo período.

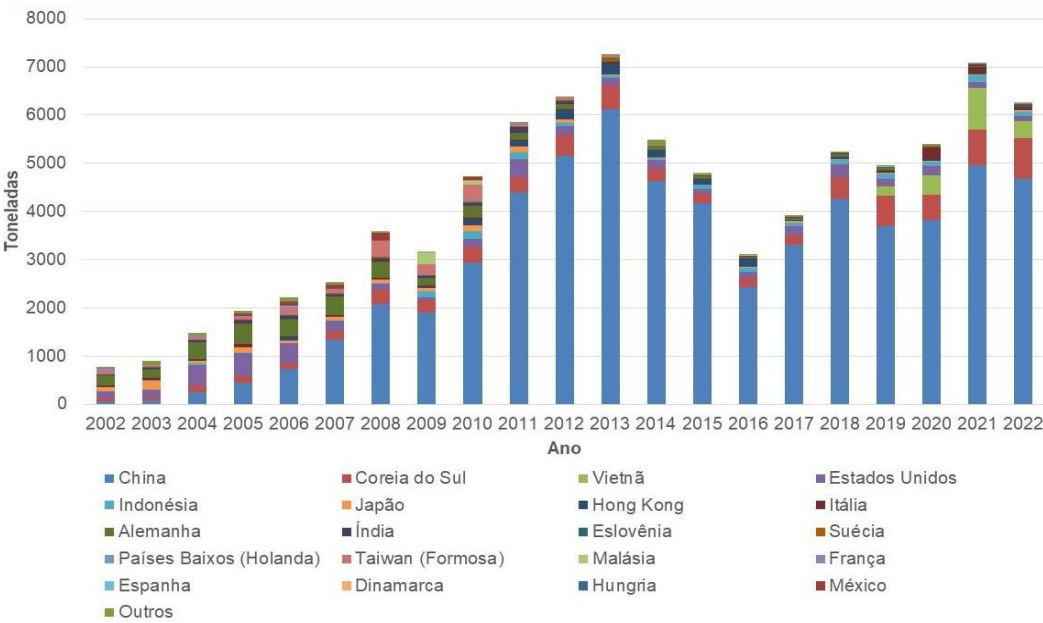
Em 2013 esse valor de importação chega a passar de 7000 mil toneladas com dez estados importando esses ímãs. O volume importado em maior quantidade compreende os estados de São Paulo, Rio Grande do Sul e Santa Catarina, o último refere-se a empresa multinacional de motores e geradores eólicos dada a necessidade de acoplar esses ímãs em seus produtos. A partir do ano de 2016 o mercado começa a estabilizar. Apesar da pandemia de COVID-19 o setor começou a crescer, o que é refletido na importação, inferindo-se o aumento da compra de eletroeletrônicos para trabalho *home office*. A quantidade importada supracitada é relacionada ao estado que comprou esse volume de produtos.

Figura 43 – Importação de produtos contendo ímãs ou artefatos destinados a tornarem-se ímãs após a magnetização (UF)



Assim, com o intuito de apresentar os países que mais importam para o Brasil foi realizado o gráfico exibido na Figura 44.

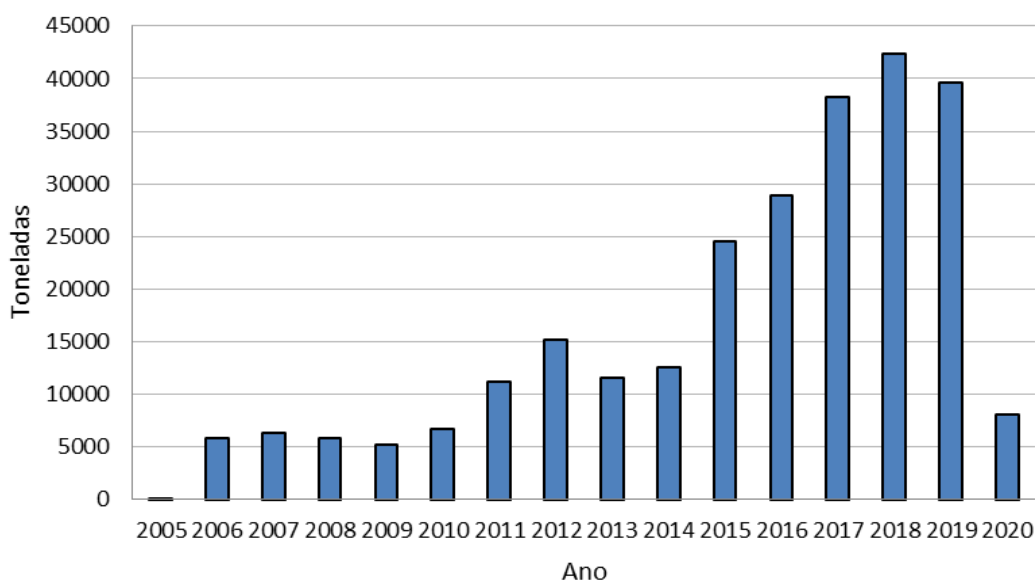
Figura 44 – Importação de produtos contendo ímãs ou artefatos destinados a tornarem-se ímãs após a magnetização com respectivos países de origem



Diante do gráfico acima, observa-se que as barras em volume condizem com os dados observados na (Figura 44). Assim, pode-se inferir que os dados analisados estão correlacionados. Além disso, o país que mais exporta como esperado é a China. Nos últimos três anos tivemos o Vietnã ganhando destaque. Assim, é importante reiterar que os dados analisados foram validados com um pesquisador tecnologista em informações e avaliações educacionais na Agência Nacional de Mineração (ANM), enfatizando um dos seus trabalhos com a matriz de relacionamentos de classificações de produtos e atividades econômicas do setor mineral (IPEA, 2022).

O gráfico representado na Figura 45, compila informações extraídas da Tabela 7752 - Produção e vendas dos produtos e/ou serviços industriais, segundo as classes de atividades e os produtos - Prodlist Indústria do ano de 2016 e 2019 em conjunto com dados extraídos da Tabela 5806 referentes ao ano de 2013, ambas obtidas por meio da Pesquisa Industrial Anual – Produto (IBGE, 2022)¹⁵.

Figura 45 – Produção de ímãs no Brasil anual no período de 2005 a 2020



Fonte: Autora a partir de (PIA-PRODUTO/IBGE, 2022)

Assim, o resultado em toneladas/ano no gráfico supracitado é referente a Prodlist produto, são dados exclusivos do estrato certo, isso significa que as empresas que compreendem da CNAE de código 2790.2130 - Ímãs permanentes, mantas e outros artefatos semelhantes com propriedades magnéticas, emprega 30 ou mais empregados formais, obtendo um número real da quantidade de ímãs de NdFeB em

¹⁵<https://concla.ibge.gov.br/busca-onlinecnae.html?view=subclasse&tipo=cnae&versao=10&subclasse=2790201>

território nacional. Pode-se verificar que para o ano de 2015 havia um total de 25.000 toneladas de ímãs de NdFeB e para o ano de 2018 houve um crescimento bem perceptível, totalizando 40.000 mil toneladas impactado pelo forte crescimento das energias renováveis no país (ABEEólica, 2023). A queda do volume no período de 2019 a 2020 pode-se inferir a pandemia do COVID-19, a qual afetou o fornecimento de matéria prima para uso nos produtos com alta tecnologia.

Por fim, ao realiza a análise quantitativa dos dados desse objetivo específico, os valores revelam um valor significativo de um volume de ímãs distribuído ao longo do território nacional, inferindo que há volume disponível para recuperação de material secundário. Esse volume de produtos pós-consumo é representado na seção 4.5.1, exibindo o estado atual da mineração urbana no Brasil. Além disso, identificou-se ainda que os produtos importados não são necessariamente consumidos no determinado estado em que os recebeu, havendo implicações negativas na rastreabilidade dos mesmos, sendo necessário um aprofundamento no mapeamento para produtos que usam ímãs. Assim, para ter uma visibilidade desse panorama optou-se por uma busca nas empresas cadastradas na CNAE 2790 abordada na seção a seguir.

4.5.2 Panorama geral das empresas de ímãs no Brasil

Nesta etapa primeiramente foi buscado as empresas que fazem parte da Classificação Nacional das Atividades Econômicas (CNAE 2790), com a finalidade de enquadramento dos ímãs de NdFeB, designados pela NCM como ímãs permanentes e artigos destinados a tornarem-se ímãs permanentes após magnetização.

No entanto, diante da dificuldade de encontrar as empresas cadastradas nessa CNAE 2790, optou-se por buscar a atuação em sites de busca de forma exploratória resultando em 15 empresas. Assim, a partir da busca nos CNPJs foi identificada a respectiva CNAE informada. A Tabela 14 exhibe as empresas registradas na CNAE 2790 e suas respectivas atividades econômicas, tanto primária, quanto secundária.

Tabela 14 – Empresas registradas na CNAE 2790

(Continuação)

Nº	Empresas	CNPJ	Estado	Endereço	CEP	CÓDIGO	DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE ECONÔMICA PRINCIPAL	CÓDIGO E DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES ECONÔMICAS SECUNDÁRIAS
1	Brasil Magnets	06.147.259/0001-46	SP	Rua Conde de Porto Alegre, 1905Campo Belo	04608-003	46.73-7-00	Comércio atacadista de material elétrico	33.14-7-99 - Manutenção e reparação de outras máquinas e equipamentos para usos industriais não especificados anteriormente 46.93-1-00 - Comércio atacadista de mercadorias em geral, sem predominância de alimentos ou de insumos agropecuários 47.13-0-02 - Lojas de variedades, exceto lojas de departamentos ou magazines 47.42-3-00 - Comércio varejista de material elétrico
2	Oximag	05.936.964/0001-60	SP	Príncipe de Gales, 256 Vila Príncipe de Gales	09060-650	28.29-1-99	Fabricação de outras máquinas e equipamentos de uso geral não especificados anteriormente, peças e acessórios	45.30-7-01 - Comércio por atacado de peças e acessórios novos para veículos automotores 46.49-4-99 - Comércio atacadista de outros equipamentos e artigos de uso pessoal e doméstico não especificados anteriormente 46.51-6-01 - Comércio atacadista de equipamentos de informática 46.52-4-00 - Comércio atacadista de componentes eletrônicos e equipamentos de telefonia e comunicação 64.62-0-00 - Holdings de instituições não-financeiras 77.39-0-99 - Aluguel de outras máquinas e equipamentos comerciais e industriais não especificados anteriormente, sem operador
3	Ital industria de equipamentos magnéticos	03.196.632/0001-60	SP	RUA SAN JOSE, 622 GALPAO622/648 - PARQUE INDUSTRIAL SAN JOSE	06715-862	27.90-2-99	Fabricação de outros equipamentos e aparelhos elétricos não especificados anteriormente	33.13-9-99 - Manutenção e reparação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos não especificados anteriormente 33.21-0-00 - Instalação de máquinas e equipamentos industriais
4	FKN FABRICA DE IMAS LTDA	20.267.054/0001-25	SP	R Sumidouro, 305 - Pinheiros	05.428-070	31.02-1-00	Fabricação de móveis com predominância de metal	46.72-9-00 - Comércio atacadista de ferragens e ferramentas 47.89-0-99 - Comércio varejista de outros produtos não especificados anteriormente 33.19-8-00 - Manutenção e reparação de equipamentos e produtos não especificados anteriormente

(Continua)

5	POLO MAGNETICO ACESSORIOS LTDA.	13.991.607/0001-22	RJ	RUA TRINTA E CINCO, 36 APT 3 - SESENTA	27261-140	47.89-0-99	Comércio varejista de outros produtos não especificados anteriormente	Não informada
6	Kort Fort	50.755.199/0001-36	SP	Avenida Paulista, 2202. Conj A7 - Cj. 71 Bela Vista	01310-932	47.83-1-01	Comércio varejista de artigos de joalheria	32.11-6-02 - Fabricação de artefatos de joalheria e ourivesaria 46.49-4-10 - Comércio atacadista de jóias, relógios e bijuterias, inclusive pedras preciosas e semipreciosas lapidadas 95.29-1-06 - Reparação de jóias
7	SUPER MAGNET	33.216.560/0001-37	SP	avenida Sapopemba, Sapopemba	03.374-000	46.89-3-99	Comércio atacadista especializado em outros produtos intermediários não especificados anteriormente	45.30-7-01 - Comércio por atacado de peças e acessórios novos para veículos automotores 45.30-7-03 - Comércio a varejo de peças e acessórios novos para veículos automotores 46.49-4-99 - Comércio atacadista de outros equipamentos e artigos de uso pessoal e doméstico não especificados anteriormente 46.51-6-01 - Comércio atacadista de equipamentos de informática 46.52-4-00 - Comércio atacadista de componentes eletrônicos e equipamentos de telefonia e comunicação 46.69-9-99 - Comércio atacadista de outras máquinas e equipamentos não especificados anteriormente; partes e peças 47.51-2-01 - Comércio varejista especializado de equipamentos e suprimentos de informática 47.52-1-00 - Comércio varejista especializado de equipamentos de telefonia e comunicação 47.59-8-99 - Comércio varejista de outros artigos de uso pessoal e doméstico não especificados anteriormente 47.89-0-99 - Comércio varejista de outros produtos não especificados anteriormente
8	IMA DO BRASIL IMPORTACAO E EXPORTACAO LIMITADA	49.447.329/0001-94	SP	Rua Tavares, 40 Jardim Sao Sebastiao Jaguariuna, SP	13.917-172	46.93-1-00	Comércio atacadista de mercadorias em geral, sem predominância de alimentos ou de insumos agropecuários	45.30-7-01 - Comércio por atacado de peças e acessórios novos para veículos automotores 46.41-9-01 - Comércio atacadista de tecidos 46.42-7-01 - Comércio atacadista de artigos do vestuário e acessórios, exceto profissionais e de segurança 46.43-5-02 - Comércio atacadista de bolsas, malas e artigos de viagem 46.84-2-99 - Comércio atacadista de outros produtos químicos e petroquímicos não especificados anteriormente 46.89-3-02 - Comércio atacadista de fios e fibras

								beneficiados
								82.11-3-00 - Serviços combinados de escritório e apoio administrativo
9	IMA SCHELLING BRAZIL MANUTENCAO DE MAQUINAS LTDA	26.719.478/0001-60	RS	Rua Conego Pedro Caspary, 600 - Andar 01 Sala 03	95.795-000	46.63-0-00	Comércio atacadista de Máquinas e equipamentos para uso industrial; partes e peças	28.29-1-99 - Fabricação de outras máquinas e equipamentos de uso geral não especificados anteriormente, peças e acessórios 33.14-7-99 - Manutenção e reparação de outras máquinas e equipamentos para usos industriais não especificados anteriormente
10	IMATEC SERVICOS MAGNETICOS LTDA	08.964.475/0001-00	SP	RUA DR. MOACIR DO AMARAL, 20 VILA SAO JOSE	13920-000	33.14-7-99	Manutenção e reparação de outras máquinas e equipamentos para usos industriais não especificados anteriormente	33.14-7-10 - Manutenção e reparação de máquinas e equipamentos para uso geral não especificados anteriormente 33.13-9-01 - Manutenção e reparação de geradores, transformadores e motores elétricos 33.13-9-99 - Manutenção e reparação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos não especificados anteriormente 46.14-1-00 - Representantes comerciais e agentes do comércio de máquinas, equipamentos, embarcações e aeronaves 46.63-0-00 - Comércio atacadista de Máquinas e equipamentos para uso industrial; partes e peças 47.89-0-99 - Comércio varejista de outros produtos não especificados anteriormente 28.69-1-00 - Fabricação de máquinas e equipamentos para uso industrial específico não especificados anteriormente, peças e acessórios 33.21-0-00 - Instalação de máquinas e equipamentos industriais 33.19-8-00 - Manutenção e reparação de equipamentos e produtos não especificados anteriormente 77.39-0-99 - Aluguel de outras máquinas e equipamentos comerciais e industriais não especificados anteriormente, sem operador
11	KOIMAS	74.690.439/0001-20	SP	Rua Simao Velho, 223 Terreo 229 - Vila Albertina	02731-090	46.69-9-99	Comércio atacadista de outras máquinas e equipamentos não especificados anteriormente; partes e peças	45.30-7-05 - Comércio a varejo de pneumáticos e câmaras-de-ar 46.49-4-03 - Comércio atacadista de bicicletas, triciclos e outros veículos recreativos 46.49-4-99 - Comércio atacadista de outros equipamentos e artigos de uso pessoal e doméstico não especificados anteriormente

(Conclusão)

12	SUL MAGNETICOS EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS	13.284.213/0001-34	RS	RUA CORUMBA, 88E100 LIBERDADE	93330-370	27.90-2-99	Fabricação de outros equipamentos e aparelhos elétricos não especificados anteriormente	33.13-9-99 - Manutenção e reparação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos não especificados anteriormente 46.63-0-00 - Comércio atacadista de Máquinas e equipamentos para uso industrial; partes e peças
13	H.S INDUSTRIA E COMERCIO DE COMPONENTES ELETRO- MAGNETICOS	96.377.494/0001-05	SP	Rua Eugenio Roncon, 1907- Roncon	09411-000	27.90-2-01	Fabricação de eletrodos, contatos e outros artigos de carvão e grafita para uso elétrico, eletroímãs e isoladores	33.13-9-99 - Manutenção e reparação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos não especificados anteriormente
14	IMAG INDUSTRIA E COMERCIO DE COMPONENTES ELETRONICOS	51.078.772/0001-87	SP	Rua Do Embaixador, 74Bairro Roncon	09410-650	26.10-8-00	Fabricação de componentes eletrônicos	28.69-1-00 - Fabricação de máquinas e equipamentos para uso industrial específico não especificados anteriormente, peças e acessórios 33.19-8-00 - Manutenção e reparação de equipamentos e produtos não especificados anteriormente
15	Flexmag Produtos Magneticos LTDA Flexmag	09.601.581/0001-91		Rua Domingas Galleteri Blotta, 148	04455-360	46.89-3-99	Comércio atacadista especializado em outros produtos intermediários não especificados anteriormente	Esta atividade compreende: - o comércio atacadista de outros produtos intermediários não agropecuários não especificados anteriormente - o comércio atacadista de artefatos de borracha, exceto para veículos e uso residencial - o comércio atacadista de partes, injetados e acessórios para calçados - o comércio atacadista de peças e acessórios para aparelhos de uso doméstico e pessoal, elétricos e eletrônicos - o comércio atacadista de cordas e cordoarias

Fonte: Autora (2023)

Na tabela 14, em termos quantitativos as empresas que existem no país são poucas. A partir dos dados coletados do CNPJ foi necessário entrar em contato com essas empresas e realizar as seguintes perguntas:

1. A empresa fabrica ímãs de NdFeB?
2. A empresa importa ímãs de NdFeB e ou óxidos de NdFeB?
3. Qual a quantidade de produto produzido pela empresa?

Das 15 empresas mapeadas 60% apresentam nomenclatura subentendendo que fabrica o ímã de NdFeB, porém compram para revenda, 30% comercializam produtos com ímãs e os outros 10% se enquadram em serviços/manutenção. Assim, foi possível verificar uma nomenclatura divergente no ramo das atividades relacionadas a essas empresas, pois a designação “indústria” não se aplica a produção fabril de ímãs de NdFeB somente dos ímãs de SmCo.

A Classificação Nacional da Atividade Econômica, identifica os aparelhos elétricos não especificados anteriormente. Logo, esta cesta genérica tem muitos itens descritos além dos ímãs de NdFeB. Por exemplo, nessas subclasses existem:

- Eletroímãs e isoladores;
- Equipamentos para sinalização e alarme;
- Fabricação de outros equipamentos; e
- Outros...

É imprescindível ressaltar que, o banco de dados da pesquisa industrial anual do IBGE, utilizado para obter a quantidade de ímãs de NdFeB contidos em território brasileiro foi explorado ao nível máximo de desagregação que existe, e que os mesmos ainda não são individualizados para essa proposta específica. Uma forma de rastreabilidade seria ter acesso às notas fiscais das empresas, sendo necessária a rastreabilidade desde o embarque em território internacional para o devido mapeamento do volume consumido por cada estado brasileiro. A próxima seção abordará as soluções tecnológicas com a alocação do nível de maturidade tecnológica das mesmas.

4.6 ATORES GLOBAIS DA CADEIA DE RECUPERAÇÃO DE MATERIAL SECUNDÁRIO

Nesta seção será identificado quem são os atores da cadeia de valor de ITR. Diante disso, pode-se relacionar i) os Produtores, que são responsáveis pela

estruturação dos empreendimentos de extração, processamento e beneficiamento dos bens minerais e atuam ainda com importação de insumos e exportação de bens semimanufaturados e manufaturados; ii) os consumidores: de pequeno e grande porte, que consomem os bens semimanufaturado ou manufaturado e realizam o descarte; iii) os recondicionadores ou remanufaturadores que recuperam peças, partes ou componentes para viabilizar o funcionamento e comercialização de bem pós-consumo na qualidade de produto reparado ou remanufaturado e iv) os recicladores que coletam e processam transformando os bens pós-consumo com o propósito de recuperação de recursos (materiais ou energia).

É importante destacar que a palavra reciclagem, compreende de ações das empresas Sinctronics, Umicore e Trampoo, para recuperar os materiais por meio do desmantelamento, segregação, caracterização, trituração, recuperação de materiais secundários e destinação (Xavier *et al.*, 2023).

Diante do entendimento relacionado ao termo reciclagem, que busca a indústria de transformação do material pós ou pré-consumo, foram mapeados a título de exemplo, as empresas que recuperam e reciclam os equipamentos eletroeletrônicos a nível global, conforme a Tabela 15.

Tabela 15 – Empresas de recuperação e reciclagem de equipamentos elétricos e eletrônicos do mundo

Empresas	País	Capacidade ton/ano
Electrocycling	Alemanha	300
UMICORE	Bélgica	300.000
Dongjiang	China	325.000
Green Eco-Manufacture	China	17.000
Eletronic Recyclers International	Estados unidos	453.592
Gle Scrap Metal	Estados unidos	113.4
Reciclagem Kuusakoski	Finlândia	150.000
E-Parisaraa	Índia	100.000
Environcom	Reino Unido	10.000
Sims Recycling Solutions	Reino Unido	475.000
Ionic Technologies	Reino unido	30
Cimelia Resource Recovery	Singapura	-
Enviro-hub Holdings	Singapura	3.600
Stena Metall Group	Suécia	600.000

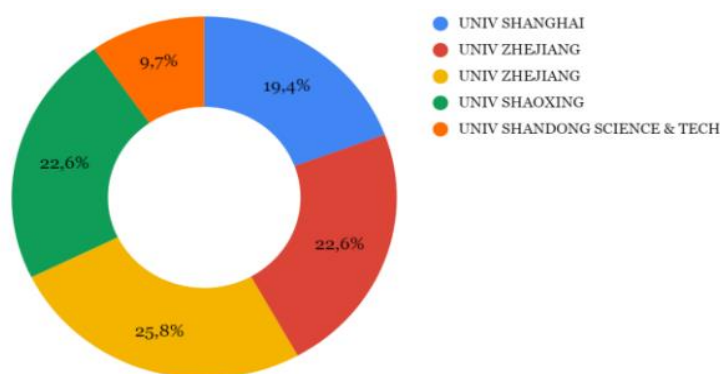
Fonte: Autora a partir da (web, 2023)

As empresas mapeadas compreendem uma alta capacidade produtiva. No entanto, os processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos foram identificados na empresa Kuusakoski¹⁶, na Finlândia em escala industrial, com designação de recuperação de sucata ferrosa, sucata de aço inoxidável, metais preciosos, sucata não ferrosa, sucata de alumínio, equipamentos elétricos, sucata de plástico, entre os materiais recuperados estão as pás das turbinas eólicas (kuusakoski web, 2023).

A Umicore com processos de lixiviação e extração eletrolítica de cobre, processos pirometalúrgicos e a refinaria de metais preciosos com sede na Bélgica, é focada de forma específica nos eletroeletrônicos de consumo. A empresa *Eletrocycling* faz a parte de desmantelamento e a empresa *Cimelia Resource*¹⁷ *Recovery* atende a destruição de dados com trituração dos materiais.

Assim, pode-se dizer que as soluções tecnológicas são variadas, conforme apresentado no capítulo do referencial teórico, os processamentos configuram desafios científicos e tecnológicos que motivaram a tese, haja visto uma busca no número (código) de patentes a respeito Patent No.: [US-9044834-B2], [EP 2 646 584 B1], [US-7163591-B2], [US-6533837-B1], [US 2020/0199709 A1], assim como os artigos publicados em periódicos especializados anteriormente. A Figura 46 apresenta um percentual das patentes e os respectivos titulares.

Figura 46 – Patentes x Titulares



Fonte: Adaptado de Pessoa et al. (2019)

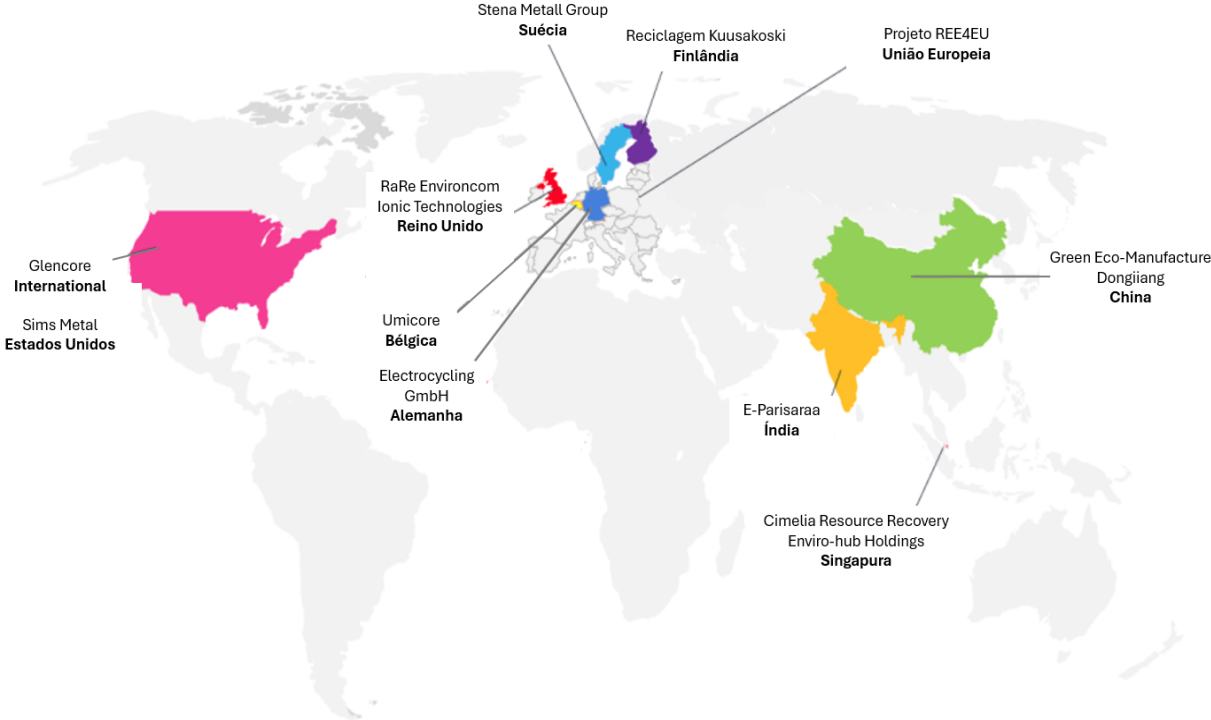
Podemos verificar neste gráfico acima os registros das ideias criadas por seus inventores que são em grande parte chineses, ou seja, há dominância dos chineses pelos registros de patentes.

¹⁶ <https://www.kuusakoski.com/en/global/>

¹⁷ <https://cimeliaglobal.com/about-us/>

O estado atual das empresas que transformam os ímãs de NdFeB são apresentados na Figura 47.

Figura 47 – Recicladoras mundiais que transformam o material pós-consumo



Fonte: Autora (2023)

Na sequência é exibido o Quadro 8, no qual exibe a escala das soluções tecnológicas a nível mundial. Pode-se verificar que as soluções tecnológicas escaláveis globalmente, ainda se encontram em estado inicial, algumas delas estão na transição da escala laboratorial para industrial.

Quadro 8 – Empresas mundiais de reciclagem de ímãs de NdFeB e equivalência

Responsável	Região	Escala
RaRe (Rare Earth Recycling for E-machines) e Hypromag	Reino Unido	Transição laboratorial - industrial
REE4EU (RARE EARTH RECYCLING FOR EUROPE)	União Europeia	Transição laboratorial - industrial
Ionic Technologies	Reino Unido	Piloto-Industrial
Umicore	Sediada na Bélgica, coleta na Alemanha, Brasil, China, França e Japão	Industrial

Fonte: Autora (2023)

Diante disso, é importante reiterar o porquê de se reciclar os ímãs de NdFeB. Em poucas palavras, a MU recupera valor dos materiais que já existem e evita a exploração de novos recursos naturais. Além disso, há estoque de material secundário a ser explorado. Há uma preocupação na destinação adequada aos equipamentos produzidos, de forma a atender às legislações.

Em suma, é uma estratégia global, a União Européia estima uma capacidade de atendimento de 50% da demanda em 2030 a partir de ímãs reciclados (Nlebedim; King, 2017). A Umicore é líder mundial na reciclagem de resíduos eletroeletrônicos, incluindo baterias, catalisadores automotivos e recupera mais de 20 metais diferentes a partir de resíduos complexos, incluindo ímãs permanentes, que frequentemente contêm ETR como neodímio, disprósio e praseodímio, contribuindo para a economia circular e reduzindo a necessidade de mineração primária. A planta de reciclagem em Hoboken, na Bélgica, é uma das maiores e mais eficientes do mundo, processando até 350.000 toneladas de resíduos por ano. Ela utiliza processos avançados de reciclagem hidrometalúrgica e pirometalúrgica. O valor de mercado dos elementos de terras raras recuperados pode compensar os custos operacionais, tornando a reciclagem economicamente viável a longo prazo (Umicore, n.d.).

Em um outro estudo, Ding, Havey e Wang (2020) abordaram os custos de matéria prima, processamento e os lucros de produzir Dy, Nd e Pr a partir de ímãs pós-consumo, conforme exhibe a Tabela 16.

Tabela 16 – Custos de matéria prima, processamento e lucros a partir de ITR pós-consumo

ETR	(%) em peso	Custo de produção estimado (\$ por kg ETR)	Custos de matéria prima (\$ por kg ETR)	Preço de mercado (\$ por kg ETR)
Nd	27	1	19	52
Pr	4	6	2,8	93
Dy	1,5	15	0,2	298
Receita de REEs (\$ por kg de matéria prima)	Custo médio de produção (\$ por kg de matéria prima)	Custos de matéria prima (\$ por kg de matéria prima)	Lucro (\$ por kg de ração)	
22.2	6 ± 2	11 ^a		

Fonte: Adaptado de Ding, Havey e Wang (2020)¹⁸

¹⁸ <https://engineering.purdue.edu/WangLab>

No estudo supracitado, o custo dos ímãs de resíduos foi estimado em US\$11 por kg de ímãs de resíduos (incluindo o custo de desmontagem de HDDs e o custo de coleta de ímãs). Esse estudo foi patenteado e demonstrou com sucesso a possibilidade de separar os metais de terras raras sem os efeitos ambientais devastadores dos métodos convencionais à base de ácido, com alto rendimento e pureza.

Entretanto, o estado atual dos produtos pós-consumo no Brasil está sendo exportado por empresas estrangeiras e enviados para outros países que detêm tecnologia adequada para a transformação mineral, conforme ilustra a figura 48.

Figura 48 – Produto pós-consumo enviados para transformação em países que detêm de soluções tecnológicas para extração de material secundário



Fonte: Autora (2022)

A seção a seguir irá abordar as soluções tecnológicas e os níveis de maturidade, bem como visitas aos laboratórios que estão com pesquisas em andamento relacionadas à recuperação de material secundário.

4.7 SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS E NÍVEIS DE MATURIDADE

Nesta seção, abordaremos o nível de maturidade das soluções tecnológicas para a recuperação de material secundário. O conceito de maturidade relacionado a

processos gerenciais foi introduzido por Crosby em 1979, no “Aferidor de Maturidade da Gerência de Qualidade” (Quintella; Rocha, 2007).

A discussão inicia-se a partir de críticas aos processos de produção em larga escala de ímãs de NdFeB no país, com base na seguinte questão: como podemos implementar processos de recuperação desse material?

Para responder a essa questão, apresenta-se a categorização das soluções tecnológicas identificadas na RSL. Essa etapa também inclui relatos de entrevistas com os envolvidos na cadeia de produção de ímãs de NdFeB no Brasil. Os resultados obtidos dialogam com a seção 4.1, que descreve os processos de recuperação de material secundário, incluindo cominuição, classificação, separação, pirometalurgia, hidrometalurgia, eletrometalurgia e biometalurgia. O nível de maturidade é referido de acordo com o exposto no capítulo 3 da metodologia desta tese e ilustrado na figura 49.

Figura 49 – Classificação dos níveis de maturidade nas soluções identificadas no estudo

	Nível	Descrição dos níveis de maturidade		Soluções tecnológicas identificadas	Nível
Conceito Desenvolvimento Produto	1	Conceitual		Hidrometalurgia	7
	2	Conceito de manufatura		Extração de fluido supercrítico	3
	3	Processo de manufatura demonstrado (fazer funcionar)		Procedimento de lixiviação	3
	4	Validação em laboratório		Biohidrometalurgia	4
	5	Validação em ambiente relevante com configuração fiscal		Reutilização direta	6
	6	Tecnologia em escala de teste sem alcançar escala final		Reação de redução Ca	2
	7	Protótipo do demonstrador do sistema em ambiente operacional		Extração de solvente	7
	8	Sistema totalmente completo, testado, qualificado e demonstrado (tecnologia em comissionamento ativo)		Pirometalúrgicas	7
	9	Uso do produto em todo seu alcance e quantidade. Produção estabelecida		Combinação de Piro + Hidrometalúrgico	8
				Hidrogenação-Desproporção-Dessorção-Recombinação (HDDR)	6
				Aerometalúrgica	1
				Eletropirometalurgia	3
				Decapitação por Hidrogênio (HD)	4

Fonte: Autora (2023)

A Figura 49 atribui um valor de maturidade aos processos de recuperação de material a partir de ímãs de NdFeB, considerando a literatura e relatos da cadeia de ímãs no Brasil.

Os processos hidrometalúrgicos mostram um nível de maturidade elevado, sendo os mais utilizados industrialmente, apesar da existência de abordagens mais ecológicas e sem ácido, como relatam Umicore (2023), Amato et al. (2019) e Yue et al. (2019). Embora os processos pirometalúrgicos sejam escaláveis, utilizam uma

quantidade excessiva de produtos químicos e requerem processamento adicional, conforme Lee et al. (2017) e Tunsu et al. (2015).

Além disso, muitos processos estão em desenvolvimento no Brasil. Uma visita ao Centro Tecnológico Mineral em 10 de junho de 2022 ilustra isso, onde o professor Dr. Ysrael apresentou um processo contínuo de extração por solvente para recuperar elementos de terras raras. Neste processo, duas soluções são colocadas em contato para separar Hólmio (Ho) e Disprósio (Dy), que, devido à sua similaridade química, são extremamente difíceis de separar. O Dy é utilizado em ímãs que mantêm seu campo magnético em altas temperaturas, enquanto o Ho tem aplicações na indústria médica. A figura 50 ilustra o processo de extração por solvente, que é uma etapa do processo hidrometalúrgico.

Figura 50 – Planta de extração por solvente - CETEM



Fonte: Autora (2022)

A Figura 50, ilustra o licor do elemento puro e o processo contínuo de extração, que ocorre após a lixiviação dos dois elementos em concentrações diferentes, com base no pH ideal da solução de alimentação e no extratante escolhido. Os parâmetros do processo, como o número de estágios e a razão das vazões orgânica e aquosa (processo em regime contínuo), são definidos.

Na planta de extração por solvente, a solução é alimentada por um extremo (a solução aquosa é alimentada pelo lado direito e a solução orgânica é alimentada pelo

lado esquerdo), fluindo em direções opostas, o que aumenta a eficiência e melhora as separações, ou seja, em contra a corrente. Porém, se elas entrassem juntas seria concorrente. Usa-se contra a corrente, pois se produz mais eficiência obtém melhores separações e isso faz parte do estudo apresentado.

A planta conta com 10 células (estágios); a solução aquosa é alimentada a 8 ml por minuto e a orgânica a 20 ml por minuto. A solução orgânica extrai seletivamente o elemento de maior afinidade, o Ho, capturando todo o Ho e parte do Dy. Assim, obtém-se um refinado com 95% de pureza em Dy, a partir de uma composição de 2 g/L de Ho e 6 g/L de Dy na solução de entrada, que é sintética e simula o licor do minério de monazita, com um nível de maturidade de 3 a 4.

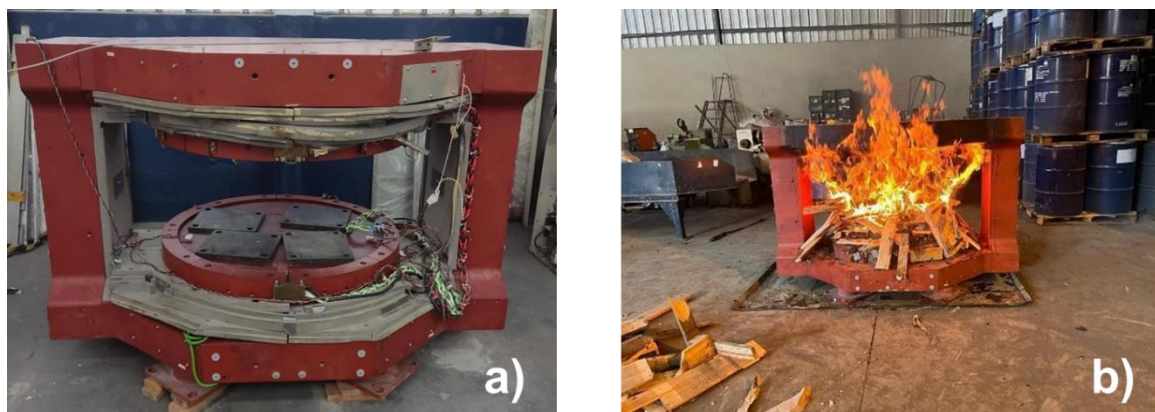
O Laboratório de Materiais Magnéticos (MAGMA) da Universidade Federal de Santa Catarina avançou na solução tecnológica via processamento HD a partir de ímãs de NdFeB pós-consumo. Esse progresso foi apresentado no encontro anual do INCT de Terras Raras (GraNioTer Meeting, 2022), realizado em 6 e 7 de dezembro de 2022. Durante o evento, foram discutidos três desafios na recuperação de ímãs de aerogerador pelo processo HD: remoção do revestimento e desmagnetização, adequação da infraestrutura e restauração das propriedades originais do ímã, categorizando o estudo em semipiloto.

A próxima seção aborda a mineração urbana desses produtos e a fragmentação do ímã de NdFeB, com base na entrevista realizada com a empresa D, representando uma organização estrangeira que faz a mineração urbana dos ímãs no território nacional.

4.7.1 Mineração Urbana de produtos pós-consumo no Brasil

Nessa seção é apresentada como a mineração urbana é realizada no Brasil, conforme a entrevista com a Empresa D, consolidando uma visão macro da mineração urbana de equipamentos como turbinas eólicas, motores elétricos e equipamentos de ressonância magnética no Brasil. A Figura 51 apresenta um equipamento de ressonância magnética pós-consumo em território nacional.

Figura 51 – Equipamento de ressonância magnética desmantelado



Fonte: Autora com autorização da (empresa D, 2023)

A Figura 51 (a) exibe uma parte do equipamento de ressonância magnética com os respectivos ímãs de NdFeB, na Figura 51 (b) essa parte do equipamento de ressonância magnética é colocado fogo, observa-se as chamas na imagem. Este é o processo de queima, realizado de maneira a desmagnetizar o campo magnético que os ímãs contêm para facilitar o desmantelamento dos mesmos. Em cada lado do equipamento de ressonância magnética, foram retirados 100 blocos de ímãs de NdFeB, totalizando 1320 kg entre as duas partes.

Na Figura 52, a imagem (c) mostra que as chapas metálicas de níquel ao redor dos ímãs foram atraídas. Após a queima, a resina epóxi foi derretida (imagem d), e a separação para a retirada do ímã foi feita manualmente.

Figura 52 – Remoção do revestimento de níquel



Fonte: Autora com autorização da (empresa D, 2023)

A Figura 53, conforma a informação do entrevistado, mostra as imagens (e) e (f) dos blocos de ímãs de NdFeB da turbina eólica, com cada bloco pesando cerca de

200 gramas. É importante notar que os ímãs recuperados já estão desmagnetizados e embalados para transporte.

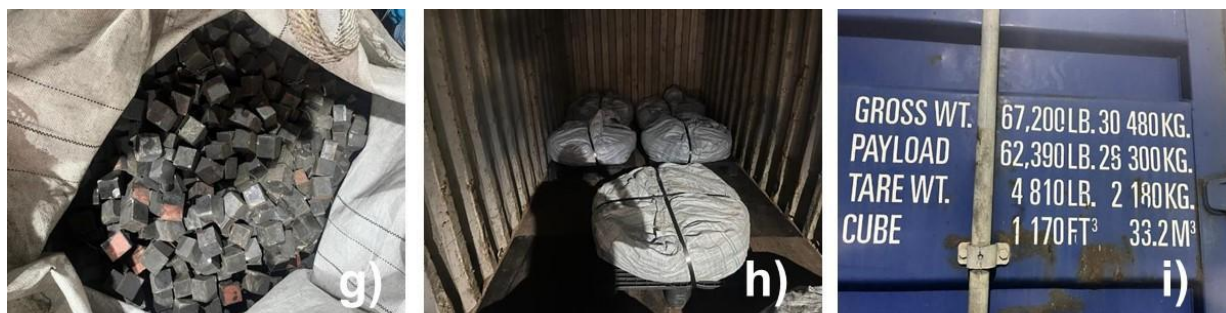
Figura 53 – Ímãs de NdFeB embalados para transporte



Fonte: Autora com autorização da (empresa D, 2023)

A Figura 54 mostra as imagens (g) e (h) dos materiais em *bags*, que são colocados em um container para viagem (imagem i) e posterior extração do material secundário. Nesta etapa, é necessário cuidar da disposição das *bags*. Segundo dados de fevereiro de 2023 obtidos em entrevista com reciclador, o valor aproximado para 8 toneladas de ímãs de NdFeB destinados à exportação é de R\$31.000,00.

Figura 54 – Ímãs de NdFeB sendo transportados para extração de material secundário



Fonte: Autora com autorização da (empresa D, 2023)

É importante destacar que os ímãs pós-consumo são desmontados (processados) pelo setor informal, o que representa riscos à saúde humana e impactos ambientais. Conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), é obrigatória a implementação do Sistema de Logística Reversa (SLR) para produtos eletroeletrônicos e seus componentes.

Em 2020, o Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro, regulamentou a Logística Reversa obrigatória dos produtos eletroeletrônicos de uso doméstico no Brasil (BRASIL, 2020). De acordo com o Decreto nº 10.240/2020 é vedado qualquer tipo de comercialização, doação, transferência ou outra forma de destinação dos resíduos eletroeletrônicos descartados ou armazenados, nos pontos de recebimento ou nos pontos de consolidação a outros que não estejam sob o Sistema de Logística Reversa (SLR).

Para consolidar os benefícios ambientais e econômicos da recuperação dos ETR de ímãs de NdFeB, é essencial fortalecer a aplicação dessas regulamentações, promovendo a formalização das práticas de desmantelamento e incentivando o desenvolvimento de emprego e renda formalmente no setor de ímãs permanentes.

Desta forma, o Brasil pode não apenas reduzir os impactos ambientais de futuros processos de recuperação/reciclagem, mas também fomentar uma economia circular robusta e sustentável. Com os dados reais da coleta, desmantelamento e destinação atual na prática do material pós-consumo minerado no Brasil o que torna essa pesquisa pioneira, consolidando a questão sobre a existência de volume para prática de reciclagem nacional.

Na próxima seção será abordada a recuperação de materiais pós-consumo envolvendo os atores da cadeia de ímãs de NdFeB nacionais, bem como um estudo de pré-viabilidade de um dos processos realizados para recuperação de materiais secundários a partir de ímãs de NdFeB.

4.8 RECUPERAÇÃO DE MATERIAL PÓS-CONSUMO ENVOLVENDO ATORES DA CADEIA DE ITR NO BRASIL

Esta seção apresenta os resultados de um conjunto de questões dos roteiros nos apêndices A e B. As organizações participantes do estudo foram identificadas como Empresa A, Empresa B, Empresa C, LabFabITR (reciclador/produtor) e Empresa D (estrangeira), conforme detalhado na seção anterior com dados sobre a destinação do material pós-consumo minerado no Brasil. Os nomes das empresas permanecem em sigilo devido a um acordo entre as partes. É importante ressaltar que a pesquisa se concentra nos insumos, sendo os ímãs de NdFeB considerados componentes que essas empresas fabricam ou importam para a indústria eletroeletrônica.

4.8.1 Empresa A

A entrevista com a empresa A, atuando como indústria produtora de produtos que contém ímãs de NdFeB, esclareceu as práticas e possibilidades de recuperação de ímãs. Desde 2019, a empresa investiu 100 milhões de reais apenas na importação de ímãs para o setor de energia. O processo de recebimento dos componentes importados resulta em pouco ímã danificado, e durante o processo produtivo de acoplamento no produto os não conformes são acumulados para descarte posterior. Observou-se que os ímãs são fixos com silicone industrial de alta aderência, o que dificulta o descomissionamento pós-consumo. Além disso, uma resina industrial de alta aderência também é utilizada, complicando ainda mais esse processo. Portanto, compreender na prática os processos industriais que utilizam ímãs é essencial para que a academia desenvolva estudos aplicáveis ao mercado.

Dessa forma, a entrevista ajudou a esclarecer dúvidas sobre as atividades produtivas e aprofundou o conhecimento necessário para futuras estratégias circulares na cadeia de suprimentos de ímãs de NdFeB. As informações foram obtidas por meio do engajamento com a Empresa A, em novembro de 2022, durante uma visita técnica à fábrica, onde a pesquisa de doutorado foi apresentada para demonstrar interesse pela organização. Foi discutida a importância estratégica da recuperação e reciclagem de ímãs de NdFeB, visando incentivar a empresa a se envolver na mineração urbana de produtos pós-consumo, especialmente motores e aerogeradores que utilizam esses ímãs, dentro do contexto da economia circular. Também foram abordados os desdobramentos da pesquisa, que seguirá com futuras teses, integrando a academia ao setor industrial.

A seguir, apresenta-se um breve roteiro da visita à fábrica da Empresa A:

- Central de Recepção e Inspeção de Materiais: Foi discutido o procedimento de recebimento dos ímãs, incluindo a inspeção da qualidade e o armazenamento ou encaminhamento para o setor de materiais não conformes.
- Central de Valorização de Resíduos: observou-se a separação de materiais por volume e categorias para descarte, conforme ilustrado na Figura 55.

Figura 55 – Central de valorização de resíduos



Fonte: Autora (2022)

- Central de Fabricação de Motores: Foi possível acompanhar o acoplamento manual dos ímãs, constatando-se um baixo volume de ímãs danificados, que são acumulados para descarte posterior como metal comum.
- Central de Magnetização: A magnetização ocorre apenas para os ímãs de motores, pois os ímãs para geradores já são fornecidos magnetizados.
- Central de Suprimentos: Foram discutidos dados quantitativos sobre a importação de ímãs.
- Central de Recepção e Inspeção: Foi apresentada a verificação das caixas de ímãs recebidas dos fornecedores.
- Central de Fabricação de Aerogeradores: Foi possível acompanhar a montagem de um gerador.

Assim, após a visita a empresa foi realizado o roteiro de entrevista diante do conhecimento prático pré-estabelecido de forma remota no segundo semestre de 2023. As respostas das entrevistas estão categorizadas em: gestão, recuperação de materiais, informações técnicas/reciclagem e ações futuras. Sendo elas descritas a seguir:

Resposta 1. Gestão:

- *“A empresa não dispõe, até o momento, de um programa específico para a reciclagem de produtos com ímãs ou para o recebimento de ímãs em fim de*

vida útil, uma vez que, devido à durabilidade dos equipamentos fabricados, ainda não houve retorno desses produtos;

- *A inspeção dos ímãs é feita por amostragem. Alguns itens tem plano de inspeção dimensional, outros envolvem ensaio de remanência e curva de desmagnetização;*
- *Os ímãs fora do padrão, não conformes, são separados, desmagnetizados e descartados como sucata ferrosa;*
- *Os ímãs são importados da China;*
- *A empresa segue diversas legislações relacionadas a substâncias restritas aplicáveis a equipamentos eletroeletrônicos; contudo, até o momento, não foi identificada nenhuma legislação específica voltada para ímãs”.*

Resposta 2. Recuperação de materiais:

- *“O grau de corrosão dos ímãs não é checado, conforme o entrevistado, o motivo é a taxa de falha muito baixa;*
- *Ainda não se tem um relacionamento com o cliente no pós-consumo, com a finalidade de recolher o produto, não há uma definição da empresa quanto a isso;*
- *Quanto aos fornecedores a informação é sigilosa e não foi possível o acesso;”*

Resposta 3. Informações técnicas/reciclagem

- *“Os ímãs são magnetizados antes de serem montados, na própria empresa, nos casos dos motores, de forma manual. Nos aerogeradores os mesmos são comprados magnetizados e inseridos no rotor de forma mecanizada, devido seu tamanho e força de atração”.*

Nesta etapa da entrevista não foi permitido a liberação de fotos que ilustrassem o processo. Porém foi enviada uma imagem para ilustrar, conforme a Figura 56.

Figura 56 – Ilustração da distribuição de ímãs de aerogerador magnetizados



Fonte: Empresa A (2023)

Os ímãs vêm em uma caixa de papelão, encaixados em um molde de isopor. Quatro por caixa no formato da figura acima. Desta forma fecha-se o circuito

magnético, e não é necessária blindagem magnética. Diante da entrevista foi aplicado o roteiro em forma de conversa e obtido mais informações como:

- *“Sobre o revestimento epóxi. Não há informação sobre a composição química deste revestimento;*
- *Até o presente momento, não houve devolução de produtos contendo ímãs, devido à longa vida útil dos equipamentos fabricados pela Empresa A. Por esse motivo, ainda não foi possível realizar a avaliação e definição do processo de reciclagem desses produtos ao final de seu ciclo de vida”.*

A empresa não tem resposta para um sistema de produção de material secundário, pois o assunto é recente. O desmantelamento do aerogerador/motor pós-consumo foi mencionado, no que tange o interesse da organização para fazer uma análise aprofundada obteve-se as seguintes respostas:

- *“Ainda não realizamos, mas não quer dizer que não poderemos realizar no futuro. O motivo por não ter feito isso ainda é pela vida útil dos equipamentos. Temos um contrato de O&M (Manual de Operação e Manutenção contendo instruções para a operação e serviços de manutenção dos Aerogeradores) de 20 anos, sendo que o aerogerador com maior tempo de operação gira em torno de 6 anos.*
- *A empresa não tem conhecimento dos possíveis compradores do ímã reciclado, pois esse assunto ainda não foi discutido em profundidade, e também porque não há fabricantes de ímãs no Brasil.”*

Os resultados aqui descritos são extremamente importantes para a pesquisa, o que torna essa pesquisa pioneira na contribuição da mineração urbana no país. A finalidade do levantamento de dados a partir das perguntas levantadas na tese é com intuito de compreender as práticas e possibilidades de recuperação de ímãs, e entender a perspectiva da empresa sobre o assunto. Foi possível verificar durante o relato da entrevista que desde 2019, somente com a importação de ímãs para energia, a empresa despendeu um montante equivalente a 100 milhões de reais.

Verificou-se que há pouco volume de ímã danificado nesta etapa, os quais são acumulados para posterior envio para descarte. Ainda, foi observado que os ímãs são fixados com um silicone industrial de alta aderência, fato que é prejudicial ao descomissionamento do ímã pós-consumo. Além disso, também é aplicado uma resina industrial de alta aderência, não facilitando o descomissionamento do ímã pós-consumo. Constatou-se que a empresa não realiza a separação de ímãs do processo produtivo e do pós-consumo.

Diante disso, conhecer na prática os processos industriais que utilizam ímãs é fundamental para que a academia desenvolva estudos aplicáveis ao mercado. Assim, foi possível sanar dúvidas em relação às atividades produtivas e aprofundar o conhecimento necessário à futuras projeções para estratégias circulares no setor de ímãs de NdFeB.

4.8.2 Empresa B, Empresa C e Laboratório Fábrica de Ímãs de Terras Raras

Nesta etapa o roteiro de entrevistas foi aplicado em dois momentos. No Bloco 1 foi identificado que a Empresa B e C trabalham com resíduo eletroeletrônicos. No Bloco 2 foi questionada a visão técnica sobre recuperação/reciclagem dos produtos eletroeletrônicos.

A primeira armazena os ímãs retirados do HD, ainda que em pouca quantidade. A Segunda envolve-se mais com lâmpadas fluorescentes, optou-se por essa empresa por já fazer parte de projetos ligados à academia desde 2007.

A Empresa C relatou que “há três anos atrás verificou que o mercado estava promissor para reciclagem das lâmpadas de led”. Com crescimento no setor, a pessoa entrevistada, mencionou o apoio da EMBRAPII (Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação) – IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) - Empresa C.

Primeiramente a empresa iniciou a etapa de caracterização com entidades acadêmicas, do led de todos os tipos de lâmpadas (tubulares ou não). Foi verificado que no led tem metal, vidro, material perigoso como o Chumbo que é utilizado para fixar o diodo na placa de led. Conforme o entrevistado “tecnologias para recuperar material secundário de produtos como lâmpadas de led se encontra incipiente”. Relatou também que na Alemanha no Fraunhofer há estudo/extração dos ETR a partir das lâmpadas de led, para avaliar a viabilidade ou não, face a pequena quantidade de ETR que tem nos diodos de led.

A segunda parte foi desenvolver um processo tecnológico para extração dos ETR com um protótipo de equipamento, que gerou uma patente em nome da Empresa C e o IPT. O primeiro estágio dessa planta já foi construído que é a parte do desmantelamento do eletrônico. Para desmantelar o eletrônico a segunda parte de peneiramento e separação magnética está se consolidando. Esse eletrônico vai ser o material de entrada para um outro projeto, no qual buscam o apoio da EMBRAPII,

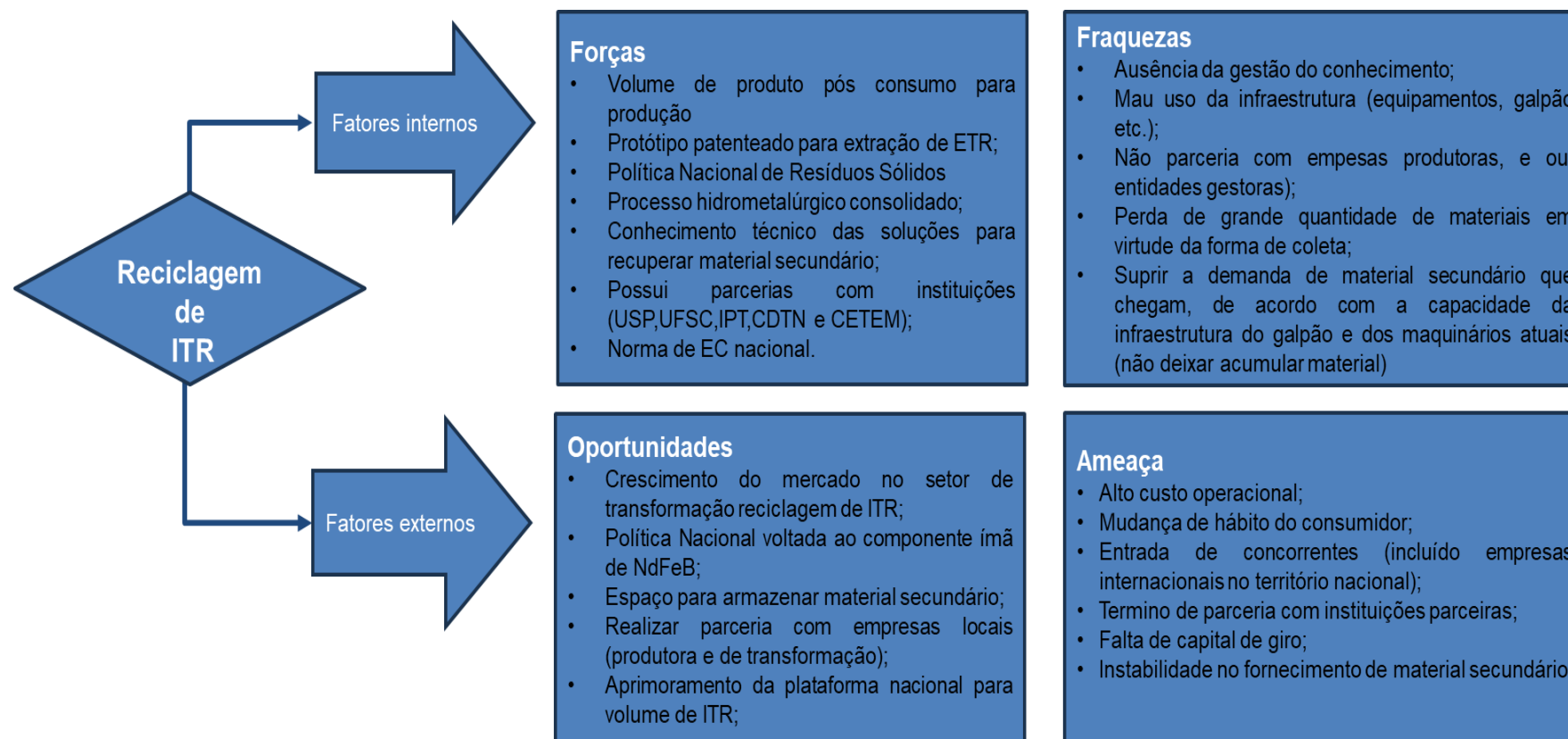
para implementação de um processo pirometalúrgico ou hidrometalúrgico para extrair os metais preciosos, como o ouro e prata.

Nessa entrevista evidenciou-se que o IPT não consolidou qual solução tecnológica irá trabalhar. Conforme o entrevistado a Empresa C, primeiramente teria que mandar um volume para início do processo, ainda em testes para desmantelamento para entender o que tem no eletroeletrônico, por meio da análise química. Nessa etapa abre-se uma oportunidade para outros desenvolvimentos de outras pesquisas, pois a caracterização das fitas de led não ocorreu. Porém, a Empresa C já desmantelou aproximadamente 20 kg de fitas de led para a pesquisa de identificação das terras raras que contém os diodos em outras instituições como, mencionado pelo entrevistado, será realizada essa pesquisa no CETEM, tendo em vista a infraestrutura para realização do mesmo.

Conclui-se que a Empresa C mostrou interesse em poder reciclar os ímãs advindos de HD, pois essa solução tecnológica que está em andamento poderá dar subsídio para outros produtos. Porém, a Empresa C está ciente dos desafios da reciclagem. No que tange a saber quem são os clientes e fornecedores, também é desconhecido pela organização, tanto da Empresa C, quanto da B, no qual oportuniza trabalhos acadêmicos na identificação desses clientes e fornecedores relevantes para a temática da cadeia de valor dos ímãs.

A próxima etapa consistiu em consolidar as informações do roteiro de entrevista com a Análise *SWOT* (Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças), conforme apresentado no capítulo da metodologia (Figura 57).

Figura 57 – Representação dos resultados obtidos com a aplicação da matriz *SWOT*



Fonte: Autora (2023)

Os fatores internos relacionados a fraquezas são a ausência de uma gestão eficaz do conhecimento pode prejudicar a continuidade e o aprimoramento dos processos; a infraestrutura Subutilizada, ou seja, infraestrutura existente (equipamentos, galpões) não está sendo utilizada de maneira otimizada. A falta de parcerias com empresas produtoras ou entidades gestoras que limita o alcance e a eficiência das operações, bem como a perda de materiais com a forma de coleta atual.

As forças identificadas durante as entrevistas foram fundamentais para entender os pontos fortes das empresas. Entre elas, destacam-se a disponibilidade de grandes volumes de produtos pós-consumo para produção é um ponto forte significativo. A existência de um protótipo patenteado para extração de ETR representa um avanço tecnológico. A colaborações com instituições renomadas (USP, UFSC, IPT, CDTN, CETEM) fortalecem a pesquisa e desenvolvimento no setor. Um processo hidrometalúrgico consolidado é uma vantagem técnica importante.

Para os fatores externos destacam-se o setor de transformação e reciclagem de ITR que está em expansão, oferecendo oportunidades de crescimento. A criação de políticas nacionais específicas para ímãs de NdFeB que podem fortalecer o setor. O estabelecimento de parcerias com empresas locais pode ampliar a capacidade de reciclagem e transformação.

Entre as ameaças para a reciclagem de ITR estão os custos operacionais elevados que representam uma ameaça à sustentabilidade econômica das operações. A entrada de concorrentes, inclusive internacionais, que pode aumentar a competição e pressionar os preços, bem como a inconsistência no fornecimento de material secundário pode afetar a continuidade das operações.

Os resultados indicam que a matriz *SWOT* integra elementos internos e externos, facilitando escolhas estratégicas e a formulação de linhas de ação. Ela ajuda na reflexão, identificação, análise e decisões que impactam diversos níveis organizacionais, destacando aspectos que promovem a circularidade dos materiais secundários. Entre os fatores identificados, destaca-se a vantagem competitiva, visando garantir sucesso e sustentabilidade a curto, médio e longo prazo.

Uma abordagem sistemática surgiu da *SWOT* e será adotada nesta pesquisa, incluindo a coleta de dados sobre o processo de reciclagem semipiloto, a análise dos métodos de fabricação empregados e a avaliação dos insumos utilizados, como pré-análise da viabilidade do processo HD, que se encontra em estudo no laboratório de materiais magnéticos da UFSC, como complemento a esta pesquisa.

4.8.3 Pré-análise da viabilidade do processo HD

Nesta seção é relatado o processo observado diante de uma solução tecnológica em fase laboratorial, que pode ser escalada industrialmente, com algumas estimativas de gastos reais. Assim segue na prática a solução tecnológica direta, inferindo-se os gastos e Infraestrutura.

Observação 1: Este breve relatório leva em consideração o processamento de ímãs pós-consumo via rota curta (*magnet-to-magnet short-loop approach*), onde os ímãs em fim de vida servem como o material de entrada, e são introduzidos no processo convencional de metalurgia do pó a partir do processo de decrepitação por hidrogênio (*Hydrogen Decreptation – HD*).

Observação 2: Primeiramente, será apresentada uma breve descrição do processo e uma estimativa de gastos do processo partindo de uma infraestrutura já estabelecida. Levando em conta a entrada de 1 kg de ímãs pós-consumo. Em seguida, serão apresentados os equipamentos necessários para construir esta estrutura mínima de processamento, incluindo valores estimados de cada item.

Observação 3: Para o levantamento de gastos, quatro pontos foram desconsiderados: (1) custos referentes à equipe necessária (custos de contratação de pessoal), pois isto varia de acordo com a formação de cada um, o tipo de contratação e etc.; (2) custos voltados para aquisição da matéria prima (valor do resíduo pós-consumo), do desmantelamento de equipamentos e transporte dos ímãs em fim de vida obtidos – não temos um valor-base para isso, pois os ímãs pós-consumo foram disponibilizados e a coleta/transporte não foram cobrados; (3) custos voltados para a usinagem, pois esta é outra etapa não explorada nesse processamento e; (4) custos voltados para o revestimento dos ímãs, outra etapa não explorada no nesse processamento.

Observação 4: Vale ressaltar que esta solução tecnológica para a recuperação de material secundário representa um *down-cycling* (processo de reciclagem em que materiais são transformados em produtos de menor qualidade ou com menor valor funcional comparado ao material original), ou seja, os ímãs reciclados não possuem as mesmas propriedades dos ímãs pós-consumo, tendo em torno de 70-80% das propriedades magnéticas originais. Caso se deseje uma recuperação plena das propriedades, processos adicionais devem ser realizados após a sinterização dos ímãs reciclados, e isto elevaria o preço final estimado.

(1) Rota HD e estimativas de gastos

Etapa 1: Para que a absorção de hidrogênio seja efetiva, os ímãs pós-consumo na entrada do processo devem possuir superfícies virgens, ou seja, os ímãs devem ser quebrados mecanicamente ou riscados (remover parcialmente o revestimento, caso exista).

Etapa 2: Os ímãs pós-consumo devem ser colocados em um recipiente/retorta onde seja possível submeter o sistema a vácuo ativo (até 0,0001 mbar) e também seja possível adicionar hidrogênio neste sistema. Preferencialmente, deseja-se também que seja possível inserir este recipiente em um forno que atinja até no mínimo 600 °C. Nesta etapa inicial, o sistema deve permanecer sob vácuo ativo até atingir o fundo de escala sugerido de pressão (0,0001 bar).

Etapa 3: Estando o sistema desgastado, inicia-se a etapa de inserção de gás hidrogênio (H₂, pureza em 5.0) para que se inicie a etapa de decrepitação (cominuição química, ou cominuição grosseira dos ímãs pós-consumo). A quantidade de gás hidrogênio utilizada (a pressão deste gás hidrogênio deve ser mantida acima da pressão atmosférica, em torno de 1 bar acima) dependerá da quantidade de material inicial e de sua composição química. Para 1 kg de ímãs pós-consumo com concentração de terras raras em torno de 30% em peso, são necessários 2,5 bar de gás hidrogênio (pressão de controle de um cilindro padrão). A absorção de hidrogênio pelos ímãs em fim de vida caracteriza-se por ser um processo exotérmico, portanto, é comum notar aumento de temperatura do recipiente, até 200 °C, aproximadamente.

Etapa 4: Finalizada a absorção de hidrogênio e a fragilização dos ímãs pós-consumo, o sistema deve permanecer sob vácuo para a primeira etapa de defasagem (liberação do hidrogênio, primeira etapa do processo d-HD). Este processo leva cerca de 12 horas e é caracterizado pelo aumento da pressão do sistema e queda da temperatura da retorta (processo endotérmico).

Etapa 5: Após a primeira etapa de desidrogenação (d-HD), a segunda etapa de desidrogenação deve ser realizada com o sistema ainda sob vácuo ativo. A retorta deve ser inserida em um forno – usualmente tubular – e aquecida até 550 °C durante 8 horas (2 horas adicionais, levando em consideração a rampa de aquecimento), ao final deste processo, costuma-se observar dois períodos de liberação de hidrogênio.

Etapa 6: O sistema, ainda sob vácuo, deve permanecer resfriando até a temperatura ambiente, o que leva em torno de 12 horas.

Etapa 7: Estando o sistema resfriado, a bomba mecânica pode ser desligada e aberta, o material final (pó HD reciclado) deve ser transferido para um recipiente e passado para um ambiente anaeróbico (*Glove Box*). Dependendo da infraestrutura disponível, desta etapa em diante, sugere-se que as etapas subsequentes (até a sinterização do ímã), sejam realizadas em atmosfera altamente anaeróbica (teor de $O_2 < 5$ ppm).

Etapa 8: O pó HD reciclado deve ser peneirado ($< 500 \mu m$) para que o pó fragilizado seja separado de qualquer resíduo deixado pelo revestimento. Em seguida, este pó deve ser cominuído finamente para que seja possível obter partículas monocristalinas e com tamanho de partícula médio em torno de $5 \mu m$. A rota de moagem comumente utilizada na indústria é a que utiliza o processo autógeno (a partir de um moinho de jatos opostos, ou *Jet Mill*). Porém, este é um equipamento custoso e específico, então sugere-se a adoção de um processo de moagem mais simples e barato para esta moagem: o uso de um Moinho de Bolas, via rota úmida. Aqui, o pó HD é adicionado em um vaso de moagem contendo esferas de aço inox, este vaso é preenchido com hexano, ou qualquer hidrocarboneto estável, e posto para girar no Moinho – a quesito de comparação, dadas as nossas condições de entrada, são necessárias em média 30 horas de moagem para se obter 1 kg de pó com o tamanho de partícula médio desejado.

Etapa 9: Finalizada a moagem, o excesso de hexano deve ser retirado, e o pó submetido à vácuo ativo por bomba mecânica, durante aproximadamente 2 horas para que o pó esteja seco e livre de hexano.

Etapa 10: A princípio, o pó monocristalino reciclado já estaria pronto para as etapas subsequentes. Moldes de borracha (com as dimensões adequadas de acordo com as especificações de projeto), ou poliuretano – com paredes flexíveis – devem ser preenchidos com o pó fino. Estes moldes devem ser alinhados magneticamente, com campo superior à dois teslas (2 T), e prensados em prensa isostática (pressão em torno de 60 MPa, mas dependerá das especificações do projeto).

Etapa 11: As peças compactadas (após prensagem isostática) – corpos à verde – estão prontas para serem sinterizadas. Usualmente, utiliza-se um forno tubular com elevado controle de atmosfera (o processo deve ser realizado sob vácuo ativo ou sob Argônio 5.0). Os patamares de sinterização dependem da matéria prima utilizada, mas, usualmente, o processo leva em torno de 24 horas – contando com a etapa de resfriamento.

Etapa 12: Após sinterizadas, os ímãs estão prontos e devem ser lixados e magnetizados com campo magnético ao redor de quatro teslas (4 T).

Etapa 13: Como mencionado nas observações, as etapas de usinagem e revestimento foram desconsideradas nesta abordagem. Portanto, a última etapa está na caracterização magnética do ímã reciclado para classifica-lo de acordo com suas propriedades magnéticas. A tabela 17 exibe essa estimativa de gastos via processo HD.

Tabela 17 – Estimativa de Gastos: Reciclagem via processo HD

Etapa	Observações	Valor Estimado (R\$*)
1	Esta etapa não implica em gastos adicionais (além do tempo de trabalho da equipe, valor não levantado neste relatório).	-
2	Gasto de energia: Bomba Mecânica (0,75 kW, 2 h de trabalho).	1,17
3	Gasto de material de consumo / Gás hidrogênio (0,14 m ³).	12,50
4	Gasto de energia: Bomba Mecânica (0,75 kW, 12 h de trabalho).	7,02
5	Gasto de energia: Bomba Mecânica (0,75 kW, 10 h de trabalho). Gasto de energia: Forno Tubular (3,50 kW, 10 h de trabalho).	33,15
6	Gasto de energia: Bomba Mecânica (0,75 kW, 12 h de trabalho).	7,02
7	Esta etapa não implica em gastos adicionais (além do tempo de trabalho da equipe, valor não levantado neste relatório).	-
8	Gasto de energia: Bomba Mecânica da Glove Box (0,75 kW, 35 h de trabalho). Gasto de energia: Moinho de Bolas (2,00 kW, 30 h de trabalho). Gasto de material de consumo / Gás argônio, manutenção da atmosfera da glove box (0,12 m ³). Gasto de material de consumo / Hexano (150 ml – valor perdido na moagem/extração).	79,00
9	Gasto de energia: Bomba Mecânica da Glove Box (0,75 kW, 2 h de trabalho).	1,17
10	Gasto de material de consumo / Gás argônio, manutenção da atmosfera da glove box (0,05 m ³). Gasto de energia: Bomba Mecânica da Glove Box (0,75 kW, 1 h de trabalho). Gasto de energia: Magnetizador de pulso (7,00 kW, 2 h de trabalho). Gasto de energia: Prensa isostática (2,00 kW, 2 h de trabalho). Gasto de material de consumo: Embalagens plásticas para proteção das amostras após preenchimento e durante a compactação.	67,35
11	Gasto de material de consumo / Gás argônio, manutenção da atmosfera do forno (0,05 m ³). Gasto de energia: Bomba Mecânica do forno (0,75 kW, 24 h de trabalho). Gasto de energia: Forno tubular (7,00 kW, 24 h de trabalho).	147,80
12	Gasto de energia: Magnetizador de pulso (7,00 kW, 1 h de trabalho).	5,46
13	Gasto de energia: Magnetizador de pulso (8,00 kW, 1 h de trabalho).	6,24
Total:		367 / kg

*Valores-base de consumo: (1) Energia Elétrica: R\$ 0,78 por kWh / valor médio de cotação da Celesc para o período 09 – 10/2023; (2) Gás Hidrogênio 5.0: R\$ 89,80 por m³ de gás / valor médio de cotação da White Martins para o período 09 – 10/2023; (3) Gás Argônio 5.0: R\$ 48,90 por m³ de gás / valor médio de cotação da White Martins para o período 09 – 10/2023; (4) Hexano PA: R\$ 39,00 por 1000 ml / valor médio de cotação da NaveLab para o período 09 – 10/2023;

Ou seja, a partir das observações apontadas, estima-se que seja gasto R\$ 367,00 para reciclar 1 kg de ímã pós-consumo via processo HD. Lembrando que esse valor pode variar dependendo da solução tecnológica aplicada para recuperar os ETR.

Conforme a empresa *Urban Mining* (2023), mencionada anteriormente (seção 4.5.2) há eficiência econômica do processo de reciclagem de ímãs (11 toneladas nas emissões de CO₂), e há transformação do resíduo de ímãs pós-consumo em um ativo valioso. Nesse contexto, o resíduo pós-consumo, que normalmente seria considerado “lixo” (ou fundido com outros metais “sem valor”), se torna um ativo valioso com um valor de US\$30 a 40 (~ R\$ 145 - 193) por quilograma. Isso confirma que o resíduo pós-consumo tem valor econômico e pode ser vendido por esse preço. Além disso, o custo do quilograma do ímã recuperado é de 60 dólares (cerca de R\$ 290), e o valor recuperável em um aerogerador de 2MW é de 12 toneladas de ITR (talvez ferro, térbio e/ou disprósio), o que também contribui para a eficiência econômica da reciclagem dos ímãs.

O preço comercial dos ETR¹⁹, como neodímio é de US\$113 por kg, desde janeiro de 2020, o preço do Nd subiu mais de 74,15%, o preço do praseodímio é de US\$113 por kg desde janeiro de 2020, o Pr aumentou mais de 55,01%, já o preço do disprósio é de US\$ 570 por kg desde janeiro de 2020, o Dy aumentou mais de 64,93%. Diante do aumento do preço dos ETR é importante reiterar que a recuperação de ETR de produtos pós-consumo é promissora.

O custo de produção de 1kg de ímãs de NdFeB a partir de material primário pode variar entre 20 - 40 US\$/kg (R\$130 - 194). Esse valor é uma estimativa média (obtido por meio de entrevista com a empresa D) e pode variar de acordo com diferentes fatores, como a escala de produção, custo dos minerais virgens, valor de mercado do dólar, energia consumida no processo, custo da mão de obra, entre outros. Lembrando que não está incluso o valor de CO₂ eq da mineração primária, logo infere-se que esse valor em reais pode ser maior. Além das questões de impacto ambiental da mineração primária.

¹⁹<https://strategicmetalsinvest.com/current-strategic-metals>

(2) Infraestrutura mínima necessária

Abaixo, segue a Tabela 18 contendo os valores estimados dos principais equipamentos necessários para estruturar a infraestrutura mínima necessária para a solução tecnológica aqui descrita.

Tabela 18 – Estimativa de Valores – Infraestrutura Mínima

Equipamento*	Valor Estimado (R\$)
Sistema de Vácuo e Conexões de Gases (Processamento HD / d-HD)	30.000,00
Forno Tubular (Processamento d-HD)	50.000,00
Câmara Anaeróbica	180.000,00
Magnetizador de Pulso	100.000,00
Prensa Isostática	80.000,00
Moldes	8.000,00
Forno Tubular (Sinterização)	120.000,00
Histeresígrafo (Caracterizações magnéticas)	250.000,00
Total:	818.000,00

*Equipamentos dimensionados para uma escala de produção piloto / semi-industrial. Os valores destes equipamentos podem flutuar bastante dependendo do modelo, da empresa e de possíveis convênios junto à universidade.

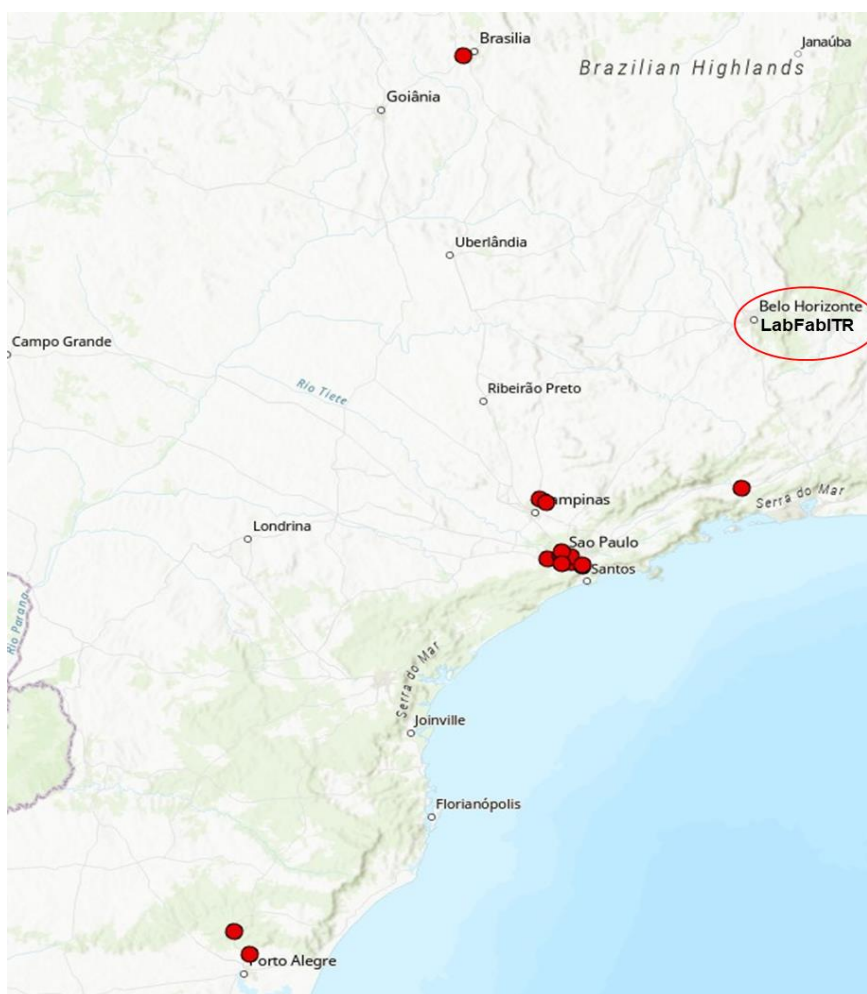
Os valores estimados na análise do processo HD são preliminares, e necessita de mais estudos para inferir uma produção em escala industrial para um processo que seja viável por essa solução tecnológica que possa ser escalado em empresas produtoras. Assim, enfatiza-se que há necessidade de estudos aprofundados na viabilidade econômica dos processos de reciclagem, também auxilia os atores da cadeia de suprimentos de ímãs com uma compreensão da importância com um mapeamento inicial de um processo tecnológico que pode ser escalado industrialmente.

Em suma, a identificação dos insumos nacionais permite inferir que o volume de entrada de material pós-consumo para possível realização do processo de recuperação de ETR, seja no LabFabITR ou dentro da empresa A, é possível, ou seja, o produto importado que foi colocado no mercado a 5 anos atrás em 2018, em média, chegará no final de sua vida útil em 2023, totalizando um volume descartado de (~5.234 toneladas) de resíduo pós-consumo a ser gerenciado. Por questões de simplificação optou-se pelos dados dos últimos 5 anos. No entanto, não é somente esse volume, pois é fornecido o volume histórico de importação na seção 4.5.1, que significa inferir, um volume em toneladas para o período de 2002 a 2018 que somados (Comissão Europeia, 2008), gera um volume descartado pós-consumo de (~ 63.332

toneladas). Assim, o custo por tonelada processada tende a diminuir. Contudo se o custo de processamento fosse o mesmo levantado para o LabFabITR de acordo com o valor da Tabela 17, o custo total seria pouco maior que 23 bilhões de reais.

Outra questão a ser analisada é a Logística Reversa dos produtos pós-consumo, o ideal seria o gerenciamento como polo centralizador São Paulo, dada a menor distância ao LabFaBITR, entre as empresas que comercializam os produtos, conforme a representação no mapa da Figura 58.

Figura 58 – Mapa com o georreferenciamento das empresas



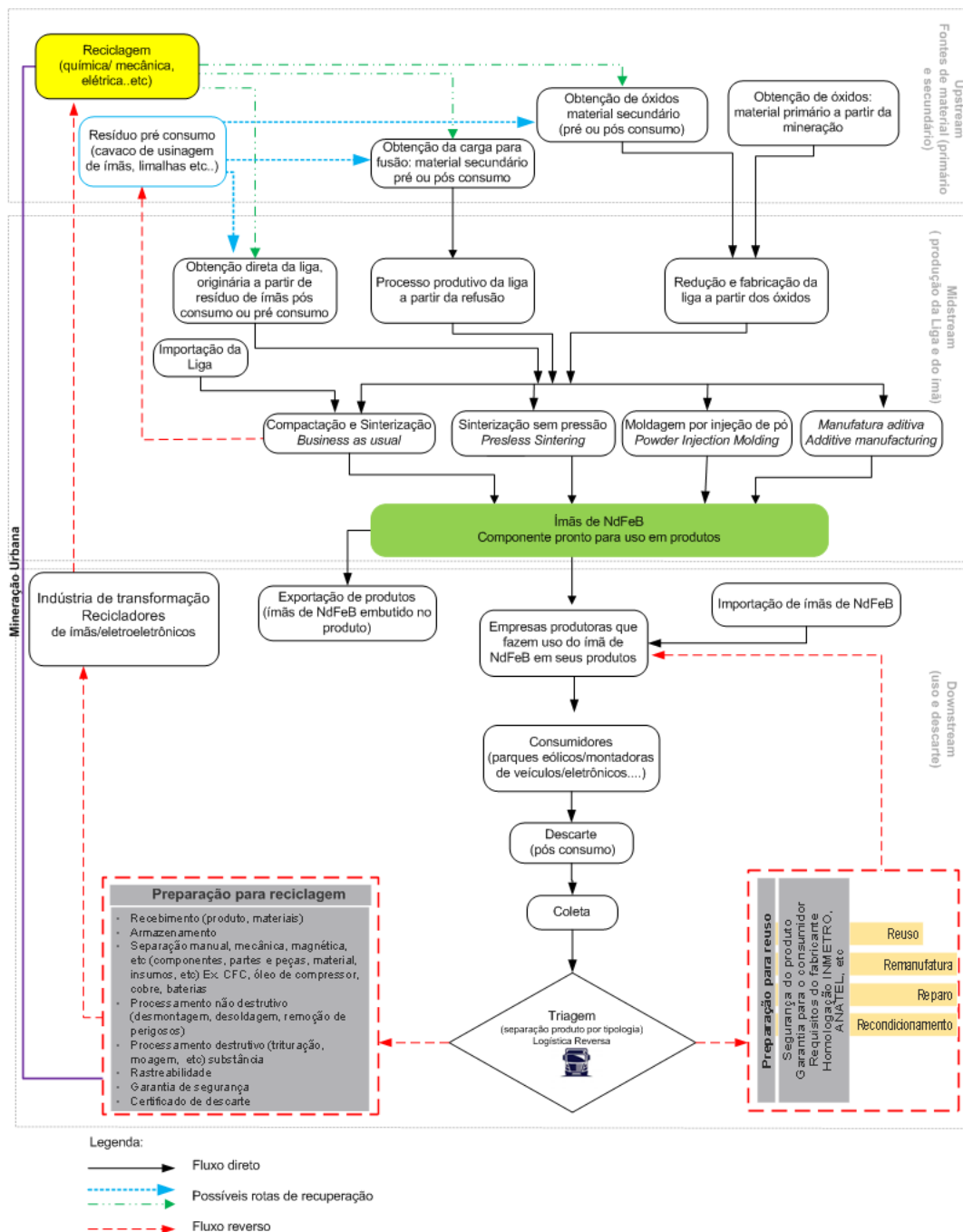
Fonte: Autora (2023)

Na sequência é apresentada uma proposta considerada no âmbito da economia circular, embasado no Escopo 16.156 do Sistema de Logística Reversa, adaptado do manual operacional básico e do Decreto 10.240. As diferentes possibilidades que compõem o processo de circularidade requerem integração e, para

tanto, a necessidade de conhecimento da atuação dos agentes a montante e a jusante de cada estágio.

Esse movimento de análises foi realizado em paralelo, e se agrupam na projeção proposta para um fluxo da cadeia circular de ímãs de NdFeB com a inclusão da indústria de transformação, indústria produtora e entidades gestoras, conforme a Figura 59.

Figura 59 – Proposição de um Fluxo da cadeia circular dos ímãs de NdFeB no Brasil



A figura acima foi realizada com intuito de propor um fluxo para a cadeia circular de ímãs de NdFeB e considera os fluxos direto, possíveis rotas de recuperação e o fluxo reverso. Infere-se com base nas entrevistas deste estudo que a cadeia de suprimentos deve ser repensada com base na MU como solução circular dos ímãs de NdFeB.

Assim, como etapa *Upstream* para fonte de material (primário ou secundário) infere-se que o setor público deva fornecer suporte para o estabelecimento de soluções tecnológicas, seja por meio de investimento em infraestrutura de processos de reciclagem, incentivos fiscais e ou estabelecimento de metas de reciclagem. A recuperação de ETR de fontes alternativas foi a estratégia mais discutida pelos estudos da matriz do conhecimento.

Outra questão superficialmente levantada pelos entrevistados foi a adoção do Sistema Produto Serviço, pela Indústria de ímãs NdFeB (em andamento) que deve ser discutida inserindo mais a empresa produtora, bem como a empresa que utiliza os ímãs de NdFeB em seus produtos, na etapa *Midstream*.

Na etapa *Dowstream* no uso e descarte foi percebido entre os entrevistados uma divergência de conceitos com relação a indústria de reciclagem e transformação, onde a primeira faz a triagem e a segunda realiza o processo de recuperação transformando os ímãs de NdFeB em ETR, ou seja, material secundário.

Dessa forma, os fluxos reversos (*closed-loop*) e direto (*open-loop*) de bens, materiais, bem como outros recursos, como subprodutos e resíduos, podem ser integrados em processos circulares da cadeia de suprimentos (Batista et al., 2018). Em particular, ao abordar fluxos reversos e diretos, o modelo de circuito fechado fornece uma linha de base valiosa para descrever o potencial de aplicação de um projeto de cadeia de suprimentos circular. Principalmente pela inclusão do Escopo 16.156 - adaptado do manual operacional básico e Decreto 10.240 e do conceito de economia circular, permitindo uma visão do que é necessário para MU, como exemplo, enviar um produto pós-consumo precisará de uma preparação antes da efetiva entrada nos processos de soluções tecnológicas, bem como de uma preparação para o reuso.

O próximo capítulo a seguir apresenta a conclusão das lacunas apresentadas neste estudo, bem como contribuições e lacunas encontradas como sugestão que podem servir para trabalhos futuros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A temática central desta pesquisa levou a uma discussão em torno do estudo das soluções tecnológicas para recuperação de material secundário a partir de ímãs de NdFeB. As soluções tecnológicas existentes e viáveis ambientalmente foram identificadas a partir da Revisão Sistemática da Literatura (RSL) e posterior análise de conteúdo, resultando em uma matriz do conhecimento com total 32 estudos analisados. Foi possível identificar que os processos tecnológicos de transformação de produtos pós-consumo em ETR, tem impactos ambientais significativamente menores do que a produção primária. No entanto, ressalta-se que pode haver pesquisas não incluídas aqui, seja por estarem em outras bases de dados, e ou não atendiam ao Fator de Impacto de corte (JCR) > 6.

Os países como a China, Estados Unidos e Alemanha são os que mais publicam sobre a temática de recuperação de ETR, observou-se que o número de artigos aumentou ao longo dos anos, principalmente para o ano vigente 2023. O aumento dos estudos sobre reciclagem de Nd reflete a importância do tema, bem como investimento no desenvolvimento de novas soluções tecnológicas de recuperação de ETR na cadeia nacional de ímãs de NdFeB. A partir da RSL, um total de 11 referências foram identificadas na rede de citações, podendo auxiliar em estudos futuros, para o entendimento da comunicação científica.

A análise de conteúdo da matriz do conhecimento, permitiu propor a integração das soluções tecnológicas obtidas neste estudo com o processo produtivo dos ímãs de NdFeB, considerando o retorno dos resíduos pré e pós-consumo. Assim, observou-se as abordagens mais estudadas com 52% para processos de purificação (piro, hidro, eletro metalúrgico), 18% recuperação de produtos pós-consumo via processo (HD, HDDR, Direto), 9% recuperação de resíduos pré-consumo e 21% representando a gestão de material secundário. Logo, há oportunidades para desenvolver processos eficientes considerando a Mineração Urbana e o uso de recursos secundários, as vantagens são significativas, como elevada economia de energia e redução de emissões de gás efeito estufa.

No âmbito de uma política de baixo carbono, a chave para o desenvolvimento econômico circular sustentável é reduzir a exploração de recursos primários e mudar para recursos secundários, o que também pode aliviar a pressão sobre o fornecimento de terras raras.

O marco legal e regulatório referente aos REEE do Brasil está em um nível de maturidade satisfatório, mas requer harmonização de termos e definições, compatibilidade de requisitos entre unidades federativas, coordenação com propostas de países latino-americanos e inclusão de princípios e diretrizes de economia circular, bem como monitorar os atores da cadeia de valor de ITR. Logo, o setor ainda carece de instrumentos técnicos normativos específicos para o reaproveitamento de ímãs de NdFeB.

Verificou-se que o setor público deve fornecer apoio financeiro para o estabelecimento de processos de reciclagem, seja por meio de investimentos em infraestrutura, incentivos fiscais ou a partir do estabelecimento de metas de reciclagem, principalmente dos REEE, contribuindo para consolidação de novos modelos de negócio para a MU. Além disso, definir gradientes de formalização, afim de possibilitar suporte aos elos da cadeia de valor e coibir a ilegalidade.

Com relação ao impacto ambiental da recuperação de material secundário, identificou-se que estes impactos iniciam na etapa de transporte, alguns estudos concluíram que quanto maior a distância envolvida, maior será o impacto ambiental. Os dados quantitativos chegam a 62 kg CO₂ eq. de gás efeito estufa (medidos pelo IPCC), além da energia proveniente de energias fósseis e nucleares, para solução tecnológica hidrometalúrgica. A comparação das categorias de impacto ambiental para recuperação de Nd a partir de ímãs de NdFeB e de Nd primário, mostrou que impactos de ecotoxicidade do Nd reciclado são menores, pois é evitado a etapa poluente da produção primária.

Assim, esses dados quantitativos devem ser levados em consideração, por exemplo, em análises de ciclo de vida dos processos tecnológicos de REEE. Ainda, observou-se que há necessidade de mais estudos, mesmo que estimados, na logística reversa, principalmente nas rotas de coleta, transporte e emissões dos resíduos pós-consumo de ímãs de NdFeB e REEE, de maneira a viabilizar economicamente o desenvolvimento de soluções tecnológicas dos processos de recuperação de materiais secundários.

Em suma, inferiu-se com esta pesquisa a existência de volume pós-consumo, por meio dos bancos de dados nacionais. De forma que a quantidade evidenciada para o ano de 2015 foi de 25.000 toneladas de ímãs de NdFeB, com crescimento perceptível para o ano de 2018 totalizando 40.000 mil toneladas em território nacional.

Diante disso, mesmo com a pandemia do COVID-19 no período de 2019 a 2020 os dados revelam um valor significativo de um volume de ímãs distribuídos ao longo do território nacional possível de ser recuperado. Além disso, identificou-se ainda que os produtos importados não são necessariamente consumidos no determinado estado em que os recebeu, havendo implicações negativas na rastreabilidade dos mesmos, sendo necessário um aprofundamento no mapeamento para produtos que usam ímãs.

Sugere-se ainda a criação de sistemas nacionais para consolidar informações sobre quantidade, características e localização dos produtos que utilizam ímãs de Nd-Fe-B, pois diante da pesquisa realizada foi apresentado uma discrepância com relação as nomenclaturas das empresas. Ainda as empresas que pegam partes e peças de suas marcas ou outras marcas e integram em um produto final ou solução de automação por exemplo, são soluções para o mercado B2B (negócio para negócios) e não B2C (negócio para consumidor).

Para exemplificar, empresas de outros países fazem a MU aqui no Brasil, por meio da entrevista com reciclador, cerca 8 toneladas de ímãs de NdFeB foram obtidas no mês de fevereiro de 2023, com valor aproximado para exportação do material secundário desmagnetizado de R\$ 31.000,00, para países que detém de tecnologia para recuperar os ETR. Assim, sugere-se que os resíduos pós-consumo deveriam ser tratados e recuperados aqui no Brasil, não deveriam estar transitando de maneira informal, sendo importante ter uma planta ou unidade fabril possível de desmagnetizar os ímãs para posterior desmantelamento dos equipamentos pós-consumo, principalmente dos maiores como, equipamento de ressonância magnética que podem chegar a 1.500 kg só de ITR e os aerogeradores, pois atualmente há riscos à saúde e ao meio ambiente.

As instituições brasileiras podem tratar o material secundário nacional pós-consumo. Já temos alguns pontos e infraestrutura que estudam a recuperação de ETR por meio de soluções tecnológicas existentes. Conforme o levantamento da maturidade das soluções tecnológicas identificado no estudo, os processos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos são os mais consolidados, com um nível de produção estabelecido, seguidos pela combinação das duas técnicas. Já soluções como HDDR e extração por solvente estão em fase de teste operacional. Soluções tecnológicas com nível 4 de validação se encontram em escala laboratorial, com ênfase em processos mais sustentável como biohidrometalurgia e reação de redução

calciotérmica. Sugere-se que sejam realizados estudos para avaliar o efeito do reúso de ímãs e o desempenho tecnológico no contexto industrial. Assim, o proporcionará uma infraestrutura ao LabFabITR capaz de reciclar ímãs tanto pré ou pós-consumo futuramente. Durante a entrevista e visita às instalações, constatou-se um interesse em realizar um trabalho não apenas laboratorial, mas também envolvendo os atores, especialmente a indústria de transformação. Isso se deve ao fato de estarmos exportando material secundário extremamente estratégico para outros países. Recentemente, no dia 21 de dezembro de 2023, a CODEMGE formalizou a venda do LabFabITR para a Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG). Esta aquisição estratégica visa estabelecer uma base sólida para avanços significativos no setor de terras raras no país.

Durante as entrevistas, procurou-se identificar alternativas para a destinação dos ímãs pós-consumo. Os relatos das empresas indicaram que elas não possuem procedimentos estabelecidos para essa destinação, evidenciando uma falta de conhecimento sobre as possibilidades disponíveis, o que impacta negativamente no aproveitamento do material secundário.

Por fim, o estudo evidenciou que os ímãs de NdFeB que não atendem aos padrões de qualidade nos parques fabris são fundidos como metal comum, não oportunizando a recuperação dos mesmos. O processo de recuperação de ETR de ímãs permanentes no pré e pós consumo consolidado para fechar o ciclo dos materiais secundários. De forma geral, os respondentes enfatizaram que novos modelos de negócio devem ser explorados. Além disso, desenvolvimento e verificação de métodos para a comprovação da origem dos REEE devem ser explorados. Sugere-se que trabalhos futuros possam incluir as associações e cooperativas, pois são organizações formais e podem emitir documentos para rastreabilidade dos ímãs de NdFeB ou REEE, com nota fiscal eletrônica. Além do enquadramento de codificação de produtos (NCM) e atividades econômicas (CNAE). Assim, pode-se ter um amadurecimento do setor possibilitando a geração de emprego e renda a partir de novos modelos de negócio pautados na MU, na economia de baixo carbono promovendo a circularidade de matérias secundário a partir de ímãs permanentes.

5.1 CONTRIBUIÇÕES

Diante das lacunas identificadas sobre a mineração urbana e soluções tecnológicas para recuperar elementos de terras raras de ímãs permanentes, é necessário consolidar o processo de recuperação de ETR para fechar o ciclo dos materiais secundários. Além disso, é crucial explorar novos modelos de negócio e métodos de rastreabilidade para ímãs de NdFeB e REEE. A maturidade do setor pode gerar empregos e promover a circularidade dos materiais secundários. Para estudos futuros, recomenda-se: a) incentivo à coleta e destinação de ímãs de NdFeB; b) desenvolvimento de sistemas nacionais que consolidem informações sobre produtos que utilizam esses ímãs; e c) exploração de novos modelos de negócio e métodos para comprovar a origem dos REEE. O marco legal e regulatório no Brasil apresenta uma maturidade satisfatória, mas precisa de harmonização e da inclusão de princípios de economia circular voltados aos ímãs de ITR. Ademais, é imprescindível fomentar parcerias entre setores público e privado para viabilizar a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias inovadoras que possam facilitar o processo de extração e recuperação de elementos de terras raras.

A cooperação com instituições acadêmicas e centros de pesquisa pode criar um ambiente propício para a troca de conhecimentos e experiências, potencializando a eficiência das técnicas empregadas. Outra vertente a ser considerada é a conscientização da população sobre a importância da reciclagem de dispositivos eletrônicos que contenham ímãs de NdFeB, promovendo campanhas educativas que incentivem a devolução desses materiais.

No âmbito da regulamentação, é desejável que se estabeleçam diretrizes claras para o gerenciamento do ciclo de vida dos produtos que contêm ímãs permanentes. Isso inclui a implementação de sistemas que tornem mais transparentes as cadeias de suprimentos, permitindo que consumidores e empresas rastreiem a origem dos materiais utilizados em seus produtos. A adoção de tecnologias de blockchain, por exemplo, pode ser uma solução eficaz para garantir a integridade e a veracidade das informações ao longo desse processo.

Finalmente, para que a mineração urbana e a recuperação de elementos de terras raras sejam realmente sustentáveis, é vital que se promova uma nova cultura de consumo, onde a durabilidade e a reparabilidade dos produtos sejam prioridades. Iniciativas que estimulem o design de produtos que considerem a reciclagem desde a

sua concepção, a chamada "*eco-design*", podem contribuir significativamente para a minimização do impacto ambiental e para a maximização do uso de materiais secundários. Assim, o fortalecimento da cadeia de valor em torno dos ímãs de NdFeB e REEE pode, de fato, impulsionar a transição para uma economia circular mais robusta e eficiente no Brasil.

5.2 LIMITAÇÕES

Em relação às limitações da pesquisa desenvolvida nesta tese, destacam-se a falta de referências de empresas do setor, como as cooperativas de reciclagem de resíduos eletroeletrônicos, que poderiam contribuir com *benchmarking*, e o fato de não ter sido possível aplicar e acompanhar a gestão do processo de fabricação dos ímãs de NdFeB, uma vez que o LabFabITR ainda está em fase de implementação e troca de gestão. Quanto ao conjunto de soluções tecnológicas, foi possível obter dados preliminares sobre os custos do processo em laboratório, indicando a necessidade de realizá-los em outras células de recuperação para viabilizar a implementação de uma planta de reciclagem, seja no processo do LabFabITR ou da própria empresa produtora.

Os dados e informações apresentados neste trabalho, como o arcabouço legal e normativo, o volume de material secundário estimado e a maturidade das soluções tecnológicas, são pioneiros no setor de ímãs, especialmente envolvendo a mineração urbana. Portanto, melhorias e evoluções podem ser acrescentadas no futuro.

5.3 DIRECIONAMENTO PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados desta pesquisa podem esclarecer os direcionamentos para trabalhos futuros, descritos nos seguintes tópicos:

- Criação de um mapa interativo global: Ilustre as rotas de extração e distribuição de minerais essenciais para a transição energética, destacando as práticas sustentáveis adotadas em cada região.
- Desenvolvimento de uma plataforma de blockchain: Rastreie a origem dos minerais, garantindo que sua extração seja ética e sustentável, oferecendo certificações para empresas que cumpram essas normas.

- Organização de seminários e workshops: Envolve líderes da indústria mineral, ambientalistas e acadêmicos para discutir inovações tecnológicas que minimizem o impacto ambiental da mineração na busca por fontes de energia renováveis.
- Criação de um documentário: Explore a história dos minerais utilizados em tecnologias limpas, abordando desde a extração até a aplicação em energias renováveis, com foco nas comunidades locais afetadas.
- Realização de uma competição global de ideias: Proponha novos métodos de reciclagem e reuso de minerais provenientes de produtos eletrônicos, visando reduzir a dependência de mineração primária.
- Desenvolvimento de um programa educativo: Ensine nas escolas a importância dos minerais na transição para energias limpas, utilizando recursos visuais interativos e simulações.
- Investigação sobre o impacto ambiental: Estude a relação entre a crescente demanda por minerais e o impacto em ecossistemas locais, propondo soluções que equilibrem a mineração com a conservação ambiental.
- Lançamento de uma série de podcasts: Conecte especialistas em energia, mineração e sustentabilidade, discutindo as tendências do mercado mineral e as inovações que podem transformar essa indústria.
- Criação de um consórcio internacional: Entre países com grandes reservas de minerais críticos, visando padronizar práticas de mineração sustentável e promover a troca de tecnologia e conhecimento.
- Desenvolvimento de uma campanha de conscientização: Explique a importância de minerais específicos na transição energética, utilizando redes sociais para engajar o público e estimular a demanda por produtos fabricados com práticas sustentáveis.

Embora leilões de equipamentos pós-consumo possam ocorrer, é necessário estabelecer critérios para evitar a desvantagem do mercado formal e a falta de dados sobre o destino desse material. Assim, sugere-se uma parceria com cooperativas para coletar e trazer o material eletrônico para um ponto de coleta adequado.

REFERÊNCIAS

ABALANSA, Samuel et al. Electronic Waste, an Environmental Problem Exported to Developing Countries: The GOOD, the BAD and the UGLY. *Sustainability*, v. 13, n.9, p. 5302, 2021.

ABEEólica - 2023. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS (ABEEólica). O tamanho da indústria no Brasil. 2023. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 3 jul. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/>. Acesso em: 06 jul 2019.

ABNT. ABNT/CEE-323 - Comissão de Estudo Especial de Economia Circular. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/abnt-cee-323-comissao-de-estudo-especial-de-economia-circular>. Acesso em: 20 mar. 2022.

ABREE - Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos. Relatório Anual de Desempenho do Sistema de Logística Reversa (SLR) de Eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico. São Paulo, 2022. 41 p. Disponível em: https://portal-api.sinir.gov.br/wpcontent/uploads/2022/12/Relatorio_Anual_de_Desempenho_ABREE_ano-referencia-2021.pdf. Acesso em: 29 jul. 2023.

ABVE - 2023. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE VEÍCULO ELÉTRICO (ABVE). Eletrificados: novo recorde no semestre. 2023. Disponível em: <http://www.abve.org.br/elettrificados-novorecorde-no-semester/>. Acesso em: 02 ago. 2023.

ADIBI, N.; LAFHAJ, Z.; PAYET, J. New resource assessment characterization factors for rare earth elements: applied in NdFeB permanent magnet case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 24, n. 4, p. 712-724, 2018.

ADIMB - 2023. AGÊNCIA PARA O DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO DO SETOR MINERAL BRASILEIRO (ADIMB). Terras raras Oportunidade e inserção do Brasil na Transição Energética. VI Seminário Brasileiro de Terras Raras de 7 a 8 de novembro, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cetem/pt-br/assuntos/VI-Seminario-Brasileiro-de-Terras-Raras/20231107TerrasRarasApresentaoVF.pdf>

AGYEMANG, M., Kusi-Sarpong, S., Khan, S.A., Mani, V., Rehman, S.T. and Kusi-Sarpong, H. (2019), "Drivers and barriers to circular economy implementation: An explorative study in Pakistan's automobile industry", *Management Decision*, Vol. 57 No. 4, pp. 971-994. <https://doi.org/10.1108/MD-11-2018-1178>

ALVES DIAS, Patricia et al. The role of rare earth elements in wind energy and electric mobility. European Commission: Luxembourg, 2020.

AMATO, A.; BECCI, A.; BIRLOAGA, I.; et al. Sustainability analysis of innovative technologies for the rare earth elements recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 106, p. 41–53, 2019. ALI, S. H. Social and Environmental Impact of the Rare Earth Industries. *Resources*, v. 3, p. 123–134, 2014.

ALI, S. H.; GIURCO, D.; ARNDT, N.; et al. Mineral supply for sustainable development requires resource governance. *Nature*, v. 543, n. 7645, p. 367–372, 2017.

ANM - 2020. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas / Coord. Geral Osvaldo Barbosa Ferreira Filho; Equipe Técnica por Marina Dalla Costa et al.; – Brasília: ANM, 2019. 34 p.: il.

ABILUX - 2023. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ILUMINAÇÃO (ABILUX). Guia LED descomplicado. 2023. Disponível em: https://www.abilux.com.br/docs/ABILUX_GuiaLEDDescomplicado_REV_052023.pdf. Acesso em: 31 jul. 2023

ARAUJO, E.; CHAVES FERNANDES, F. Mineração no Brasil: crescimento econômico e conflitos ambientais. [s.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <<https://cetem.gov.br/antigo/images/capitulos/2016/CCL0001-00-16.pdf>>.

ARNOLD MAGNETIC. Magnetic Hysteresis Loop. [s.l.: s.n.].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2004) ABNT NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro/RJ.

ASHBY, M. F. Seleção de materiais no projeto mecânico / Michael Ashby ; [tradução de Arlete Simille]. - Rio de Janeiro : Elsevier, 2015.

AWASTHI, A. K.; LI, J.; KOH, L.; OGUNSEITAN, Oladele A.. Circular economy and electronic waste. *Nature Electronics*, [S.L.], v. 2, n. 3, p. 86-89, 15 mar. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41928-019-0225-2>.

BAI, J.; XU, X.; DUAN, Y.; ZHANG, G.; WANG, Z.; Wang, L.; ZHENG, C. Evaluation of resource and environmental carrying capacity in rare earth mining areas in China. *Scientific Reports*, v.12, n. 6105. 2022.

BALDÉ, Cornelis P. et al. The global e-waste monitor 2017: Quantities, flows and resources. United Nations University, International Telecommunication Union, and International Solid Waste Association. Bonn/Geneva/Vienna. 2017

BALDE, Cornelis P. et al. Regional e-waste monitor for the CIS+ Georgia–2021. United Nations University (UNU) / United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosting the SCYCLE Programme, Bonn, Germany. 2021. Disponível em: http://collections.unu.edu/eserv/UNU:8703/REM_2021_CISGEORGIA_English.pdf

BALARAM, V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, v. 10, n. 4, p. 1285–1303, 2019. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>>.

BARDIN, Lawrence. Análise de conteúdo. São Paulo: Edições 70, 2008.

BASEL CONVENTION. Disponível em: <http://www.basel.int/Countries/>. Acesso em: 24 jan 2022.

BAILEY, Gwendolyn; MANCHERI, Nabeel; VAN ACKER, Karel. Sustainability of Permanent Rare Earth Magnet Motors in (H)EV Industry. *Journal of Sustainable Metallurgy*, v. 3, n. 3, p. 611-626, 28 mar. 2017. Springer Science and Business Media LLC.

BARRETO, C.; XAVIER, L. H.; SC, D. Mineração urbana para a gestão de equipamentos eletroeletrônicos: Avaliações preliminares para a aplicação dos ODS Urban Mining for the management of electronic equipment: Preliminary evaluations for the application of the SDGs, p. 106–112.

BERNON, M., TIAHJONO, B. & RIPANTI, E. F. 2018. Aligning Retail Reverse Logistics Practice with Circular Economy Values: an exploratory framework. *Production Planning & Control*, 29 (6): 483-497

BIAN, Y. Y. et al. Recovery of rare earth elements from permanent magnet scraps by pyrometallurgical process. *Rare Metals*, v. 41, n. 5, p. 1697-1702, 2022.

BINNEMANS, K.; JONES, P. T.; BLANPAIN, B.; GERVEN, T. V.; YANG, Y.; WALTON, A.; BUCHERT, M. Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, v. 51, p.1-22, jul. 2013. Elsevier BV

BINNEMANS, K.; JONES, P. T.; MUELLER, T.; YURRAMENDI, L. Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets? *JOURNAL OF SUSTAINABLE METALLURGY*, v. 4, n. 1, p. 126–146, 2018.

BOLIS, KAREN; SILVA GOULART, GABRIELA; KROHLING, ALISSON CARLOS; MENDONÇA, RENATO; FERNANDEZ-OUTON, LUIS EUGENIO; DOMINGOS ARDISSON, JOSÉ . Structural and Magnetic Characterization of Nd-Pr-Fe-B Sintered Magnet Machining Wastes. *ACS Omega*, v. 8, p. 12246-12258, 2023. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08249>.

BOCKEN NM, P. RITALA , P. HUOTARI. A economia circular: explorando a introdução do conceito entre as empresas S&P 500J. *Ind. Ecol.*, 21 (3) (2017) , pp. 487 - 490 , Disponível em: <10.1111 / jiec.12605>.

BURKHARDT CARLO; ANTJE LEHMANN; BENJAMIN PODMILJSK; SPOMENKA KOBE. A Systematic Classification and Labelling Approach to Support a Circular Economy Ecosystem for NdFeB-Type Magnet. *Journal of Materials Science and Engineering B*, v. 10, n. 4, p. 2020, 2020.

BUSCH, J.; STEINBERGER, J. K.; DAWSON, D. A.; PURNELL, P.; ROELICH, K. Managing Critical Materials with a Technology-Specific Stocks and Flows Model. *Environmental Science & Technology*, v. 48, n. 2, p. 1298-1305, 2 jan.2014.

BRASIL. Decreto nº 9.177, de 23 de outubro de 2017. Isonomia na fiscalização e no cumprimento das obrigações imputadas aos fabricantes, aos importadores, aos distribuidores e aos comerciantes de produtos, seus resíduos e suas embalagens sujeitos à logística reversa obrigatória. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20152018/2017/decreto/d9177.htm.

BRASIL. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm. Acesso em: 22 jun 2021.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022 - Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. como fica a Gestão de Resíduos Sólidos no Brasil. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10936.htm.

BRASIL. Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020. Implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso domésticos. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Decreto/D10240.htm. Acesso em 24 jun 2021.

BRASIL. Itamaraty. Disponível em: <http://brics2019.itamaraty.gov.br/>. Acesso em: 29 set. 2020.

BRASIL. Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 (a). Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Presidência da República, 2010. Brasília, 03 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm . Acesso em: 22 julho 2021.

Brasil Mineral - 2023. Novo projeto no litoral sul da Bahia. O principal interesse da Energy Fuels é a monazita, que contém elementos de terras raras e urânio. Maio de 2022. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/novo-projeto-no-litoral-sul-da-bahia>. Acesso em fev. 2023.

BELIN-FERRÉ. Noções básicas de termodinâmica e transições de fase em intermetálicos complexos. Série de livros sobre ligas metálicas complexas. World Scientific, Singapura, 2008.

BREWER, A. et al. Microbe Encapsulation for Selective Rare-Earth Recovery from Electronic Waste Leachates. *Environmental Science and Technology*, v. 53, n. 23, p. 13888-13897, 2019.

BRICS STI FRAMEWORK PROGRAMME. Disponível em: <http://brics-sti.org/> . Acesso em: 30 set. 2020.

BRIDGENS, B., POWELL, M., FARMER, G., WALSH, C., HEIDRICH, O., 2018. Creative upcycling: reconnecting people, materials and place through making. *J. Clean. Prod.* 189, 145e154. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.317>. Acesso em: 18 jan. 2020.

CAMPOS, M. F. et al. Terras-Raras: Aplicações e Tendências do Mercado para os Próximos Anos. In: Seminário Brasileiro de Terras-Raras, 3, Rio de Janeiro (RJ), Brasil, 26 – 27 novembro, 2015. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCTIC, Rio de Janeiro, 2015.

CBMM - COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO. II Seminário brasileiro de Terras Raras. Rio de Janeiro. 2015. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/images/palestras/2015/iiisbtr/04-tadeu-carneiro.pdf>. Acesso em: 20 março. 2020.

CGEE, 2013. CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Usos e aplicações de Terras Raras no Brasil: 2012-2030. Brasília. 2013. 254 p.; il, 24 cm. ISBN 978-85-60755-64-6.

CALDERON, A. R. M. et al. Repurposing of nickeliferous pyrrhotite from mine tailings as magnetic adsorbent for the recovery of gold from chloride solution. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 161, 2020.

CALLISTER, WILLIAN D.JR. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 8ª. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 807p, 2012.

CAPDEVILLE, G. de; ALVES, A. A.; BRASIL, B. dos S. A. F. Modelo de inovação e negócios da Embrapa Agroenergia: gestão estratégica integrada de P&D e TT. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2017. (Embrapa Agroenergia. Documentos, 24). No prelo.

CARDOSO, M. M.; AUGUSTO, G.; PAZ, D. S.; GUILHERME, N.; BRITO, C. DE. Abordagem sobre reciclagem de elementos terras raras em sucata eletrônica. Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2016. Disponível em: <

<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos16/28724316.pdf>> acesso em 15/12/2019
CARDOSO, M. M. PAZ, G. A. S. BRITO, N. G. C. PINTO, M. V. AGUIAR JÚNIOR, CASTRO Fernando Ferreira de; NASCIMENTO José Antonio Sena do. MINERAIS ESTRATÉGICOS E CRÍTICOS: UMA VISÃO INTERNACIONAL E DA POLÍTICA MINERAL BRASILEIRA. X

Jornada do Programa de Capacitação Institucional – PCI/CETEM –24 e 25 de novembro de 2021. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2497/1/Fernando%20Ferreira%20de%20Castro.pdf>

CASTRO, F. C.; PEITER, C. C.; GÓES, G. G. Minerais estratégicos e as relações entre Brasil e China. *Revista Tempo do Mundo*, n. 24, p. 349-378, dez. 2020.

CASTRO, Fernando Ferreira et al. “TD 2768 - Minerais Estratégicos E Críticos: Uma Visão Internacional E Da Política Mineral Brasileira.” *Texto Para Discussão*, 26 May 2022, pp. 1–40, <https://doi.org/10.38116/td2768>. Accessed 7 Mar. 2023

CTAPME - 2022. Comitê Interministerial de Análise de Projetos de Minerais Estratégicos (CTAPME). Política Pró-Minerais. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pro-minerais-estrategicos/FolderPoliticaPrMineraisEstrategicosversoportugus.pdf>.

CENCI, Marcelo Pilotto et al. *Eco-Friendly Electronics—A Comprehensive Review*. *Advanced Materials Technologies*, [s. l.], 2021.

CERTI - Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras. *Relatório Técnico Final do Projeto Executivo de Engenharia do FABFABITR*. CERTI, 2017.

CESSEL, Bruna Guedes; CAMPOS, Marcela Isadora; PRADOS, Thamires Martinho; CANCHUMANI, Giancarlo. LOGÍSTICA REVERSA DOS ELETROELETRÔNICOS: UMA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA FASE DE TRANSPORTE. *Seminário Internacional de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos 9 a 11 de outubro de 2023*.

CHEN, T., & GONG, Z. (2016). Design and development of rare earth permanent magnet brushless DC motor with high power density for HDD spindle. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(7), 1-4.

CIACCI, L. et al. Recovering the “new twin”: Analysis of secondary neodymium sources and recycling potentials in Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 142, p. 143-152, 2019.

COEY, J. M. D. *Magnetism and Magnetic Materials*. New York: Cambridge University Press, 2010. 76 p. ISSN 01609327. ISBN 9780521816144.

CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. *Viabilização de um Laboratório-Fábrica de Ímãs de Terras Raras no Brasil. Relatório Técnico Preliminar do Modelamento para Viabilização do Laboratório-Fábrica de Ligas e Ímãs*. Entrega 2.1. Maio, 2016.

CDTN- 2023. CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR (CDTN). CDTN, UFAM e UFSC têm projeto aprovado pelo CNPq. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cdtn/pt-br/assuntos/noticias/cdtn-ufam-e-ufsc-tem-projeto-aprovado-pelo-cnpq>. Acesso em: 11 abr. 2023.

COMISSÃO EUROPEIA - 2020. *Towards a circular economy: Closing the loop of the products lifecycle*. Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/priorities/jobs-growth-and-investment/towards-circular-economy_en. Acesso em: 17 dez. 2020.

COMISSÃO EUROPEIA – 2023. *Parecer do Comité Económico e Social Europeu — Proposta de Regulamento do Parlamento Europeu e do Conselho que estabelece um quadro para garantir um aprovisionamento seguro e sustentável de matérias-primas críticas e que altera*

os Regulamentos (UE) n° 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 e (UE) 2019/1020. *Jornal Oficial da União Europeia*. Bruxelas, 2023 C 349/142. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023AE1573>> Acesso em: 20 ago. 2023.

CONNELLY, N. G. et. al. Nomenclature of Inorganic Chemistry: IUPAC Recommendations 2005. Cambridge: IUPAC, 2005. 377 p. Disponível em: <http://www.iupac.org/fileadmin/user_upload/databases/Red_Book_2005.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2016.

CONEXÃO MINERAL. Serra Verde recebe Licença de Instalação para projeto de terras raras em Minaçu (GO). Disponível em: <https://www.conexaomineral.com.br/noticia/1625/serraverde-recebe-licenca-de-instalacao-pa-a-projeto-de-terras-raras-em-minacu-go.html>. Acesso em ago. 2020.

CONEXÃO MINERAL. Mineração Serra Verde já tem compradores para sua produção de concentrado de terras-raras. Disponível em: <https://www.conexaomineral.com.br/noticia/2027/mineracao-serra-verde-ja-temcompradores-para-sua-producao-de-concentrado-de-terras-raras.html>. Acesso em mai. 2021.

CONSTANTINIDES, S. Market Outlook for Ferrite, Rare Earth and other Permanent Magnets. The International Forum on Magnetic Applications, Technologies & Materials. Anais...Jacksonville: 2016.

CORRÊA, F., Martins, L. A., Souza, A. D., Dutra, F. G. de C., Ribeiro, J. S. de A. N., & Lima, L. C. (2022). Level of Maturity in Knowledge Management at the Municipal Finance Department of the Municipality of Contagem, Minas Gerais, Brazil. *Frontiers of Knowledge Representation*, 2(1). Retrieved from <https://periodicos.ufmg.br/index.php/fronteiras-rc/article/view/40290>

COSSU, R.; WILLIAMS, I. D. Urban mining: Concepts, terminology, challenges. *Waste Management*, v. 45, p. 1–3, 2015.

CHOWDHURY, N. A. et al. Sustainable Recycling of Rare-Earth Elements from NdFeB Magnet Swarf: Techno-Economic and Environmental Perspectives. *Acs Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 9, n. 47, p. 15915-15924, Nov 2021.

CULLITY, B.D., Introduction to Magnetic Materials, Nova Jersey, John Wiley & Sons Inc., 2009.

DATA SERIES 140. Rare earth Disponível em: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/historical-statistics/ds140-raree.xlsx> . Acesso nov. 2020.

DANTAS, N. G. S., & MELO, R. S. (2008). O método de análise SWOT como ferramenta para promover o diagnóstico turístico de um local: o caso do município de Itabaiana/PB. *Caderno Virtual de Turismo*, 8(1), 118-130.

DATARE, 2021. CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL. Projeto DATARE: lista de agentes recicladores no Brasil, 2021. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2021.

DE OLIVEIRA, R. P.; BENVENUTI, J.; ESPINOSA, D. C. R. A review of the current progress in recycling technologies for gallium and rare earth elements from light-emitting diodes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 145, p. 111090, 2021.

DING, Y.; HARVEY, D.; WANG, N.-H. L. Two-zone ligand-assisted displacement chromatography for producing high-purity praseodymium, neodymium, and dysprosium with high yield and high productivity from crude mixtures derived from waste magnets. *Green Chemistry*, v. 22, n. 12, p. 3769-3783, 2020.

DIEHL, O.; SCHÖNFELDT, M.; BROUWER, E.; et al. Towards an Alloy Recycling of Nd–Fe–B Permanent Magnets in a Circular Economy. *Journal of Sustainable Metallurgy*, v. 4, n. 2, p. 163–175, 2018.

DONG, S. et al. The status of Chinese permanent magnet industry and R&D activities. *AIP Advances*, v. 7, n. 5, 2017.

DORNIER, P. P.; ERNST, R.; FENDER, M.; KOUVELIS, P. *Logística e Operações Globais: textos e casos*. São Paulo: Atlas, 2000.

DUSHYANTHA, N. et al. The story of rare earth elements (REEs): Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production. *Ore geology Reviews*, v. 122, 2020.

DUTH, A. C. R. e LINS, F. F. (2017): A economia circular e sua relação com a mineração. *Brasil Mineral*, n. 374, 2017, p.66-70.

DUTTA, T. et al. Global demand for rare earth resources and strategies for green mining. *Environmental Research*, v. 150, p. 182–190, 2016

DROBNIK, A.; MASTALERZ, M. Rare Earth Elements: A brief overview. *Indiana Journal of Earth Sciences*, v. 4, n. January, 2022.

DRUSCHE, Olaf.; KRAUSE, Stefanie.; NISKI, Alfred. The, “green magnet”—research team at THGA bochum analyzes the marketability of a sustainable product [Der “Green Magnet” - Die THGA Bochum analysiert die Vermarktungsfähigkeit eines nachhaltigen Produkts]. *World Metallurgy ERZMETALL* 72(1): 39–47. Jan. 2019

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013. Towards the circular economy. Towards-the-CircularEconomy-vol.1.pdf. Disponível em:<<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Elle-MacArthur-Foundation>> Acesso em: 28 dez 2019.

ELSHKAKI, A. Sustainability of emerging energy and transportation technologies is impacted by the coexistence of minerals in nature. *Communications Earth & Environment*, v. 2, n. 1, p. 1–13, 7 set. 2021.

ERECON. (2014). Strengthening the European rare earths supply-chain. Challenges and policy options. (p.59). A report by the European rare earths competency network.

EUROPEAN COMMISSION. Report on critical raw materials and the circular economy. Raw Materials Information System (RMIS). 2018

FABRE, A.; FODHA, M.; RICCI, F. Mineral resources for renewable energy: optimal timing of energy production. *Resource and Energy Economics*, v.59. 2020.

FARIA, R. N.; LIMA, L. F. C. P. *Introdução ao magnetismo dos materiais*. São Paulo, S.P.: Editora Livraria da Física, 2005.

FAZCOMEX, 2023. Fazcomex Tecnologia para Comércio Exterior LTDA. <https://www.fazcomex.com.br/>

FERENHOF, H. A; FERNANDES, R.F.,. Systematic Review and Bibliometrics: A Step-by-step Guide. V. 1.00 Disponível em t: <http://www.igci.com.br/artigos/steps_srb.pdf> Acesso em: 5 dez. 2020.

FERNANDES SUÉLEN. Método para a avaliação da sustentabilidade ambiental da produção de ímãs de terras raras no Brasil: um estudo no laboratório fábrica. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2019.

FIEMG - 2023. A Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG) adquire laboratório de ímãs de terras raras da Codemge. Em um movimento estratégico, a FIEMG anuncia compra do LABFAB ITR, prometendo avanços no setor energético e fortalecendo a indústria mineira. Disponível em: <https://www.fiemg.com.br/noticias/fiemg-adquire-laboratorio-de-imas-de-terras-raras-da-codemge/>. Acesso em dez. 2023.

Firdaus, M., Rhamdhani, M.A., Durandet, Y. et al. Review of High-Temperature Recovery of Rare Earth (Nd/Dy) from Magnet Waste. J. Sustain. Metall. 2, 276–295 (2016). <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0045-9>

FORTI, V; BALDE, C. P; KUEHR, R.; BEL, G. The global e-waste monitor 2020: quantities, flows and the circular economy potential. 2020. Disponível em: <https://collections.unu.edu/eserv/UNU:7737/GEM_2020_def_july1.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2023.

FORTI, Vanessa et al. The Global E-waste Monitor 2020. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam, 2020.

FUJITA, Y.; MCCALL, S. K.; GINOSAR, D. Recycling rare earths: Perspectives and recente advances. MRS Bulletin, v. 47, n. 3, p. 283-288, 2022.

FRANZ, Nadia Mara. Framework aplicável em políticas de gestão dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) nos países do BRICS. 2023. Tese (Doutorado em Tecnologia e Sociedade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

GANDHA, K. et al. Recycling of additively printed rare-earth bonded magnets. Waste Management, v. 90, p. 94-99, 2019.

GARCÍA-MIRELES, Gabriel Alberto; MORAGA, Ma Ángeles; GARCÍA, Félix; CALERO, Coral; PIATTINI, Mario. Interactions between environmental sustainability goals and software product quality: A mapping study. Information and Software Technology, v. 95, n. October 2017, p. 108–129, 2018. DOI: 10.1016/j.infsof.2017.10.002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2017.10.002>.

GAUSTAD, G.; KRYSTOFIK, M.; BUSTAMANTE, M.; BADAMI, K. Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues. Resources, Conservation and Recycling, v. 135, n. August 2017, p. 24–33, 2018

Galvão, Graziela Darla Araujo et al. “Towards a value stream perspective of circular business models.” Resources Conservation and Recycling 162 (2020): 105060.

GERGORIC, M.; BARRIER, A.; RETEGAN, T. Recovery of Rare-Earth Elements from Neodymium Magnet Waste Using Glycolic, Maleic, and Ascorbic Acids Followed by Solvent Extraction. J. Sustain. Met. 2019, 5, 85–96.

GIESE, E.; BLANCO, J.; LINS, F. XAVIER, L. Mineração urbana e cooperativismo: uma abordagem sobre a reciclagem de resíduos de eletroeletrônicos. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2021.

GIESE, E. C.; LINS, F. A. F.; XAVIER, L. H. Desafios da reciclagem de lixo eletrônico e as cooperativas de mineração urbana / Challenges of e-waste recycling and urban mining cooperatives. *Brazilian Journal of Business*, v. 3, n. 5, p. 3647–3660, 18 out. 2021.

GOLEV, A.; SCOTT, M.; ERSKINE, P. D.; ALI, S. H.; BALLANTYNE, G. R. Rare earths supply chains: Current status, constraints and opportunities. *Resources Policy*, v. 41, n. 1, p. 52–59, 2014. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2014.03.004>>.

GOLLA KOTA, Anjani R.K.; GAUTAM, Sneha; SHU, Chi-Min. Inconsistencies of e-waste management in developing nations—Facts and plausible solutions. *Journal of environmental management*, v. 261, p. 110234, 2020.

GOMES, R. C. Potencial de aproveitamento de fontes secundárias para terras-raras: ímãs permanentes. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2015. 50p.

COMEX STAT - 2023. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>

GOTO, M. (2021) Rare earths? global market overview, challenges and opportunities. In: Brazilian seminar on rare earths, vol. 5. Belo Horizonte. https://www.cdn.br/images/eventos/material/slides_sbtr/1217h10_RoskillTerras_arasVisao_geral_do_mercado_global_desafios_e_oportunidadesMarcio_Goto_Roskill.

GUTFLEISCH, O. et al. Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient. *ADVANCED MATERIALS*, v. 23, n. 7, p. 821–842, 2011.

GUARNIERI, P., STREIT, J. A. C., & BATISTA, L. C. (2018). O acordo setorial de logística reversa de embalagens em geral no Brasil sob a perspectiva da economia circular. In xxi simpósio de administração da produção, logística e operações internacionais.

GREEN ELETRON. Relatório anual de acompanhamento e performance da logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes. São Paulo, 2022. 100 p. Disponível em: https://portal.api.sinir.gov.br/wpcontent/uploads/2022/12/Relatorio_Anual_de_Desempenho_GreenEletron_anoreferencia-2021.pdf. Acesso em: 31 jul. 2023.

HABIB, K. A product classification approach to optimize circularity of critical resources – the case of NdFeB magnets. *Journal of Cleaner Production*, v. 230, p. 90–97, 2019.

HAGELÜKEN, C.; MESKERS, C. E. M. Complex Life Cycles of Precious and Special Metals. In: (Ed.). *Linkages of Sustainability*, 2010. p.163-197, <https://doi.org/10.7551/mitpress/9780262013581.003.0010>.

HAMMACHE, Z. et al. Recovery of rare earth elements from electronic waste by diffusion dialysis. *Separation and Purification Technology*, v. 254, 2021.

HAYES, SARAH M., and Erin A. McCullough. “Critical Minerals: A Review of Elemental Trends in Comprehensive Criticality Studies.” *Resources Policy*, vol. 59, Dec. 2018, pp. 192–199, <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.06.015>

HEIM, J. W., & VANDER WAL, R. L. (2023). NdFeB Permanent Magnet Uses, Projected Growth Rates and Nd Plus Dy Demands across End-Use Sectors through 2050: A Review. *Minerals*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/min13101274>

HUA, H.; YASUDA, K.; NOHIRA, T. Highly Efficient and Precise Electrolysis Separation of Dysprosium from Neodymium for Magnet Scrap Recycling in Molten Salt. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, v. 10, n. 28, p. 9225-9231, 2022.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração, 2020. Políticas Públicas para a Indústria Mineral. Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 124p. Disponível em: https://portaldamineracao.com.br/wpcontent/uploads/2020/11/PP_Ind_Mineral_WEB_finl-1.pdf

IEA (International Energy Agency) The role of critical minerals in clean energy transitions. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions> 2022. Acesso em set. 2022.

IUPAC – 2016. União Internacional de Química Pura e Aplicada Tabela Periódica IUPAC dos Elementos (2016) disponível em: https://iupac.org/wp-content/uploads/2018/12/IUPAC_Periodic_Table-01Dec18.pdf acessado 5.2.19. Acesso nov. 2019.

IKRAM, A. et al. The sintering mechanism of fully dense and highly coercive Nd-Fe-B magnets from the recycled HDDR powders reprocessed by spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 774, p. 1195-1206, Feb2019.

IMAC (2023). Permanent Magnets Market Size, Share & Trends Analysis Report By Material (Ferrite, NdFeB), By Application (Consumer Goods & Electronics, Energy), By Region, And Segment Forecasts, 2023 – 2030. Disponível em: <https://www.researchandmarkets.com/report/permanent-magnet#reld0-5020905>

IMHOLTE, D. D. et al. An assessment of U.S. rare earth availability for supporting U.S. wind energy growth targets. *Energy Policy* 113. pp. 294–305, 2018.

IPEA - 2022. Instituto de pesquisa econômica aplicada (IPEA). Minerais estratégicos e críticos: uma visão internacional e da Política mineral brasileira. 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11197/1/td_2768.pdf. Acesso em: 20 ago. 2023.

IRTC – International Round Table on materials criticality. Material criticality: an overview for decision-makers.[s.l.]: EC; IRTC, 2020. No prelo

ISILDAR, Arda et al. Electronic waste as a secondary source of critical metals: Management and recovery technologies. *Resources, Conservation & Recycling*. V. 135, p. 296-312, 2018. (DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.07.031).

ISO - 59004:2023. ISO 59000 Standards for the Circular Economy: A Call for Accuracy. DOI:10.2139/ssrn.4504702. <https://www.researchgate.net/publication/372394862>

ISLAM, Md. T.; HUDA, N. Reverse logistics and closed-loop supply chain of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)/E-waste: A comprehensive literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 137, p.48-75, out. 2018. Elsevier BV.

JEON, J. H. et al. Environmentally sound technology development for processing of rare earth elements from waste permanent magnets synthetic leach solutions: recovery and separation perspectives. *Separation and Purification Technology*, v. 275, 2021.

JIN, H.; SONG, B. D.; YIH, Y.; SUTHERLAND, J. W. Sustainable Value Recovery of NdFeB Magnets: A Multi-Objective Network Design and Genetic Algorithm. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, v. 6, n. 4, p. 4767–4775, 2018a.

JIN, H.; AFIUNY, P.; DOVE, S.; FURLAN, G.; ZAKOTNIK, M.; YIH, Y.; SUTHERLAND, J.W. Life Cycle Assessment of Neodymium-Iron-Boron Magnet-to-Magnet Recycling for Electric Vehicle Motors. *Environmental Science and Technology*, v. 52 n. 6, p. 3796–3802, 2018.

JIN, H. et al. Life cycle assessment of emerging technologies on value recovery from hard disk drives. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 157, 2020.

JÖNSSON, C. et al. The extraction of NdFeB magnets from automotive scrap rotors using hydrogen. *Journal of Cleaner Production*, v. 277, 2020.

JYOTHI, R. K.; THENEPALLI, T.; AHN, J. W.; et al. Review of rare earth elements recovery from secondary resources for clean energy technologies: Grand opportunities to create wealth from waste. *Journal of Cleaner Production*, v. 267, p. 122048, 2020. Elsevier Ltd. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122048>.

KAPLAN, V. et al. Electrolytic Hydrogen Decrepitation of NdFeB Magnets Under Ambient Conditions. 2022-08-04T00:00:00Z, 2022.

KARAL, E. et al. Hydrometallurgical recovery of neodymium from spent hard disk magnets: A life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, v. 288, 2021.

KIDDEE, P., PRADHAN, J.K., MANDAL, S., BISWAS, J.K., SARKAR, B., 2020. An overview of treatment technologies of E-waste. *Handbook of Electronic Waste Management*, [S. L.], p. 1–18, 2020. Elsevier. <http://doi.org/10.1016/b978-0-12-817030-4>.

KIM, J. BANG, J. YOO, Y. SHIN, J. BAE, J. JEONG, K. KWO A comprehensive review on the pretreatment process in lithium-ion battery recycling *Journal of Cleaner Production*, 294 (2021), p. 126329, 10.1016/j.jclepro.2021.126329

KIRCHHERR, J., REIKE, D., HEKKERT, M., 2017. Conceptualizing the circular economy: na analysis of 114 definitions. *Resour. Conserv. Recycl.* 127, 221e232. Disponível em:< <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>>.

KITCHENHAM, B. Procedures for Performing Systematic Reviews, Joint Technical Report Software Engineering Group, Department of Computer Science Keele University, United King and Empirical Software Engineering. Austrália. 2004

KITCHENHAM, Barbara; PEARL BRERETON, O.; BUDGEN, David; TURNER, Mark; BAILEY, John; LINKMAN, Stephen. Systematic literature reviews in software engineering - A systematic literature review. *Information and Software Technology*, v. 51, n. 1, p. 7–15, 2009. DOI: 10.1016/j.infsof.2008.09.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009>

KLEMETTINEN, A.; Zak, A.; CHOJNACKA, I.; MATUSKA, S.; LEŚNIEWICZ, A.; WEŁNA, M.; ADAMSKI, Z.; KLEMETTINEN, L.; RYCERZ, L. LEACHING of Rare Earth Elements from NdFeB Magnets without Mechanical Pretreatment by Sulfuric (H₂SO₄) and Hydrochloric (HCl) Acids. *Minerals* 2021, 11, 1374.

KLINGER, Julie Michelle. A historical geography of rare earth elements: From discovery to the atomic age. *The Extractive Industries and Society*, 2015, 2.3: 572-580.

KOJI TOKIMATSU et al. Energy modeling approach to the global energy-mineral nexus: A case of fuel cell vehicle. *Energy Procedia*, v. 142, p. 2361–2364, 1 dez. 2017.

KOLTUN P, THARUMARAJAH A. Life Cycle Impact of Rare Earth Elements. *ISRN Metallurgy* 2014:10p. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/907536>.

KUMAR, Amit; HOLUSZKO, Maria; ESPINOSA, Denise Croce Romano. E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 122, p. 32-42, 2017.

KUMARI, A.; JHA, M. K.; PATHAK, D. D. An innovative environmental process for the treatment of scrap Nd-Fe-B magnets. *Journal of Environmental Management*, v. 273, 2020.

KUMARI, A.; SAHU, S. K. A comprehensive review on recycling of critical raw materials from spent neodymium iron boron (NdFeB) magnet. *Separation and Purification Technology*, v. 317, 2023.

LABFABITR. Laboratório Fábricas de Ímãs de Terras Raras. Disponível em: <http://labfabitr.com.br/sobre/labfabitr/>. Acesso em: 01 fev. 2023

LASEK Stanislav; DOBROVODSKÁ Nela; Kateřina SKOTNICOVÁ. Properties of Ni / Cu / Ni AND Ni Coatings for corrosion protection of NdFeB base magnets. *Metal* 2013. v.15. - 17. 5. 2013, Brno, Czech Republic, EU 2013

LAPIDO-LOUREIRO, Francisco Eduardo. O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras. Rio de Janeiro: CETEM / MCTI, 2013. 216 p. ISBN 978-85-8261-001-5

LEE, C.H.; Chen, Y.J.; LIAO, C.H.; POPURI, S.; TSAI, S.L.; HUNG, C.E. Selective Leaching Process for Neodymium Recovery from Scrap Nd-Fe-B Magnet. *Metall. Mater. Trans. A* 2013, 44, 5825–5833.

LEE, C. H.; YEN, H. Y.; LIAO, C. H.; et al. Hydrometallurgical processing of Nd–Fe–B magnets for Nd purification. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 19, n. 1, p. 102–110, 2017. Springer Japan. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10163-015-0382-y>>.

LEPAWSKY, J., 2018. Reassembling rubbish: worlding electronic waste. MIT Press.

LI Z., DIAZ, L. A., YANG Z., JIN H., LISTER, T. E., VAHIDI E., ZHAO F. Comparative life cycle analysis for value recovery of precious metals and rare earth elements from electronic waste, *Resources, Conservation and Recycling*. Pages 20-30, Volume 149, 2019.

LIU, B., ZHU, N., LI, Y., WU, P., DANG, Z., KE, Y. Efficient recovery of rare earth elements from discarded NdFeB magnets, *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 124, 2019

LI, Q. Y. et al. Reforming Magnet Waste to Prussian Blue for Sustainable Sodium-Ion Batteries. *ACS Applied Materials and Interfaces*, v. 14, n. 42, p. 47747-47757, 2022.

LI, Z. et al. Implementation and analysis of remanufacturing large-scale asynchronous motor to permanent magnet motor under circular economy conditions. *Journal of Cleaner Production*, v. 294, 2021.

LIU, S.-L. et al. Global rare earth elements projects: New developments and supply chains. *Ore Geology Reviews*, v. 157, p. 105428, 2023.

LIMA(a) P.C.R. 2012. Terras-Raras: Elementos estratégicos para o Brasil. Consultoria Legislativa da Área XII (Recursos Minerais, Hídricos e Energéticos) Câmara dos Deputados; Praça 3 Poderes, Brasília, DF, 226 p.

LIMA, F. M. S.; TARAZONA-ALVARADO, L. M.; LOVÓN-CANCHUMANI, G.; AI, S. A. R. valiação dos sistemas de abastecimento brasileiro de elementos de terras raras no sistema

multi oferta mundial. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 27,Belém (PA), 22 a 26 de Outubro, 2017.

LIMA, I. B.; LEAL FILHO, W. (Ed.). Rare earths industry technological, economic, and environmental implications. Amsterdam: Elsevier, 2016. 437 p.

LIXANDRU, A.; et al. Identification and recovery of rare-earth permanent magnets from waste electrical and electronic equipment. *Waste Management*, v. 68, p. 482–489, 2017.

LUKOWIAK, Anna et al. Rare earth elements and urban mines: Critical strategies for sustainable development. *Ceramics International*, v. 46, n. 16, p. 26247-26250, 2020.

M. WAGNER; C.P. BALDÉ; V. LUDA; I. C. NNOROM; R. KUEHR; G. IATTONI. Regional E-waste Monitor for Latin America: Results for the 13 countries participating in project UNIDO-GEF 5554. Bonn. p. 274. 2022. <http://collections.unu.edu/view/UNU:8704#viewMetadata>

MANCHERI, N.; MARUKAWA, T. Rare Earth Elements China and Japan in Industry , Trade and Value Chain. *ISS Contemporary Chinese Research Series*, v. 17, n. 17, p. 186, 2016.

MARTINS, D. C.; TEIXEIRA, C. L. P. C. R. L. L. DA S. T. M. P.; FILHO, A. P. DE Q. Minerais estratégicos e terras-raras terras-raras. 2014.

MAKAROVA, I. et al. One-step recovery of REE oxalates in electro-leaching of spent NdFeB magnets. *Separation and Purification Technology*, v. 251, 2020.

MARTINS, Tereza S.; Isolani, Paulo Celso (fevereiro de 2005). «Terras raras: aplicações industriais e biológicas». *Química Nova*: 111–117. ISSN 0100-4042. doi:10.1590/S0100-40422005000100020. Consultado em 25 de maio de 2023

MECHI, A.; SANCHES, D. L. Impactos ambientais da mineração no estado de São Paulo. *Estudos Avancados*, v. 24, n. 68, p. 209–220, 2010.

MENAD, N.; SERON, A.; SAVE, M.; et al. Recovery of permanent magnets type NdFeB from weee To cite this version: v. 2, 2016. Disponível em: < <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01298284/document>> Acesso em: 10 dez. 2020.

MMA - 2019. Ministério do Meio Ambiente (MMA) . RoHS Brasileira. GESTÃO DAS SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS.SUBSTÂNCIAS PERIGOSAS EM ELETROELETRÔNICOS (ROHS BRASILEIRA. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/seguranca-quimica/gestao-dassubstancias-quimicas/rohs-brasileira.html>. Acesso em: nov. 2023

MINERA BRASIL (2023). Agência de Notícias da Mineração Mineração Brasileira. China proíbe exportações exportações de tecnologia crucial para terras raras. Disponível em: <https://minerabrasil.com.br/china-proibe-exportacao-de-tecnologia-crucial-para-terras-raras/>. Acesso em: dez. 2023.

MINISTRY OF ENVIRONMENT, FOREST AND CLIMATE CHANGE. Extended Producer Responsibility in E-Waste Management Indian Prospective 2016. Disponível em: https://www.oecd.org/environment/waste/Session_1-EPR-in-E-wastemanagement-Indian-Pro prospective-Shruti_Rai.pdf.

M&C - 2023. MCKINSEY & COMPANY. O futuro da mobilidade no Brasil: uma rota para eletrificação. Disponível em: <https://www.mckinsey.com.br/our-insights/all-insights/o-futuro-da-mobilidade-no-brasil>. Acesso em 28 de fev. 2023.

MISHRA, B. Global sustainability of rare earth metals and compounds. *Engineering Solutions for Sustainability: Materials and Resources II*, p. 35–41, 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Definição de materiais críticos e minerais estratégicos (ver Decreto 10.657 de 2021 e Resolução n.2 de 2021 do MME) https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Decreto/D10657.htm . Acesso em: ago. 2023.

MÜNCHEN, D. D.; STEIN, R. T.; VEIT, H. M. Rare Earth Elements Recycling Potential Estimate Based on End-of-Life NdFeB Permanent Magnets from Mobile Phones and Hard Disk Drives in Brazil. *Minerals*, v. 11, n. 11, 2021.

NASSAR, N. T.; GRAEDEL, T.E.E; HARPER M., By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Sci. Adv.* 1, e1400180 (2015).

NAKANO, J. The geopolitics of critical minerals supply chains. Washington: CSIS, Mar. 2021. Disponível em: <<https://bit.ly/3MKHmZo>>. Acesso em: 8 jul. 2021.

NAKAMURA T, 201. Sistema e tecnologias de reciclagem de sucata eletrônica no Japão. *Geosyst Eng* 17(2): 104-112

NGUYEN, R. T. et al. Critical material content in modern conventional U.S. vehicle electronics. *Waste Management*, v. 109, p. 10-18, 2020.

NKINAHAMIRA, F. et al. Selective and fast recovery of rare earth elements from industrial wastewater by porous β -cyclodextrin and magnetic β -cyclodextrin polymers. *Water Research*, v. 181, 2020.

NLEBEDIM, I. C.; KING, A. H. Addressing Criticality in Rare Earth Elements via Permanent Magnets Recycling. *JOM*, v. 70, n. 2, p. 115-123, 2018.

OCHARAN; LUIS, J. et al. Análise do mercado e aspectos ambientais dos ímãs de terras raras na energia eólica no Brasil. *XX ENGEMA*. ISSN: 2359-1048 Dezembro, 2018.

ÖNAL, M. A. R.; BORRA, C. R.; GUO, M.; BLANPAIN, B.; VAN GERVEN, T. Hydrometallurgical recycling of NdFeB magnets: Complete leaching, iron removal and electrolysis. *Journal of Rare Earths*, v. 35, n. 6, p. 574–584, 2017a.

ÖNAL, M. A. R.; AKTAN, E.; BORRA, C. R.; et al. Recycling of NdFeB magnets using nitration, calcination and water leaching for REE recovery. *Hydrometallurgy*, v. 167, p. 115–123, 2017b.

OMODARA et al. Recycling and substitution of light rare earth elements, cerium, lanthanum, neodymium, and praseodymium from end-of-life applications - A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 236, 2019.

OTTONI, M.; DIAS, P.; XAVIER, L.H. A circular approach to the e-waste valorization through urban mining in Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 261, p. 120990, 2020. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120990>>.

PADHAN, E.; NAYAK, A. K.; SARANGI, K. Recovery of neodymium and dysprosium from NdFeB magnet swarf. *Hydrometallurgy*, v. 174, n. October, p. 210–215, 2017. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.10.015>>.

PAPAGIANNI, Sotiria et al. Preprocessing and Leaching Methods for Extraction of REE from Permanent Magnets: A Scoping Review. *AppliedChem*, v. 2, n. 4, p. 14, 2022.

PATCHARAWIT, T.; KRITSARIKAN, W.; YINGNAKORN, T.; KHUMKOA, S. Comparative Study of Manufacturing NdFeB Magnet Wastes Recycling: Oxidative Roasting-Selective Leaching and Whole Leaching Routes. *Recycling*, v. 7, n. 5, 2022.

PATIL, A. B.; TARIK, M.; STRUIS, R. P. W. J.; LUDWIG, C. Exploiting end-of-life lamps fluorescent powder e-waste as a secondary resource for critical rare earth metals. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 164, n. July 2020, p. 105153, 2021. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105153>>.

PAULA, L. F; PIRES, M. Crise e perspectivas para a economia brasileira. *Estudos Avançados*, 89. ed. São Paulo, v. 31, 2017. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142017000100125 . Acesso em: 24 mai. 2020.

PAULA JÚNIOR, Sérgio Eduardo Meirelles de. Criticidade das terras raras para aplicação em veículos elétricos e na energia eólica no Brasil. 2017. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

PAVÓN, S.; FORTUNY, A.; COLL, M. T.; SASTRE, A. M. Neodymium recovery from NdFeB magnet wastes using Primene 81R·Cyanex 572 IL by solvent extraction. *Journal of Environmental Management*, v. 222, p. 359-367, 2018.

PEETERS, J. R. et al. Forecasting the recycling potential based on waste analysis: A case study for recycling Nd-Fe-B magnets from hard disk drives. *Journal of Cleaner Production*, v. 175, p. 96-108, 2018.

PEIRÓ, L.; GIRÓN, CASTRO A.; DURANY, GABARRELL I X. Examining the feasibility of the urban mining of hard disk drives. *Journal of Cleaner Production*, v. 248, 2020.

PENGKY. Direct-drive-wind-turbine. 2023. Disponível em: <https://www.pengky.cn/zzhorizontal-axis-turbine/12-direct-drive-wind-turbine/Nacelle-Stator-Rotor.jpg>. Acesso em: 17 jul. 2023.

PEREIRA, R. S. C. Logística Reversa de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos: Proposta de Indicadores de Monitoramento para Órgãos Ambientais. Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo, 2018. 163p.

PROSPERI, D. et al. Thermal-stability and microstructure comparison between recycled M2M and conventionally produced sintered neodymium-iron-boron magnets. *Journal of Cleaner Production*, v. 239, p. 118091, dez. 2019.

PRODIUS, D.; GANDHA, K.; MUDRING, A.-V.; NLEBEDIM, I. C. Sustainable Urban Mining of Critical Elements from Magnet and Electronic Wastes. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, v. 8, n. 3, p. 1455–1463, 2020.

QUINTELA, Heitor Luiz Murat de Meirelles; ROCHA, Henrique Martins. Nível de maturidade e comparação dos PDPs de produtos automotivos. *Produção*, v. 17, n. 1, p. 199-217, Jan./Abr. 2007. <https://www.scielo.br/j/prod/a/qz8TG89gMMGLt6gVfnrFW7x/?format=pdf&lang=pt>
RABE, W. et al. China's supply of critical raw materials: Risks for Europe's solar and wind industries? *Energy Policy*, 101, pp.692 – 699, 2017.

REBEHY, P.C.P.W. et al. Innovative social business of selective waste collection in Brazil: cleaner production and poverty reduction. *Journal of Cleaner Production*, Oxford, v. 154,p. 462-473, 2017.

REGINA PROJECT. 2023. Rare earth global industry and new applications. Disponível em: <https://www.bmbf-client.de/en/projects/regina>. Acesso em: 24 abr. 2023.

REIKE, D., VERMEULEN, W.J.V., WITJES, S., 2018. The circular economy: new or refurbished as CE 3.0? e exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. *Resour. Conserv. Recycl.* 135, 246e264. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j>> .Acesso em: Fev. 2020

REIMER, M. V.; SCHENK-MATHES, H. Y.; HOFFMANN, M. F.; ELWERT, T. Recycling decisions in 2020, 2030, and 2040—when can substantial NdFeB extraction be expected in the EU? *Metals*, v. 8, n. 11, 2018.

RIZOS, Vasileios; RIGHETTI, Edoardo; KASSAB, Amin. CENTRE FOR EUROPEAN POLICY STUDIES – CEPS. Developing a supply chain for recycled rare earth permanent magnets in the EU: challenges and opportunities. Bruxelas, 2022.

ROBECOSAM. Global Sustainable Impact Equities. Disponível em: <https://www.robecosam.com/en/strategies/impact-equities/global-sustainable-impactequities.html>. Acesso em set. de 2019.

RADEMAKER, Jelle H.; KLEIJN, René; YANG, Yongxiang. Recycling as a Strategy against Rare Earth Element Criticality: a systemic evaluation of the potential yield of ndfeb magnet recycling. *Environmental Science & Technology*, v. 47, n. 18, p. 10129-10136, 17 set. 2013. American Chemical Society (ACS).

RASPINI, Jéssica Prats; BONFANTE, Mariele Canal; CÔNICO, Franciele Rossetti; ALARCON, Orestes Estevam; CAMPOS, Lucila M. S.. Drivers and barriers to a circular economy adoption: a sector perspective on rare earth magnets. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 24, n. 5, p. 1747-1759, 17 maio 2022. Springer Science and Business Media LLC.

RMIS (2023) – Raw Materials Information System. Disponível em: <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/eu-critical-raw-materials>. Acesso em set 2023.

ROSKILL - Mercado Minerais Tecnológicos - Tendências de Mercado e Crescimento da Demanda de Minerais Tecnológicos: Lítio, Grafita, Terras-Raras, Nióbio e Vanádio. Adimb - 2021 Ago.pd.

RYBICKA, J.; TIWARI, A.; LEEKE, G. A. Technology readiness level assessment of composites recycling technologies. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 1001-1012, 2016/01/20/2016.

SAMOUHOS, M., Taxiarchou, M., Paspaliaris, I., Karhu, M., Bourg, S., Bouyer, E., Sundqvist, L. Roadmap and innovation pathways for technology development in CRMs. Deliverable 6.4 of the SCRREEN project funded through the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 730227.

SEPE, J.; HERRMANN, H.; SALVADOR, N. N. B. MINERAÇÃO, RESPONSABILIDADE SOCIOAMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 10, n. 4, p. 401, 14 dez. 2021.

SIDRA/IBGE, 2023. <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pia-produto/quadros/brasil/2020>.

SAGAWA, M.; FUJIMURA, S.; TOGAWA, N.; YAMAMOTO, H.; MATSUURA, Y. New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe (invited). *Journal of Applied Physics*, v. 55, n. 6, p. 2083–2087, 1984.

SANTOS, Priscila Emanuele de Lucena; ARAÓJO, Francisco José Costa. O DESENVOLVIMENTO DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL: uma revisão bibliográfica. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 9, n. 6, p. 2978-2989, 24 jul. 2023.

SAVINI, F. The circular economy of waste: recovery, incineration and urban reuse. *Journal Of Environmental Planning And Management*, [S.L.], v. 64, n. 12, p. 2114- 2132, 9 fev. 2021. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/09640568.2020.1857226>.

SILVA, Jéssica Tozzo da; Barretto, Juan Carlos Guerrero; Oliveira, Carlos Roberto Mendes de; Silva, José Rocha Andrade da. A Importância no Brasil da Mineração Urbana de Terras Raras nos Resíduos Eletroeletrônicos: Cenário atual, Políticas, Extração e Perspectivas. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*. Curitiba, PR, v.2, n.2, 42, jul/dez 2017. Disponível em: <https://scholar.archive.org/work/mxjojq46u5ainelte5cbxrthp4/access/wayback/http://periodico.s.ifpr.edu.br/index.php?journal=MundiETG&page=article&op=download&path%5B%5D=357&path%5B%5D=149>

SILVESTRI, L.; FORCINA, A.; SILVESTRI, C.; TRAVERSO, M. Circularity potential of rare earths for sustainable mobility: Recent developments, challenges and future prospects. *Journal of Cleaner Production*, v. 292, p. 126089, 2021. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126089>>.

SISCOMEX. Portal único Siscomex. <https://portalunico.siscomex.gov.br/portal/>

SUI, N.; CUI, K.; HUANG, K. A new strategy of thin oil film extraction for enhanced recovery and separation of praseodymium and neodymium. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, n. 3, 2022.

SUGIMOTO, S. Current status and recent topics of rare-earth permanent magnets. *Journal of Physics D: Applied Physics*. N°44, 11 p., 2011

SCHÖNFELDT, M. et al. Magnetic and structural properties of multiple recycled and sustainable sintered Nd-Fe-B magnets. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 939, 2023.

SCHLOER, H. et al. The social footprint of permanent magnet production based on rare earth elements - a social life cycle assessment scenario. (Yan, J and Wu, J and Li, H, Ed.) *PROCEEDINGS OF THE 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED ENERGY*. Anais....Energy Procedia. 2017.

SCHULZE, Rita; BUCHERT, Matthias. Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 113, p. 12-27, out. 2016. Elsevier BV.

SCHROEDER, P.; ANGGRAENI, K.; WEBER, U. The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. *Journal of Industrial Ecology*, v. 23, n. 1, p. 77–95, 2019.

SCREEN - 2. Solutions for Critical Raw materials - a European Expert network. *FACTSHEETS UPDATES BASED ON THE EU FACTSHEETS 2020 RARE EARTH ELEMENTS*. https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/08/SCREEN2_factsheets_REE-EUROSTAT.pdf. 2022 p.6,

SHARMA, Manu; JOSHI, Sudhanshu; KUMAR, Ashwani. Assessing enablers of e-waste management in circular economy using DEMATEL method: An Indian perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, n.12, p. 13325–13338, 2020. DOI: 10.1007/s11356-020-07765-w.

SHAHBAZ, A.: A systematic review on leaching of rare earth metals from primary and secondary sources. *Minerals Engineering* 184 107632 (2022).

SHERIDAN, RS; HARRIS, IR; WALTON, A. O desenvolvimento da microestrutura durante o tratamento de hidrogenação-desproporção-dessorção-recombinação de ímãs sinterizados do tipo neodímio-ferro-boro. *J. Magn. Magn. Matéria*. 2016 , 401 , 455–462.

SMITH, B. J. et al. Rare earth permanent magnets - Supply chain deep dive assessment. U.S. Department of Energy Response to Executive Order 14017, “America’s supply chains”, n. PART 1, p. 82, 2022.

SPRECHER, B.; KLEIJN, R.; KRAMER, G. J. Recycling potential of neodymium: The case of computer hard disk drives. *Environmental Science and Technology*, v. 48, n. 16, p. 9506–9513, 2014.

STALTER, C. F. Análise comparativa da utilização de ácido orgânico versus ácido inorgânico na recuperação de neodímio presente em hard disk drives (HDs): uma abordagem técnica, ambiental e econômica. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). São Leopoldo, 2022.

STEIN, Ronei Tiago; Model; José Cristiano Mengue; VEIT, Hugo Marcelo .USO DE ÁCIDOS ORGÂNICOS PARA A LIXIVIAÇÃO DE ELEMENTOS TERRAS RARAS PRESENTE EM ÍMÃS DE APARELHOS CELULARES OBSOLETOS.v. 14 n. 14 (2023): Anais do 14º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos. <https://institutoventuri.org/ojs/index.php/FIRS/article/view/207>.

TAKEDA, O.; Lu, X.; Zhu, H.M. Recent Trend on the Studies of Recycling Technologies of Rare Earth Metals. In *REWAS 2022: Developing Tomorrow’s Technical Cycles, Volume I; The Minerals, Metals & Materials Series*; Lazou, A., Daehn, K., Fleurial, C., Gökelma, M., Olivetti, E., Meskers, C., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2022; pp. 259–266.

Talens Peiró, L., Nuss, P., Mathieux, F. and Blengini, G., Towards Recycling Indicators based on EU flows and Raw Materials System Analysis data, EUR 29435 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-97247-8, doi:10.2760/092885, JRC112720.

TECMUNDO - 2023. A evolução da energia eólica no Brasil e no mundo. Disponível em <https://www.tecmundo.com.br/ciencia/260536-evolucao-energia-eolica-brasil-no-mundo.htm>. Acesso em março 2023.

TONG, Xin; TAO, Dongyan; LIFSET, Reid. Varieties of business models for postconsumer recycling in China. *Journal of Cleaner Production*, v. 170, p. 665-673, 2018.

TUNSU, C.; PETRANIKOVA, M.; GERGORIĆ, M.; EKBERG, C.; RETEGAN, T. Reclaiming rare earth elements from end-of-life products: A review of the perspectives for urban mining using hydrometallurgical unit operations. *Hydrometallurgy*, v. 156, p. 239–258, 2015.

USGS - 2023. U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2023. Virginia. 2023. 210 p.

UMICORE-2023. Grupo global de tecnologia e reciclagem de materiais. <https://www.umicore.com.br/pt/about/sustainability/relatorio-de-conformidade-de-due-diligence-para-aquisicao-de-ouro-2022/>

UMICORE. (n.d.). Recycling. Umicore. Retrieved July 27, 2023, from <https://www.umicore.com/en/recycling/>

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Disponível em: <https://unfccc.int/> . Acesso em: 20 dez. 2020.

URBANMINE - 2023. Urban Mine Platform. <http://www.urbanmineplatform.eu/homepage>

VAN NIELEN, S. S.; SPRECHER, B.; VERHAGEN, T. J.; KLEIJN, R. Towards neodymium recycling: Analysis of the availability and recyclability of European waste flows. *Journal of Cleaner Production*, v. 394, 2023.

VANZ, S. A. de S.; CAREGNATO, S. E. Estudos de Citação: uma ferramenta para entender a comunicação científica. Em *Questão*, Porto Alegre, v. 9, n. 2, p. 295–307, 2006. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/EmQuestao/article/view/75>. Acesso em: 1 dez. 2023.

VENDITTI, Bruno. Visualizing the Critical Metals in a Smartphone. 2021. Disponível em: <https://elements.visualcapitalist.com/critical-metals-in-a-smartphone/>. Acesso em 05 de jun. 2023.

VOGEL, H.; FRIEDRICH, B. Reducing Greenhouse Gas Emission from the Neodymium Oxide Electrolysis. Part II: Basics of a Process Control Avoiding PFC Emission. *International Journal of Nonferrous Metallurgy*, v. 06, n. 03, p. 27–46, 2017

WAMEA, P.; PITCHER, M. L.; MUTHAMI, J.; SHEIKHI, A. Nanoengineering cellulose for the selective removal of neodymium: Towards sustainable rare earth element recovery. *Chemical Engineering Journal*, v. 428, 2022.

WEG. WEG lança novo aerogerador de 7 MW. 2023. Disponível em: <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/weg-lanca-novaerogerador-de-7-mw>. Acesso em: 10 jul. 2023.

WENG, Z. et al. Assessing the energy requirements and global warming potential of the production of rare earth elements. 2016.

WULF, C.; ZAPP, P.; SCHREIBER, A.; MARX, J.; SCHLÖR, H. Lessons Learned from a Life Cycle Sustainability Assessment of Rare Earth Permanent Magnets. *Journal of Industrial Ecology*, v. 21, n. 6, p.1578-1590, 4 maio 2017.

XAVIER, L. H.; LINS, F. A. F. MINERAÇÃO URBANA DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS: Uma nova fronteira a explorar no Brasil. *Brasil Mineral*, v. 1, n. 379, p. 22–26, 2018.

XAVIER, L.H. Mineração urbana e a gestão de resíduos eletroeletrônicos: Estado da arte do arcabouço legal e normativo. Centro de Tecnologia mineral CETEM, 2019.

XAVIER, L. H.; GIESE, E. C.; RIBEIRO-DUTHIE, A. C.; LINS, F. A. F. Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining. *Resources Policy*, , n. August, p. 101467, 2019. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101467>>.

XAVIER, L.H., OTTONI, M. Economia Circular e Mineração Urbana. Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos. 1ª Edição. Rio de Janeiro:CETEM, 2019.

XAVIER, L.H.S.M., Ottoni, M. (org) et al. Mineração urbana: conceitos e análise do potencial dos resíduos eletroeletrônicos. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. 2021.

XAVIER, L.H.; Contador, L.; Freitas, E.S.; Mofati, L.M.; Silva, R.S.; Fontes, A. Diagnóstico da Mineração Urbana dos Resíduos Eletroeletrônicos no Brasil: projeto MINARE : relatório final. Rio de Janeiro : CETEM/MCTI, 2023. 38 p. ISBN 978-65-5919-042-3

XAVIER, Lúcia Helena; OTTONI, Marianna; ABREU, Leonardo P.P. A comprehensive review of urban mining and the value recovery from e-waste materials, *Resources, Conservation & Recycling*, 190, 2023.

XIAO, F.; HU, W.; ZHAO, J.; ZHU, H. Technologies of Recycling REEs and Iron from NdFeB Scrap. *Metals*, v. 13, n. 4, 2023.

XU, X.; STURM, S.; SAMARDZIJA, Z.; et al. A facile method for the simultaneous recovery of rare-earth elements and transition metals from Nd-Fe-B magnets. *Green Chemistry*, v. 22, n. 4, p. 1105–1112, 2020.

XU, H. et al. Nd-Fe-B: From sludge waste to powders via purification and modified Ca78reduction reaction process. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 543, n. March 2021, p. 168606, 2022.

XUE, W. et al. Selective extraction of Nd(III) by novel carboxylic acid based ionic liquids without diluent from waste NdFeB magnets. *Journal of Molecular Liquids*, v. 364, 2022.

YADAV, K. K.; ANITHA, M.; SINGH, D. K.; KAIN, V. NdFeB magnet recycling: Dysprosium recovery by non-dispersive solvent extraction employing hollow fibre membrane contactor. *Separation and Purification Technology*, v. 194, p. 265-271, 2018.

YANG, Mingyu; CHEN, Lin; WANG, Jiangjiang; MSIGWA, Goodluck; OSMAN, Ahmed I.; FAWZY, Samer; ROONEY, David W.; YAP, Pow Seng. Circular economy strategies for combating climate change and Other environmental issues. *Environmental Chemistry Letters*, v. 21, n. 1, p. 55–80, 2023. DOI: 10.1007/s10311-022-01499-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01499-6>.

YANG, Y.; LAN, C.; GUO, L.; et al. Recovery of rare-earth element from rare-earth permanent magnet waste by electro-refining in molten fluorides. *Separation and Purification Technology*, v. 233, 2020.

YANG, Y.X.; Walton, A.; Sheridan, R.; Guth, K.; Gauss, R.;Gutfleisch, O.; Buchert, M.; Steenari, B.M.; Van Gerven, T.; Jones, P.T.; et al. REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. *J. Sustain. Met.* 2017, 3, 122–149.

YAO, T. et al. Dynamic neodymium stocks and flows analysis in China. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 174, 2021

YIN, Robert K. Case Study Research: Design and Methods: Design and Methods. In: 2014, *Anais [...]*. : SAGE Publications, 2014. p. 313.

YUE, M. et al. Recycling of Nd-Fe-B Sintered Magnets Sludge via the Reduction-Diffusion Route To Produce Sintered Magnets with Strong Energy Density. *Acs Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 6, n. 5, p. 6547-6553, May2018.

YUE, M.; YIN, X.; LIU, W.; LU, Q. Progress in recycling of Nd-Fe-B sintered magnet wastes. *Chinese Physics B*, v. 28, n. 7, 2019.

YUKARI, S.A. Setor do aço brasileiro: tendências para 2035, desafios e boas práticas de economia circular. [s.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/12/12139/tde-26062024-100156/publico/SolangeYukariAkiamaCorrigida.pdf>>

YUKSEKDAG, A. et al. Comprehensive characterization of secondary sources originating from Turkey in terms of rare earth elements and scandium. *Science of The Total Environment*, v. 777, 2021.

Z. Li, L.A. Diaz, Z. Yang, H. Jin, T.E. Lister, E. Vahid, F. Zhao Comparative life cycle analysis for value recovery of precious metals and rare earth elements from electronic waste *Resour. Conserv. Recycl.*, 149 (2019), pp. 20-30

ZAKOTNIK, M.; HARRIS, I. R.; WILLIAMS, A. J. Possible methods of recycling NdFeB-type sintered magnets using the HD/degassing process. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 450, n. 1–2, p. 525–531, 2008.

ZAKOTNIK, M.; TUDOR, C. O. Commercial-scale recycling of NdFeB-type magnets with grain boundary modification yields products with “designer properties” that exceed those of starting materials. *Waste Management*, v. 44, p. 48–54, 2015.

ZAKOTNIK, M. et al. Analysis of energy usage in Nd–Fe–B magnet to magnet recycling. *Environmental Technology & Innovation*, v. 5, p. 117-126, 2016/04/01/2016.

ZOCCOLI, C.. Desafios no fluxo e no encadeamento produtivo de recicláveis pós-consumo. 2023. (Apresentação de Trabalho/Conferência ou palestra).

Zhao, H.Y.; Yin, W.Z.; Ding, G.F.; Ju, J.Y.; Tang, X.; Chen, R.J.; Yuan, J.H.; Yan, A.R. Preparation of anisotropic (Ce, Nd, Pr)-Fe-B powder with HDDR method from wasted sintered magnets. *J. Magn. Magn. Mater.* 2022, 562, 169745.

ZHANG, S.; DING, Y.; LIU, B.; CHANG, C. C. Supply and demand of some critical metals and present status of their recycling in WEEE. *Waste Manag*, v. 65, p. 113-127, Jul2017.

ZHANG, J.; ANAWATI, J.; YAO, Y.; AZIMI, G. Aerimetallurgical Extraction of Rare Earth Elements from a NdFeB Magnet Utilizing Supercritical Fluids. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, v. 6, n. 12, p. 16713–16725, 2018.

ZHANG, J.; ANAWATI, J.; YAO, Y.; AZIMI, G. Supercritical Fluid Extraction for Urban Mining of Rare Earth Elements. *Rare Metal Technology* 2019, p.63-72, 2019. Springer International Publishing.

ZHOU, B.; LI, Z.; CHEN, C. Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. *Minerals*, v. 7, n. 11, 2017. Disponível em:< <https://doi.org/10.3390/min7110203>>.

ZHOU, X. et al. Synthesis of hard magnetic NdFeB composite particles by recycling the waste using microwave assisted auto-combustion and reduction method. *Waste Management*, v. 87, p. 645-651, 2019

APÊNDICE A – ROTEIRO DE ENTREVISTAS PARA LEVANTAMENTO DE DADOS RECICLADORAS

Bloco 1 (Introdução):

1. Identificação

Empresa/Organização:

Nome:

Cargo:

2. Fale sobre sua organização e seu envolvimento com os eletroeletrônicos no Brasil até os dias atuais.
3. Fale sobre as interações/relacionamentos que a sua organização mantém com os atores interessados (fornecedores) no setor eletroeletrônico.
4. Os fornecedores são locais da região?
5. Com quantos clientes a empresa mantém relações?
6. A empresa possui Sistema de Logística Reversa?
8. Na sua opinião quais foram as principais razões que resultaram na expansão das empresas recicladoras de eletroeletrônicos?
9. Quais são as especificidades do setor eletroeletrônico (seu potencial no que tange a recuperação dos ímãs de HD)?

Bloco 2 (Informações técnicas/reciclagem):

1. O ímã importado possui especificação sobre a camada de revestimento Ni-Cu-Ni ou Zn/recobrimento epóxi? Como sua empresa faz para retirá-lo?
2. Quais as regulamentações/normas observadas pela empresa para a gestão sustentável dos produtos eletroeletrônicos (partes, peças e componentes) pós-consumo?
3. A empresa considera o futuro dos ímãs pós-consumo promissor? Como a empresa o vê daqui a cinco anos?
4. Como a empresa considera um sistema de produção, distribuição, e destinação para novos ciclos?
5. A empresa já realizou alguma prática para dismantelar eletroeletrônicos de fim de vida para obter o componente (ímã)? Há interesse da organização para fazer essa análise?
6. A empresa conhece os possíveis compradores do ímã reciclado, e para quais aplicações? Se sim, descrevas.
7. A empresa já tem ou pensou em estratégias de devolução e fim da vida útil: projetar sistemas de devolução, remanufaturar produtos e materiais de reciclagem?
8. Existe uma lacuna na literatura relacionada a dificuldade de rastreamento para ímãs no pós-consumo, por exemplo, volume, peso, em que estado/país que se encontra.
9. A empresa considera esse rastreamento uma possibilidade futura? Se sim, descreva como poderia ser esse processo. Se não, quais os desafios encontrados atualmente?
10. Você tem algum comentário ou sugestão sobre a prática de reciclagem a acrescentar?

Fonte: elaborado pela autora (2023)

APÊNDICE B – ROTEIRO DE ENTREVISTAS PARA LEVANTAMENTO DE DADOS EMPRESAS PRODUTORAS

1. Gestão

Empresa/Organização:

- 1.1. Quais práticas (ex: desmontagem) se realiza após o recebimento do motor pós-consumo? Qual a destinação dos ímãs especificamente?
- 1.2. Existe uma inspeção de recebimento e acondicionamento dos ímãs novos na Empresa? Se sim, relate como é realizada. Se não, comente como poderia ser essa inspeção.
- 1.3. Qual o volume comprado desses ímãs de Nd-Fe-B por ano?
- 1.4. O que é feito com os ímãs fora de conformidade ao longo da fabricação? Existe um ponto de coleta dentro da fábrica?
- 1.5. Qual a proporção entre os ímãs importados e os fabricados?
- 1.6. Qual volume de ímãs comercializados no último ano?
- 1.7. Quais as regulamentações e normas observadas para a gestão sustentável dos produtos e materiais pós-consumo?

2. Recuperação de materiais

- 2.1 Há uma correlação entre o grau de corrosão observado nos ímãs e o país de origem?
- 2.2 Com relação aos componentes do gerador eólico/carros elétricos, existe algum tipo de relacionamento com o cliente pós-consumo, com a finalidade de recolher o produto pós-consumo?
- 2.3 Existe mapeado a localização dos fornecedores?

3. Informações técnicas/reciclagem

- 3.1 Como é realizada a colocação dos ímãs nos motores elétricos e geradores eólicos?
- 3.2 Qual a quantidade de ímãs de Nd-Fe-B utilizada nos geradores eólicos? Qual peso em kg e tamanho destes ímãs?
- 3.3 Qual a quantidade de ímãs de Nd-Fe-B utilizada no segmento dos motores W22 e W12? Qual peso em kg e tamanho destes ímãs?
- 3.4 O ímã importado possui especificação sobre a camada de revestimento Ni-Cu-Ni ou Zn/recobrimento epóxi? Se sim, poderia descrever o valor (percentual) em composição desses elementos químicos.
- 3.5 A empresa desenvolve ou aplica técnicas de reciclagem para recuperação de ímãs?

4. Ações futuras

- 4.1 A empresa considera o futuro dos ímãs pós-consumo promissor? Como a empresa o vê daqui a cinco anos?
- 4.2 Como a empresa considera um sistema de produção, distribuição, e destinação para novos ciclos?
- 4.3 A empresa já realizou alguma prática para dismantelar o aero gerador/motor de fim de vida para obter o componente (ímã)? Há interesse da organização para fazer essa análise?
- 4.4 A empresa conhece os possíveis compradores do ímã reciclado, e para quais aplicações? Se sim, descrevas.
- 4.5 Existe uma lacuna na literatura relacionada a dificuldade de rastreamento para ímãs pós-consumo, por exemplo, volume, peso, em que estado/país que se encontra. A empresa considera esse rastreamento uma possibilidade futura? Se sim, descreva como poderia ser esse processo. Se não, quais os desafios encontrados atualmente?

Fonte: elaborado pela autora (2022)

APÊNDICE C – PARECER DO COMITÊ DE ÉTICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA - UFSC



PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

Título da Pesquisa: ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL DE RECUPERAÇÃO DE LIGAS DE Nd-Fe-B PARA UTILIZAÇÃO NA RECICLAGEM EM UM LABORATÓRIO FÁBRICA DE ÍMÃS NO BRASIL - LABFABITR

Pesquisador: FRANCIELE ROSSETTI CUNICO

Área Temática:

Versão: 3

CAAE: 71710323.0.0000.0121

Instituição Proponente: Departamento de Engenharia Mecânica - Centro Tecnológico

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 6.505.760

Apresentação do Projeto:

Esta pesquisa faz parte da tese de doutorado é desenvolvida por Franciele Rossetti Cunico junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da UFSC, sob a orientação do Professor Dr. Orestes Estevam Alarcon e coorientação da Professora Dra. Lúcia Helena da Silva Maciel Xavier do Centro Tecnologia Mineral (CETEM).

tem como objetivo estudar a viabilidade técnica e ambiental para recuperação de material secundário a partir dos ímãs de NdFeB para utilização no Laboratório Fábrica de Ímãs no Brasil. Há uma lacuna na literatura que necessita conectar soluções tecnológicas à economia circular dos ímãs. Assim faz-se necessário a integração de todos os atores da cadeia para compreensão e exploração das soluções tecnológicas existentes e fomentar uma avaliação constante das rotas de circularidade.

O objetivo é realizar entrevistas junto a profissionais e especialistas, visando obter estratégia de mineração urbana para a cadeia de ímãs de terras raras no Brasil. Ter visibilidade da unidade produtiva, quais limitações os processos de recuperação de ímãs apresentam, compreender a importância de recuperar recursos secundários diante da quantidade importada para o desenvolvimento deste setor.

Endereço: Universidade Federal de Santa Catarina, Prédio Reitoria II, R: Desembargador Vitor Lima, nº 222, sala 701
Bairro: Trindade **CEP:** 88.040-400
UF: SC **Município:** FLORIANOPOLIS
Telefone: (48)3721-6094 **E-mail:** cep.propesq@contato.ufsc.br

Continuação do Parecer: 6.505.760

pesquisa é desenvolvida de forma exploratória-descritiva, os esclarecimentos teóricos foram assimilados a partir de levantamento bibliográfico, análise de documentos/relatórios respaldados em legislações no âmbito nacional e internacional. O Procedimento para entrevistas é utilizar a técnica de entrevista semiestruturada com roteiro de entrevista e os resultados serão analisados de acordo com a metodologia de análise de conteúdo. as mesmas serão realizadas online via webconferência – RNP, WhatsApp e e-mail, bem como uma visita técnica a empresa produtora e a empresa de fabricação dos ímãs no Brasil. Esse trabalho é importante, pois abarca soluções tecnológicas e as compreende, reinserindo materiais secundários em cadeias produtivas, como alternativa para mitigar os impactos da exploração dos recursos naturais e do potencial de contaminação, advinda da gestão inadequada de resíduos.

A estrutura química dos ímãs de terras raras (ITRs), compostos de neodímio-ferro-boro (NdFeB), podem conter outros elementos de terras raras (ETRs), como praseodímio, térbio e disprósio (MÜNCHEN; STEIN; VEIT, 2021). Esses elementos supracitados são adicionados aos ímãs de NdFeB para aumentar a coercividade e melhorar o desempenho em altas temperaturas. Os metais de transição como cobalto, gálio e cobre também são adicionados para melhorar o processamento dos ITRS e as propriedades magnéticas (NLEBEDIM; REI, 2017). Entre suas aplicações, os ímãs de NdFeB, são componentes essenciais em equipamentos eletroeletrônicos, turbinas eólicas, veículos elétricos e equipamentos de ressonância magnética (CIACCI et al., 2019; YUE et al., 2019; DUTTA et al., 2016; BUSCH et al., 2014). O mercado global tem previsão significativa de crescimento até o ano de 2030, deverá atingir 200 mil toneladas, principalmente na produção de turbinas eólicas e motores de acionamento direto para veículos elétricos (GOTO, 2021). A China domina o mercado de ETRs e após a paralização das atividades decorrentes do Coronavírus, em 2020, foi responsável por 92% da produção global anual de ímãs, isto é, a etapa com maior valor agregado na cadeia (SMITH et al., 2022). Além disso, estima-se uma taxa de 12,3 % de crescimento, ultrapassando US\$ 5,3 bilhões referente ao ano base 2021 para US\$ 9,6 bilhões em 2026 (DONG et al., 2017; DROBNIK; MASTALERZ, 2022). A International Market Analysis Research Consulting (IMARC, 2023), mencionou em seu relatório que o tamanho do mercado global de ímãs permanentes valha US\$ 39,71 bilhões até 2030. Nessa percepção, os ETRs presentes nos ímãs de NdFeB devido à sua crescente demanda e disponibilidade limitada, se enquadram na categoria crítica (KUMARI; SAHU, 2023).

Endereço: Universidade Federal de Santa Catarina, Prédio Retórica II, R: Desembargador Vitor Lima, nº 222, sala 701
 Bairro: Trindade CEP: 88.040-400
 UF: SC Município: FLORIANÓPOLIS
 Telefone: (48)3721-6094 E-mail: cep.propesq@contato.ufsc.br

Continuação do Parecer: 6.505.760

Favorecendo o risco de suprimento e a volatilidade do preço do material para o mercado (LIMA et al., 2017; RABE et al., 2017). Portanto, é uma atividade estrategicamente necessária tornar-se independente dessas matérias-primas, com alternativas para reduzir a dependência econômica do monopólio chinês, bem como os picos de preços (KLOSSEK; KULLIK; VAN DEN BOOGAART, 2016; COMISSÃO EUROPEIA, 2017). Entre as opções possíveis, para atender à demanda desses metais críticos, os ímãs de NdFeB no pós-consumo surgiram como um potencial recurso secundário de terras raras com uso de estratégias voltadas a reciclagem (KUMARI; SAHU, 2023). Assim, diminui a necessidade de uso de matéria-prima proveniente da mineração primária (YUE et al., 2017). Outra estratégia de recuperar recurso pós-consumo que vem recebendo atenção de pesquisas é a reciclagem direta ou reciclagem de ligas, onde o produto final é um material que pode ser reintroduzido na cadeia produtiva de ímãs (DIEHL et al., 2018). Segundo Haider et al. 2020, para essa categoria de recuperação, solução tecnológica de redução calcotérmica é uma alternativa e tem suas vantagens como: transformar os produtos pós-consumo (ITRs) em pós reciclados de elevada qualidade com baixo impacto ambiental. Porém, são necessários ajustes no material recuperado para que este possa ser utilizado para a produção de ímãs de elevado desempenho (YUE et al., 2018), por exemplo, recuperar a fase Nd₂Fe₁₄B que foi oxidada durante os processos pré-consumo no parque fabril, como a etapa de usinagem. A recuperação de ITRs requer a decisão de reutilizar diretamente ou recuperar o conteúdo de TRs (NLEBEDIM; REI, 2018).

Contudo, foi demonstrado que as propriedades magnéticas dos ímãs reciclados atendem às especificações dos ímãs primários, mesmo após vários ciclos (SCHÖNFELDT et al., 2023). No entanto, a falta de soluções tecnológicas viáveis para a reciclagem apresenta muitos desafios para a recuperação em escala industrial, segundo pesquisadores do Institute for Critical Materials, nos Estados Unidos. Esses desafios, como o uso de produtos químicos perigosos, a geração de emissões e o aumento do consumo de energia, estão dificultando os esforços e impedindo que os incumbentes integrem processos de recuperação em suas instalações (NLEBEDIM; KING, 2017). Diante disso, investidores têm buscado organizações sustentáveis como pré-requisito para acordos comerciais entre países, o que representa menor risco de queda no valor das ações por reputação ou danos envolvendo a marca ou acidentes ambientais (REBECOSAM, 2018).

Neste contexto, a abordagem de mineração urbana (MU) emprega soluções circulares e de reciclagem para recuperação de recursos advindos dos produtos pós-consumo (XAVIER; OTTONI; ABREU, 2023). O presente estudo, discute as soluções tecnológicas, para uma visão sistêmica e

Endereço: Universidade Federal de Santa Catarina, Prédio Reitoria II, R: Desembargador Vitor Lima, nº 222, sala 701
 Bairro: Trindade CEP: 88.040-400
 UF: SC Município: FLORIANOPOLIS
 Telefone: (48)3721-6094 E-mail: cep.propesq@contato.ufsc.br

Continuação do Parecer: 6.505.760

colaborativa apresentando o ímã de NdFeB como potencial recurso para obter materiais críticos, da mesma forma, mitigar os potenciais impactos aplicáveis à recuperação de material secundário nas tecnologias existentes, bem como vantagens e limitações. Desse modo, percebe-se que há uma lacuna na literatura que necessita conectar tecnologia à economia circular dos ímãs (SHAHBAZ, 2022; YUKSEKDAG et al., 2021). Para fornecer à agilidade intrínseca às cadeias de suprimentos resilientes, há necessidade de um portfólio das soluções tecnológicas de recuperação de ETRs (FUJITA; MCCALL; GINOSAR, 2022). Parte das soluções tecnológicas são adaptadas de processos minerometalúrgicos tradicionais, usualmente utilizados para obter material de fonte primária, representando um aspecto positivo da mineração urbana (XAVIER et al., 2023). Por outro lado, consolidar os volumes de ITRs para tornar os processos economicamente viáveis continua sendo um desafio (KUMARI; SAHU, 2023; XAVIER et al., 2023). Nessa percepção, estudos apontam a recuperação dos materiais com soluções tecnológicas, muitas vezes em escala laboratorial, diferentes processos de reciclagem que resultam em variadas taxas de recuperação, receitas e custos (SHAHBAZ, 2022; YUKSEKDAG et al., 2021).

A gestão dos materiais de fonte secundária precisam ser melhor explorados para uso estratégico em escala industrial, de modo a preservar as reservas naturais e não ficar à mercê da dependência chinesa (KUMARI; SAHU, 2023). Essa tendência global rumo a economia circular permite a criação de cadeias de suprimentos comprometidas em obter materiais críticos ou estratégicos. Logo, a fim de garantir o fornecimento ininterrupto de minerais críticos, melhorar a exploração e extração da mina urbana, assinar acordos comerciais com diferentes países, adquirir ativos de mineração no exterior, as soluções tecnológicas para recuperar recurso secundário foram enfatizados nesta tese. Contudo, para que nosso país se torne um player, capaz de recuperar recurso secundário, no contexto da economia circular, as seguintes questões devem ser respondidas: (1) Que soluções tecnológicas existem e são viáveis ambientalmente para serem implementadas no processo de recuperação dos ETRs a partir de ímãs de NdFeB? (2) Qual a quantidade de entrada de ímãs de NdFeB em território nacional?

Objetivo da Pesquisa:

Objetivo Primário

O objetivo principal da pesquisa é estudar a viabilidade técnica e ambiental dos processos tecnológicos existentes, para recuperar material secundário a partir dos ímãs de NdFeB. Tal estudo auxiliará na adoção da melhor solução tecnológica e ambiental para recuperar recursos

Endereço: Universidade Federal de Santa Catarina, Prédio Reitoria II, R: Desembargador Vitor Lima, nº 222, sala 701
 Bairro: Trindade CEP: 88.040-400
 UF: SC Município: FLORIANÓPOLIS
 Telefone: (48)3721-6094 E-mail: cep.propesq@contato.ufsc.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA - UFSC



Continuação do Parecer: 6.505.760

secundários na cadeia produtiva de ITRs no Brasil.

Objetivo Secundário

Identificar e estudar as soluções tecnológicas existentes para recuperar recurso secundário a partir de ímãs de NdFeB pós-consumo; Estruturar as soluções tecnológicas com base em critérios de sustentabilidade como: reagentes, CO2 equivalente e limitações; Comparar o nível de maturidade das soluções tecnológicas para obter recurso secundário, escala laboratorial versus escala industrial; Identificar normas ou instrumentos legais; Mapear o potencial brasileiro de ímãs de NdFeB para projeção do fluxo de material; e Validar a viabilidade de recuperar recursos secundários envolvendo atores da cadeia de ITRs.

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

Riscos

O possível risco e desconforto que a pesquisa poderá trazer a(o) Sr. (a) é o constrangimento de ser entrevistado, bem como a interrupção das suas atividades. Você não deve participar deste estudo se sentir qualquer desconforto em fornecer as informações solicitadas. Você pode interromper a entrevista a qualquer momento.

Benefícios

Não há benefícios diretos para os participantes. O grande benefício social associado a esta pesquisa está relacionado à contribuição para o conhecimento científico na área de Ímãs de Terras Raras e Sustentabilidade. Espera-se que este estudo contribua para o conhecimento científico na área de Ímãs de Terras Raras e Reciclagem, trazendo informações importantes sobre a viabilidade de se recuperar as terras raras, que impulsionam a tecnologia sustentável por um futuro equilibrado, onde inovação e preservação caminham lado a lado. Garantir a segurança e a sustentabilidade do abastecimento de matérias-primas é essencial. As iniciativas emblemáticas desempenham um papel importante para políticas de matérias-primas e ajudam a aumentar a contribuição da indústria para o PIB brasileiro.

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

Ver item "Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações"

Endereço: Universidade Federal de Santa Catarina, Prédio Reitoria II, R: Desembargador Vitor Lima, nº 222, sala 701
 Bairro: Trindade CEP: 88.040-400
 UF: SC Município: FLORIANOPOLIS
 Telefone: (48)3721-6094 E-mail: cep.propesq@contato.ufsc.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA - UFSC



Continuação do Parecer: 6.505.760

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

A folha de rosto foi assinada pela pesquisadora responsável Franciele Rossetti Cunico e por João Batista Rodrigues Neto.

O cronograma ALTERADO prevê início das entrevistas para 29 de setembro de 2023.

O orçamento prevê um gasto em custeio, com financiamento próprio, de R\$ 2.500,00.

Foram apresentados os dois roteiros de entrevistas.

Foi apresentado o TCLE baseado na resolução 466/12 do CNS

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

Parecer anterior

=====

Apesar de não apresentar a carta de resposta ao parecer anterior, duas das três adequações foram realizadas.

1. Incluir no(s) TCLE(s) informação de que foi elaborado em DUAS vias, rubricadas e assinadas (item IV.5.d da res. 466/12).

Observações

A. O recolhimento presencial do TCLE é obrigatório, exceto em situações de impossibilidade, como é o caso das entrevistas remotas. por isso o documento deve ser elaborado em duas vias rubricadas e assinadas, sendo que uma ficará com o participante da pesquisa.

O QUE FOI FEITO -

B. Corrigir o endereço do CEP (<https://cep.ufsc.br/>).

O QUE FOI FEITO - Corrigido.

Endereço: Universidade Federal de Santa Catarina, Prédio Reitoria II, R: Desembargador Vitor Lima, nº 222, sala 701
Bairro: Trindade CEP: 88.040-400
UF: SC Município: FLORIANOPOLIS
Telefone: (48)3721-6094 E-mail: cep.propesq@contato.ufsc.br

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA - UFSC**



Continuação do Parecer: 6.505.760

C. Lembramos que ainda faltam anuências de 3 empresas das 4.

O QUE FOI FEITO - Foram apresentadas as anuências das 4 empresas.

Parecer atual

=====

Apesar de, NOVAMENTE, não apresenta a carta de resposta ao parecer anterior, todas as adequações foram realizadas.

Reforçamos que o projeto só pode ser iniciado APÓS a aprovação do mesmo por esse comitê.

Projeto APROVADO com o o termo TCLE do arquivo TCLE_correto.pdf postado em 25/10/2023 às 10:44:43.

Considerações Finais a critério do CEP:

Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_2179362.pdf	25/10/2023 10:50:03		Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE_Empresa B.pdf	25/10/2023 10:47:22	FRANCIELE ROSSETTI CUNICO	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE_correto.pdf	25/10/2023 10:44:43	FRANCIELE ROSSETTI CUNICO	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE_Empresa C.pdf	25/10/2023 10:19:42	FRANCIELE ROSSETTI CUNICO	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE_Empresa D.pdf	25/10/2023 10:11:27	FRANCIELE ROSSETTI CUNICO	Aceito

Endereço: Universidade Federal de Santa Catarina, Prédio Reitoria II, R: Desembargador Vitor Lima, nº 222, sala 701
 Bairro: Trindade CEP: 88.040-400
 UF: SC Município: FLORIANOPOLIS
 Telefone: (48)3721-6094 E-mail: cep.propesq@contato.ufsc.br

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA - UFSC**



Continuação do Parecer: 6.505.760

TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE_Empresa A.pdf	25/10/2023 10:09:31	FRANCIELE ROSSETTI CUNICO	Aceito
Folha de Rosto	folha_de_rosto.pdf	17/07/2023 15:24:10	FRANCIELE ROSSETTI CUNICO	Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	Projeto_detalhado.pdf	12/07/2023 22:42:38	FRANCIELE ROSSETTI CUNICO	Aceito

Situação do Parecer:

Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:

Não

FLORIANOPOLIS, 14 de Novembro de 2023

Assinado por:
Luciana C Antunes
(Coordenador(a))

Endereço: Universidade Federal de Santa Catarina, Prédio Reitoria II, R: Desembargador Vitor Lima, nº 222, sala 701
Bairro: Trindade **CEP:** 88.040-400
UF: SC **Município:** FLORIANOPOLIS
Telefone: (48)3721-6094 **E-mail:** cep.propesq@contato.ufsc.br

ANEXO A – MEMBROS DO GT ROHS BRASILEIRA

Sigla	Instituições Membro do GT RoHS Brasileira
ABILUMI	Associação Brasileira de Fabricantes e/ou Importadores de Produtos de Iluminação
ABILUX	Associação Brasileira da Indústria de Iluminação
ABIMAQ	Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos
ABIMED	Associação Brasileira da Indústria de Alta Tecnologia de Produtos para Saúde
ABIMO	Associação Brasileira da Indústria de Artigos e Equipamentos Médicos, Odontológicos, Hospitalares e de Laboratórios
ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABIQUM	Associação Brasileira da Indústria Química
ABINPET	Associação Brasileira da Indústria de Produtos para Animais de Estimação
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAC	Associação Brasileira de Avaliação da Conformidade
ABRACI	Associação Brasileira de circuitos impressos, montagem de placas, teclados de Membrana e Componentes Eletrônicos
ABREE	Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos
ABRINQ	Associação Brasileira dos Fabricantes de Brinquedos
ACIGAMES	Associação Comercial, Industrial e Cultural dos Jogos Eletrônicos do Brasil
Anac	Agência Nacional de Aviação Civil
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
Anfavea	Superintendência de Outorga e Recursos à Prestação
Antt	Agência Nacional de Transportes Terrestres
Anvisa	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CBDL	Câmara Brasileira de Diagnóstico Laboratorial
CNC	Confederação Nacional do Comércio de Bens, Serviços e Turismo
ELETROS	Associação Nacional dos Fabricantes Produtos Eletroeletrônicos
FBOMS	Fórum Brasileiro de ONGs e Movimentos Sociais para o meio Ambiente
Ibama	Diretoria de Qualidade Ambiental (Diqua)
Ibama	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
Ibama	Diretoria de Proteção Ambiental (Dipro)
Ibama	Coordenação de Operações de Fiscalização (Cofis)
Ibama	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IDPV	Instituto o Direiro por um Planeta Verde
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDIC	Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
MDIC	CGEL/DEICT
MJ	Ministério da Justiça e Segurança Pública
MJ	Secretaria Nacional do Consumidor
MMA	Ministério do Meio Ambiente
P&D	Associação P&D Brasil
PDE	Rede Sibratec de Produtos e Dispositivos Eletrônicos - PDE
Sindipeças	Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores

Fonte: MME (2023)²⁰

²⁰ <https://antigo.mma.gov.br/seguranca-quimica/gestao-das-substancias-quimicas/rohs-brasileira.html>

ANEXO B – LISTAGEM DAS EMPRESAS QUE ATUAM NA GESTÃO DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS NO BRASIL

#	CNPJ	MATRIZ	EMPRESA	ESTADO
19	9436253000187	S	Associação Gestora de E-LETRO	SP
41	35690381000162	S	CIRCULAR BRAIN PLATAFORMA DE TECNOLOGICA ECONOMIA CIRCULAR S/A	SP
43	24365731000107	S	CODEL RECICLAGEM LTDA	MG
75	13197457000142	S	ECOBRAZ ASSOCIACAO AUXILIO A RECICLAGEM DE ELETRONICOS E INCLUSAO DIGITAL	SP
93	15375887000170	S	ESPIRITO SANTO AMBIENTAL LTDA	ES
116	04634211000137	S	FIBRACABOS AMBICOM TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE LTDA	PR
117	74404229000128	S	FLEXTRONICS INTERNATIONAL TECNOLOGIA LTDA	SP
125	06997714000100	S	FUTURA SOLUCOES AMBIENTAIS LTDA	RJ
126	13046682000115	S	G SERVA DE SOUSA - EIRELI	MA
128	16731043000187	S	GAG RECICLAGEM DE ELETRONICOS LTDA.	SP
195	10804529000111	S	INDUSTRIA FOX ECONOMIA CIRCULAR LTDA	SP
197	04081969000357	S	INSTITUTO PARA DESENVOLVIMENTO AMBIENTAL E TECNOLÓGICO - IDEA-CICLICA- Lâmpada Legal - Magé	RJ
278	09590516000108	S	NATAL RECICLAGEM LTDA	RN
283	13556596000152	S	PARCS COMERCIO ATACADISTA DE RESIDUOS LTDA	PR
317	33677576000147	S	RECYCLART RECICLAGEM DE RESIDUOS ELETROELETRONICOS LTDA	MT
321	24357020000182	S	RE-TECK COMERCIAL EXPORTADORA E LOGISTICA REVERSA LTDA	SP
332	03749826000146	S	SAN LIEN EXPORTADORA E IMPORTADORA LTDA	SP
351	36193962000151	S	SUNR RECICLAGEM FOTOVOLTAICA LTDA	SC
353	03297005000116	S	TECFILM MATERIAL HOSPITALAR EIRELLI	SP
360	59205294000130	S	TRAMPPPO COMERCIO E RECICLAGEM DE PRODUTOS INDUSTRIAIS LTDA	SP
371	11613991000102	S	VERTAS - COMERCIO DE RESIDUOS TECNOLOGICOS LTDA	SP
380	43705054000165	S	YBY COLETIVO	SP
382	11876239000146	S	ZERO IMPACTO LOGISTICA REVERSA E GERENCIAMENTO DE RESIDUOS LTDA	GO

FONTE: Adaptado de CETEM (2021)