

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

WONG WEI WEI

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE MOAGEM DE IMÃS PROVENIENTES DE HDs DE
COMPUTADORES E NOTEBOOKS EM FIM DE VIDA ÚTIL**

SÃO LEOPOLDO

2022

WONG WEI WEI

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE MOAGEM DE IMÃS PROVENIENTES DE HDs DE
COMPUTADORES E NOTEBOOKS EM FIM DE VIDA ÚTIL**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientadora: Prof. (a). Dra. Feliciane Andrade Brehm

SÃO LEOPOLDO

2022

W872a	<p>Wong, Wei Wei. Avaliação de métodos de moagem de imãs provenientes de HDs de computadores e notebooks em fim de vida útil / por Wong Wei Wei. -- São Leopoldo, 2022.</p> <p>94 f. : il. (algumas color.) ; 30 cm.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2022. Orientação: Prof^a. Dr^a. Feliciane Andrade Brehm, Escola Politécnica.</p> <p>1.Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 2.Imãs. 3.Compostos de neodímio. 4.Metais de terras-raras. 5.Aparelhos e materiais eletrônicos – Reaproveitamento. 6.Lixo eletrônico – Reaproveitamento. I.Brehm, Feliciane Andrade. II.Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 620.284 620.284:546.65</p>
-------	---

Catalogação na publicação:
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

WONG WEI WEI

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE MOAGEM DE IMÃS PROVENIENTES DE HDs DE
COMPUTADORES E NOTEBOOKS EM FIM DE VIDA ÚTIL**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 14 de janeiro de 2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes – UNISINOS

Prof^a. Dr^a. Daiane Calheiro Evaldt – UNISINOS

Prof^a. Dr^a. Claudia Trindade Oliveira – FEEVALE

À minha família e aos meus amigos, que
contribuíram no meu crescimento e nesta
conquista.

AGRADECIMENTOS

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, em especial à professora Feliciane Andrade Brehm, meu sincero agradecimento pela oportunidade dada me agraciando com essa pesquisa e pela sua orientação e experiências profissionais. Igualmente ao professor Carlos Alberto Mendes Moraes, pelo ensinamento, acompanhamento e dedicação na orientação, à professora Daiane Calheiro Evaldt por sua indispensável e importante participação em minha Banca de Qualificação.

À Carline Fabiane Stalter, amiga, companheira e parceira nas conversas e desabafos, pelo apoio em todos os momentos nessa jornada e pela atenção e paciência dirigida a mim, sempre que solicitada, além de estar sempre disposta a esclarecer minhas dúvidas.

A todos os colegas do Laboratório de Materiais de Construção Civil e do Laboratório de Química da Escola Politécnica, pela ajuda concedida sempre que solicitada. Da mesma forma, à Aline Diehl, integrante do Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais, por toda a ajuda dispensada nas análises efetuadas.

À Cooperativa de Paulo Freire, pela colaboração, oferecimento e disponibilização dos materiais para a realização desta pesquisa.

Em especial ao Herlon de Oliveira Morsch da empresa Bomber Speaker, por disponibilizar o medidor de Gauss com o objetivo de realizar medição de magnetismo e por sua orientação e experiência na área.

Conjuntamente e do mesmo modo, a todos que foram essenciais para mim neste processo de aprendizagem profissional, pois sem eles não seria possível atingir esta etapa de formação.

No princípio, minha atitude com relação às pessoas era ouvir suas palavras e acreditar em sua capacidade de agir em conformidade das suas palavras. Atualmente, minha atitude com relação às pessoas é ouvir suas palavras, e observar sua conduta. Não há nada mais sujo que besouro de estrume, mas ao se transformar em cigarra, essa desfruta dos orvalhos e ventos outonais; as ervas daninhas podres não têm luz, mas os vagalumes nelas criados brilham sob a lua da noite de verão. Diante disso, pode-se saber que o puro emerge do imundo e a luz provém da escuridão.

Confúcio. (Tradução feita pela autora)

RESUMO

Os ímãs de Hard Disks (HDs) possuem em sua composição o neodímio (Nd), elemento químico pertencente ao grupo dos lantanídeos e conhecido como elemento das Terras Raras. A necessidade desse elemento no desenvolvimento de tecnologia de ponta e a dependência mundial do fornecimento chinês, traz um grande alerta quanto à necessidade de se buscarem fontes alternativas para suprir a demanda desse material. Com o crescente aumento dos resíduos oriundos de equipamentos eletroeletrônico (REEE), a mineração urbana pode ser aplicada para obtenção de matéria-prima, a partir dos REEE, com a finalidade de minimizar os impactos ambientais e recuperar os materiais e metais presentes nestes resíduos. A reciclagem é uma das alternativas para atender a essa demanda por produtos que utilizam terras raras e, ao mesmo tempo, poder reduzir a poluição. Dessa maneira, este estudo realizou as etapas que precedem a reciclagem dos ímãs: desmontagem e balanço de massa dos HDs bem como seus componentes, a segregação dos componentes, desmagnetização e avaliação do magnetismo. Após, foi realizada a moagem dos ímãs. Algumas premissas foram definidas para a determinação da metodologia de moagem mais adequada, como menor consumo energético e maior rendimento no processo de moagem. A desmagnetização foi atingida em 45 minutos por meio do aquecimento a 350°C no forno Mufla. Nos métodos determinados no presente estudo, a moagem mais eficiente é a realizada no moinho excêntrico, em comparação ao moinho de bolas. O resultado indica que o tempo de 45 minutos apresentou o melhor rendimento, com 20,95% de eficiência na moagem atingindo granulometria de <0,25mm. Logo, determinou-se que a moagem no moinho excêntrico é a mais eficiente em relação ao tempo e consumo energético, conforme o método empregado neste trabalho.

Palavras-chave: desmagnetização; moagem; neodímio; terras raras.

ABSTRACT

Hard Disks (HDs) magnets have neodymium (Nd) in their composition, a chemical element belonging to the lanthanide group and known as the Rare Earth element. The need for this element in the development of cutting-edge technology and the global dependence on Chinese supply, brings a great alert regarding the need to seek alternative sources to meet the demand for this material. With the growing increase in waste from electrical and electronic equipment (WEEE), urban mining can be applied to obtain raw material from WEEE, in order to minimize environmental impacts and recover the materials and metals present in these wastes. Recycling is one of the alternatives to meet this demand for products that use rare earths and, at the same time, reduce pollution. In this way, this study carried out the steps that precede the recycling of magnets: disassembly and mass balance of the HDs as well as their components, the segregation of components, demagnetization and evaluation of magnetism. Afterwards, the magnets were milled. Some assumptions were defined to determine the most appropriate grinding methodology, such as lower energy consumption and higher yield in the grinding process. Demagnetization was achieved in 45 minutes by heating to 350°C in a muffle furnace. In the methods determined in the present study, the most efficient grinding is performed in the eccentric mill, compared to the ball mill. The result indicates that the time of 45 minutes showed the best yield, with 20.95% efficiency in grinding, reaching a granulometry of <0.25mm. Therefore, it was determined that grinding in the eccentric mill is the most efficient in terms of time and energy consumption, according to the method used in this work.

Key-words: desmagnetization; grinding; neodymium; rare-earth.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tabela de elemento periódica da IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada).....	25
Figura 2 – Reservas de terras raras em todo o mundo a partir de 2018	26
Figura 3 – Disco Rígido (HDs).....	28
Figura 4 – Posição da placa de circuito impresso (esquerda) e ímãs permanentes (direita) na amostra de disco rígido.	30
Figura 5 – Mecanismos de fragmentação: (a) impacto, (b) compressão, (c) abrasão ou cisalhamento	35
Figura 6 – Interior do moinho de faca.....	41
Figura 7 – Moinho de bola.....	42
Figura 8 – Moinho excêntrico	43
Figura 9 – Etapas aplicadas na metodologia	45
Figura 10 – Fluxograma da metodologia utilizada para desmontagem dos HDs	46
Figura 11 – Componentes constituintes dos HDs	46
Figura 12 – Componentes dos Hds.....	47
Figura 13 – Fluxograma da metodologia utilizada para segregação dos materiais...	49
Figura 14 – Fluxograma de caracterização	49
Figura 15 – Preparo de amostra no cadinho para desmagnetização.....	50
Figura 16 – Instrumento de Medição Gaussímetro	51
Figura 17 – Ensaio de avaliação magnetização	52
Figura 18 – Fluxograma do processo de moagem.....	53
Figura 19 – Agitador de peneira.....	55
Figura 20 – Preparação da amostra a ser moída no moinho excêntrico	57
Figura 21 – HD 3.5" montado (computador). Medidas (10×15×2). 1- Vista de cima, 2- Vista de baixo, 3- HD aberto.	64
Figura 22 – Segregação do HD 3.5" (computador) por tipo de material: 1- Metais não ferrosos (ligas de Al), 2- Metais ferrosos (aço comum e inoxidável), 3- Plásticos, 4- Materiais com substâncias de interesse, 5- Outros materiais.....	65
Figura 23 – HD 2.5" montado (notebook). Medidas (7×10×0,7). 1- Vista de cima, 2- Vista de baixo, 3- HD aberto	66

Figura 24 – Segregação do HD 2.5" (notebook) por tipo de material: 1- Metais não ferrosos, 2- Metais ferrosos, 3- Plásticos, 4- Materiais com substâncias de interesse, 5- Outros materiais.....	66
Figura 25 – Amostras desmagnetizadas separadas de acordo com temperatura e tempo para avaliação no Gaussímetro.....	67
Figura 26 – Tamanhos variados de ímãs	68
Figura 27 – Moagem no moinho excêntrico	73

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Representatividade de cada material na massa de HDs 3.5" polegadas	64
Gráfico 2 – Representatividade de cada material na massa dos HDs 2.5" polegadas	65

LISTA DE PLANILHAS

Planilha 1 – Características da carga de bolas utilizada no moinho de bolas	56
Planilha 2 – Características da carga de bolas utilizada no moinho excêntrico	57
Planilha 3 – Sequência de desmontagem de disco Rígido (HD).....	60
Planilha 4 – Tempo de desmontagem HD 3.5" polegadas.....	62
Planilha 5 – Resultado da avaliação do Gaussímetro (Média).....	67
Planilha 6 – Resultados do ensaio de magnetização	68
Planilha 7 – Resultado na moagem do equipamento moinho de bolas	71
Planilha 8 – Resultado na moagem do equipamento moinho excêntrico	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do elemento Neodímio	31
Tabela 2 – Composição dos ímãs	32
Tabela 3 – Remoção percentual de magnetismo dos ímãs, usando diferentes tempos e temperaturas	34
Tabela 4 – Classificação dos moinhos quanto às moagens fina e ultrafina	38
Tabela 5 – Estudos de moagem de ímãs NdFeB	39
Tabela 6 – Diâmetro e massa de corpos moedores	54
Tabela 7 – Consumo energético no processo de desmagnetização	69
Tabela 8 – Composição dos ímãs	70
Tabela 9 – Frações granulométricas obtidas com o moinho de faca	71
Tabela 10 – Consumo energético nos moinhos	74
Tabela 11 – Análise FRX após moagem	75
Tabela 12 – Análise FRX da fração <0,25mm	76

LISTA DE SIGLAS

µm	Micrômetro
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
At	Ástato
Ca	Cálcio
CEI	Comunidade dos Estados Independentes
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DRX	Difração de Raios-X
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
EE	Equipamento Eletroeletrônico
ETR	Elementos de terras raras
ETRL	Elementos de terras raras leves
ETRP	Elementos de terras raras pesadas
EU	União Europeia
Fe	Ferro
FRX	Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Hc	Campo coercitivo
HDs	Hard disk drives (Disco Rígido)
HP	Horse Power (Cavalo Vapor)
IUPAC	União Internacional de Química Pura e Aplicada
K	Potássio
kG	Quilo-Gauss
kW	Kilowatts
kWh	Quilowatt-hora
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mg	Magnésio
mG	Miligauss
MGOe	Mega-Gauss Oersted

mm	Milímetro
Nb	Nióbio
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
Nd	Neodímio
NdFeB	Neodímio-ferro-boro
Ni	Níquel
Oe	Oersted
Pr	Praseodímio
REEE	Resíduos de equipamentos eletroeletrônico
Rpm	Rotação por minuto
SI	Sistema Internacional
Si	Silício
SSD	Solid State Drive
UNU	United Nations University
V	Vanádio
W	Tungstênio
Wb	Weber
Wi	Work Index
Zn	Zinco
Zr	Zircônio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 ESTRUTURA DE PESQUISA	20
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	20
1.3 PROBLEMA	20
1.4 OBJETIVOS	20
1.4.1 Objetivo geral	21
1.4.2 Objetivos específicos	21
1.5 JUSTIFICATIVA	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 RESÍDUO DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE)	23
2.2 MINERAÇÃO DE TERRAS RARAS	24
2.2.1 Metais terras raras	24
2.2.2 Mineração urbana	27
2.3 HARD DISK DRIVES.....	27
2.3.1 Desmontagem	28
2.4 IMÃS DE NEODÍMIO-FERRO-BORO	30
2.4.1 Neodímio	31
2.4.2 Características de ímãs Neodímio-ferro-boro (NdFeB)	32
2.5 DESMAGNETIZAÇÃO	33
2.6 PRINCÍPIO DE FRAGMENTAÇÃO	34
2.7 CONCEITO DE COMINUIÇÃO	35
2.8 CONCEITO DE MOAGEM	35
2.8.1 Eficiência de moagem	39
2.8.2 Corpo moedor	40
2.9 TIPOS DE MOINHOS.....	40
2.9.1 Moinho de faca	40
2.9.2 Moinho de bolas	41
2.9.3 Moinho excêntrico	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 PROCESSO DE DESMONTAGEM DE HDS	45
3.1.1 O tempo de desmontagem	47

3.2 BALANÇO DE MASSA DOS HDS DE COMPUTADORES DE MESA E NOTEBOOKS.....	48
3.3 AVALIAÇÃO DE TEMPERATURAS E TEMPOS PARA DESMAGNETIZAÇÃO.....	49
3.3.1 Desmagnetização térmica	49
3.3.1.1 Preparação das amostras	50
3.3.1.2 Teste de desmagnetização	51
3.3.1.3 Cálculo de consumo energético em função da eficiência de magnetização.....	52
3.3.2 Fluorescência de Raios X.....	52
3.4 MOAGEM DE IMÃS E CARACTERIZAÇÃO GRANULOMETRICA	53
3.4.1 Moagem de imãs de NdFeB.....	53
3.4.2 Tipos de moagem e tempo de moagem	54
3.4.2.1 Moinho de faca.....	54
3.4.2.2 Moinho de bolas	55
3.4.2.3 Moinho excêntrico	56
3.4.3 Fluorescência de Raios X.....	57
3.4.4 Análise química das frações granulométricas em FRX.....	58
3.4.5 Consumo energético no processo de moagem.....	58
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	59
4.1 DESENVOLVIMENTO DO MANUAL DE DESMONTAGEM DE HDS	59
4.1.1 Tempo de desmontagem	61
4.2 BALANÇO DE MASSA DOS HDS DE COMPUTADORES DE MESA E NOTEBOOKS.....	63
4.2.1 Balanço de massa e segregação dos componentes.....	63
4.3 AVALIAÇÃO DE TEMPERATURA E TEMPO PARA DESMAGNETIZAÇÃO DOS IMÃS	66
4.3.1 Desmagnetização térmica	66
4.3.1.1 Preparação das amostras e teste de magnetização	66
4.3.1.2 Cálculo de consumo energético na desmagnetização por aquecimento em forno mufla	69
4.3.2 Fluorescência de Raios X.....	69
4.4 MÉTODOS DE MOAGEM.....	70
4.4.1 Moagem de imãs de NdFeB.....	70
4.4.1.1 Moinho de faca.....	70

4.4.1.2 Moinho de bolas	71
4.4.1.3 Moinho de excêntrico	72
4.4.1.4 Cálculo de consumo energético na cominuição e moagem	73
4.4.2 Fluorescência de Raios X.....	75
4.4.3 Análise química das frações granulométricas via fluorescência de Raios X	76
5 CONCLUSÃO	77
REFERÊNCIAS.....	79
APÊNDICE A – DEMONSTRAÇÃO DA DESMONTAGEM DE DISCO RÍGIDO (HD)	84
APÊNDICE B – DESCRIÇÃO TÉCNICA E FÍSICA DAS AMOSTRAS DE HDS 3.5” ANALISADAS	88
APÊNDICE C – DESCRIÇÃO TÉCNICA E FÍSICA DAS AMOSTRAS DE HDS 2.5” ANALISADAS	91
APÊNDICE D – MASSA DOS MATERIAIS DOS HDS 3.5” POLEGADAS	92
APÊNDICE E – MASSA DOS MATERIAIS DOS HDS 2.5” POLEGADAS	94

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem sido observado um aumento significativo do uso de produtos eletroeletrônicos na sociedade. Com isso, essa indústria tem como prioridade a busca constante por novas tecnologias. A fabricação destes equipamentos aumenta constantemente, devido ao fato de ser uma tecnologia de vida útil curta e de fácil acesso à população.

Segundo LIN, NAKAJIMA E ISHIHARA (2019), a quantidade de geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) está aumentando em todo o mundo. O gerenciamento de REEE é uma questão importante, pois contém substâncias tóxicas, como cádmio, mercúrio e chumbo, que podem causar contaminação ambiental, se não tiverem tratamento adequado. Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos também contêm recursos valiosos, que podem ser reciclados para substituir o uso de recursos primários, incluindo ferro, cobre, alumínio, ouro e outros metais.

De acordo com YONG, LIM E ILANKOON (2019), tendo em vista o aumento do consumo de equipamentos eletroeletrônicos no mundo e sua redução de vida útil, têm desencadeado a geração de grande quantidade de sucata eletroeletrônica. Os REEE representam a fonte de resíduos com maior taxa de crescimento, cerca de 30 a 50 milhões de toneladas de REEE são descartados em todo o mundo, com uma taxa de crescimento anual de 3% a 5%.

O gerenciamento desses resíduos, que contêm substâncias críticas, valiosas e algumas potencialmente perigosas, requerem um processo de reciclagem cuidadoso para evitar, por um lado, problemas ambientais e de saúde, por outro lado, os encargos ambientais associados à extração e refino de novos produtos primários (ONGONDO, WILLIAMS e CHERRETT, 2014).

Conforme VIET E BERNARDES (2015), um dos eletroeletrônicos (EE) mais utilizados globalmente é o computador. De acordo com München (2016), um computador é formado por um conjunto de diversas peças diferentes (*hardware*), como placa de vídeo, placa-mãe, fonte, gabinete, há também o *hard disk drives* (HDs), que contém um componente em evidência atualmente no mundo da alta tecnologia: o ímã de neodímio-ferro-boro (NdFeB), essencial para a gravação e leitura dos dados armazenados.

Esses componentes também estão presentes em outros dispositivos, como fones de ouvidos, celulares e em equipamentos de ressonância magnética. Quanto a composição, além de ferro, neodímio e boro, os imãs contêm cobalto, disprósio e pequena quantidade de praseodímio (MÜNCHEN, 2016).

Terras raras são uma série de elementos químicos encontrados na crosta terrestre, que são vitais para muitas tecnologias. Existem 17 elementos que são considerados elementos de terras raras: Lantânio, Cério, Praseodímio, Neodímio, Promécio, Samário, Európio, Gadolínio, Térbio, Disprósio, Hólmio, Érbio, Túlio, Itérbio, Lutécio, Ítrio e Escândio. Destes, 15 elementos são da série de lantanídeos e dois elementos adicionais (Ítrio e Escândio) que compartilham propriedades químicas semelhantes (WALTON *et al.*, 2015).

De acordo com WALTON *et al.* (2015), houve uma explosão de demanda de metais de terras raras¹. A China fornece mais de 85% dos metais de terras raras no mercado mundial, porém a China, começou a impor cotas de exportação de óxidos de terras raras, o que acabou afetando diretamente os demais países. Essa demanda de preço deve-se ao domínio de tecnologias de fabricação de produtos finais como por exemplo os geradores eólicos e baterias, e as restrições ambientais provocaram o aumento dos preços pelo chineses. Isso resultou em flutuações drásticas de preços para tais metais, em particular neodímio, praseodímio e disprósio, os constituintes de terras raras dos imãs de NdFeB.

Diante deste cenário, é de fundamental importância realizar a reciclagem dos imãs neodímio-ferro-boro. Para MÜNCHEN (2016), a recuperação de neodímio e de outros elementos terras raras, a partir de REEE, depende de três fatores: viabilidade econômica e benefícios ambientais e à saúde humana.

Em face do exposta, segundo MÜNCHEN (2016), a reciclagem envolve quatro etapas: 1) coleta de sucata, 2) desmontagem, 3) separação, e 4) processamento. Após a desmontagem e separação dos componentes, a etapa do processamento de moagem é destacada. Esta trata-se de uma operação de fragmentação fina que proporciona a obtenção de um produto adequado à concentração ou a qualquer processo industrial, como por exemplo a lixiviação, combustão, entre outros (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

¹ Metais de terras raras: de acordo com a classificação de IUPAC, são 17 elementos químicos, dos quais 15 pertencem, na tabela periódica dos elementos químicos, ao grupo dos lantanídeos (Lantânio ao Lutécio), aos quais se juntam o Escândio e o Ítrio, elementos que ocorrem nos mesmos minérios e apresentam propriedades físico-químicas semelhantes.

A moagem é uma etapa de suma importância, a qual tem por objetivo reduzir o produto a um tamanho de partícula desejado, que pode ser processada quimicamente ou fisicamente, extraíndo o mineral procurado.

1.1 ESTRUTURA DE PESQUISA

O presente projeto de qualificação está estruturado em quatro capítulos. No primeiro capítulo, apresenta-se uma visão geral do contexto do estudo, objetivo geral e os objetivos específicos. No capítulo dois, apresentam-se a revisão bibliográfica, onde a revisão foi elaborada a fim de se obter o embasamento teórico a respeito de NdFeB, a abundância de terras raras, principalmente o processo de cominuição e moagem de ímãs de NdFeB. A abordagem destes temas permite construir e compreender o contexto da problemática da reciclagem dos ímãs de neodímio, a partir de Hds e, a importância da cominuição e moagem. No terceiro capítulo, aborda-se a metodologia, bem como os materiais e métodos utilizados para desenvolvimento da pesquisa. No quarto capítulo, abordam-se os resultados preliminares do estudo e, por fim, apresenta-se a conclusão da pesquisa.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente projeto visa estabelecer os métodos de moagem de ímãs de HDs, provenientes de computadores de mesa e notebooks e avaliar a eficiência na obtenção do produto.

1.3 PROBLEMA

Diante do cenário atual, com a demanda de terras raras no mercado industrial de mineradores no mundo, devem ser adotadas medidas de reciclagem e recuperação de ímãs permanentes de neodímio, com a intenção de garantir o incentivo à inovação tecnológica. Uma questão a ser abordada, é verificar se é viável e eficiente moer ímãs de NdFeB, para realizar a reciclagem?

1.4 OBJETIVOS

Na sequência, são apresentados os objetivos deste trabalho.

1.4.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral determinar o método de moagem mais eficiente, relacionado com o rendimento durante o processo de moagem de ímãs de NdFeB, a fim de atingir a granulometria menor que 0,25mm.

1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Desenvolver um método de desmontagem de HDs (hard disk drives);
- b) Efetuar o balanço de massa dos resíduos de HDs (hard disk drives) de computadores de mesa e notebooks;
- c) Avaliar diferentes temperaturas e tempos para desmagnetização;
- d) Caracterizar e avaliar frações granulométricas obtidas nos moinhos de faca e excêntricos.

1.5 JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa justifica-se pelo fato da contribuição na reciclagem de ímãs permanentes NdFeB provenientes de computadores e notebooks, contudo surge como uma oportunidade de recuperação de metais de terras raras. A recuperação dos metais de terras raras, contido nos ímãs permanentes (NdFeB), faz com que haja economia dos recursos naturais retirados da natureza, o qual resulta na volta destas matérias-primas a novos ciclos produtivos.

O motivo pelo qual se realiza esta pesquisa, é o fato de que grandes parcelas dos estudos existentes abordam somente as rotas de recuperação de Neodímio ou mesmo de outros metais de terras raras e na importância da recuperação. No entanto, não é destacada a importância do beneficiamento, da escolha da particularidade e forma de moagem a ser realizada, o qual beneficia na rota de recuperação deste metal.

A moagem trata-se de uma operação de fragmentação fina que proporciona a obtenção de um produto adequado à concentração ou a qualquer processo industrial. Em caso de uma escolha inadequada da forma de moagem, esta pode influenciar uma série de fatores nas rotas sequenciais de recuperação de metais de

terras raras, como por exemplo no processo de lixiviação, pelletização e entre outros (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

Conforme o estudo München (2016), ele verificou que as partículas com menor granulometria apresentam a maior quantidade de material lixiviado logo, conclui-se que uma maior área superficial favorece o processo subsequente, ou seja, a lixiviação.

Sendo assim, a pesquisa aqui apresentada determinará o método de moagem mais eficiente, relacionado com o rendimento durante o processo de moagem, de imãs de NdFeB, a fim de atingir a granulometria $<0,25\text{mm}$.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresentará o estado da arte dos resíduos eletroeletrônicos, bem como a abundância e importância de terras raras, o neodímio. Na sequência, haverá uma abordagem dos conceitos e a importância da mineração e moagem.

2.1 RESÍDUO DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE)

O gerenciamento de REEE tornou-se importante nos últimos anos devido à sua complexidade. Vários aspectos do gerenciamento de REEE foram explorados para identificar os atuais desafios e oportunidades para o gerenciamento adequado desses resíduos. Pois o aumento dos níveis de REEE, seu tratamento, descarte inadequado e inseguro por meio da queima a céu aberto nos lixões, representam desafios significativos para o meio ambiente e a saúde humana (FORTI, 2019).

A Diretiva Europeia 2012/19/EU define os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) como:

Equipamento eletroeletrônico que constituem resíduos, na seção do artigo 3º, ponto 1, da Diretiva 2008/98/EC, incluindo todos os componentes, subconjuntos e materiais consumíveis que fazem parte integrante do produto no momento em que este é descartado (UNIÃO EUROPEIA, 2012, p. 6).

Os REEE representam a parcela de resíduos que cresce exponencialmente no mundo. Segundo a UNU (United Nations University, 2020), a geração de REEE em 2019 cresceu 53,6 milhões de toneladas no mundo, equivalente a 7,3 kg por habitante e, em comparação ao ano de 2014, foram gerados 9,2 milhões de toneladas, quase a massa de 4.500 torres Eiffel por ano. A estimativa prevê que a quantidade de REEE aumente para 74,7 milhões de toneladas até 2030, ou seja, ainda há estimativa de crescimento na geração desse resíduo.

Além desta rápida taxa de crescimento, segundo FORTI (2019), os REEE são uma mistura complexa de componentes e materiais, contendo elementos valiosos, que podem ser reciclados e substâncias perigosas que podem causar impacto ambiental negativo.

De acordo com YANG *et al.* (2016), elementos de terras raras como Nd, Dy e Pr também são encontrados nos REEE em volumes que crescem com a evolução tecnológica. Há uma crescente concorrência no uso, particularmente no setor automotivo, energia eólica, entre outras.

Conforme LIXANDRU *et al.*, (2017), terras raras extraídas são usadas principalmente para a produção do imã permanente e outros tipos de ligas, bem como catalisadores químicos, materiais de polimento e fósforos. Os imãs NdFeB são usados em HDs de computadores e alto-falantes de sistema de áudio, turbinas eólicas, automóveis e, em menor grau, em máquinas de ressonância magnética.

2.2 MINERAÇÃO DE TERRAS RARAS

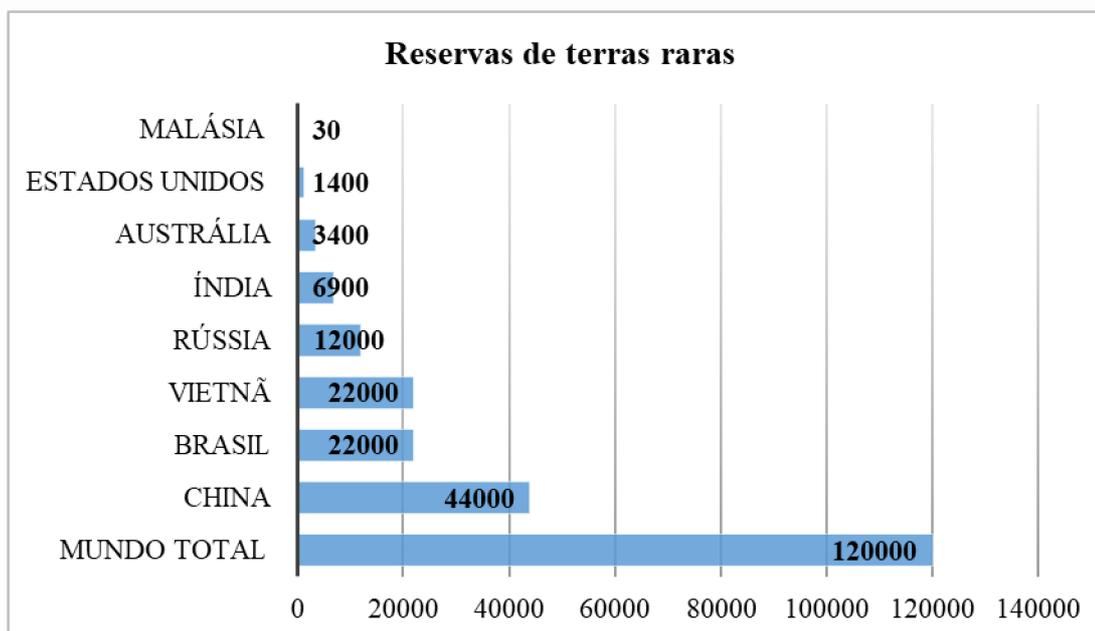
2.2.1 Metais terras raras

Os elementos terras raras (ETR) são um grupo de 17 elementos químicos da série de Lantanídeos (número atômico entre 57 a 71) da tabela periódica (figura 2), começando por Lantânio (La) e terminando por Lutécio (Lu), acrescidos do escândio (Sc) e do Ítrio (Y), que apresentam comportamentos químicos similares. O grupo dos Lantanídeos é composto pelos seguintes elementos: Lantânio, Cério, Praseodímio, Neodímio, Promécio, Samário, Európio, Gadolínio, Térbio, Disprósio, Hólmio, Érbio, Túlio, Itérbio e Lutécio. Terras raras são abundantes na crosta terrestre, algumas ainda mais do que cobre, chumbo, ouro e platina (WANG *et al.*, 2020).

Um elemento de terras raras (ETR), pode ser classificado como leve ou pesado. Os elementos de terras leves (ETRL) incluem os elementos de lantanídeo (La) do número atômico² 57 até o número atômico 64 Gadolínios (Gd), e os elementos de terras raras pesados (ETRP) incluem os elementos de lantanídeo do número atômico 65 Tébrios (Tb) até o número atômico 71 Lutécios (Lu) (FILHO; GALAÇO; SERRA, 2019).

De acordo com os dados do US Geological Survey (2019), as reservas mundiais de terras raras são de aproximadamente 120 milhões de toneladas. A maioria dessas reservas está localizada na China e, estimada em cerca de 44 milhões de toneladas. Os Estados Unidos também possuem reservas significativas, estimada em 1,4 milhões de toneladas. Além da China, as terras raras podem ser encontradas na Índia, Austrália, Brasil e Malásia. Abaixo, na figura 2, tem-se ilustrada as reservas globais de terras raras, estimadas a partir de 2018, por país.

Figura 2 – Reservas de terras raras em todo o mundo a partir de 2018



Fonte: Us Geological Survey, 2019.

De acordo com WANG, GUO, LIU e WEI (2020), as terras raras começaram a ser amplamente utilizadas desde a década de 1960, devido ao desenvolvimento de telas de televisão, indústria de petróleo e sistemas de computadores. Como

² Número atômico é um termo usado para designar o número de prótons encontrados no núcleo de um átomo.

resultado, a produção e o consumo de terras raras começaram a crescer rapidamente.

A produção de ímãs é a aplicação com maior consumo de elementos de terras raras (GOONAN, 2011). Dois tipos desses ímãs são produzidos: os de neodímio-ferro-boro e os de samário-cobalto. Segundo a Comissão Europeia, cerca de 13% da produção mundial de neodímio na mineração é utilizada na fabricação de ímãs permanentes (WALTON E WILLIAMS, 2015). Como os ímãs de neodímio contêm densidade de fluxo magnético superior, os ímãs NdFeB são amplamente utilizados em unidades de HDs, alto-falantes estéreo, geradores de turbinas eólicas e carros elétricos e híbridos (GOONAN, 2011).

2.2.2 Mineração urbana

A mineração urbana diz respeito a todas as atividades e processos de recuperação de compostos, energia e elementos de produtos, edifícios e resíduos gerados pelo metabolismo urbano (COSSU e WILLIAMS, 2015). O conceito recebeu atenção em grande parte impulsionado pela preocupação, com relação a diminuição da disponibilidade de recursos naturais não-renováveis.

De acordo com GUTBERLET (2015), a mineração urbana é o processo de recuperar materiais e componentes, também definido como “*a reutilização sistemática de materiais antropogênicos das áreas urbanas*”. Os objetivos gerais da mineração urbana são a conservação de recursos e a proteção ambiental, além de gerar benefícios econômicos.

2.3 HARD DISK DRIVES

Os discos rígidos, também conhecido como HDs, é um componente eletrônico localizado em computadores e tem como principal função o armazenamento de dados. (Figura 3).

Figura 3 – Disco Rígido (HDs)



Fonte: A autora, 2020.

A tecnologia de HD foi introduzida pela *International Business Machines*³ (IBM) em 1956 e, é o dispositivo de armazenamento secundário dominante para computadores desde a década de 1960. O design atual dos HDs é bastante uniforme, consistindo em um número de pratos giratórios revestidos com uma camada magnética usada para armazenar dados, um braço atuador móvel com uma cabeça magnética usada para ler dados e um ímã, usado para direcionar o braço atuador. Atualmente, os HDs são os maiores usuários de ímãs de NdFeB em equipamentos eletroeletrônicos (SILVA, 2015).

De acordo com JEREMY (2017), a vida útil média de um disco rígido é de três a cinco anos, o que significa que quase todas as unidades produzidas em 2016 provavelmente já chegaram ao fim de sua vida útil. Em locais de reciclagem, os discos rígidos descartados geralmente são tratados como outros produtos similares por separação, trituração ou esmagamento comercial e, em seguida, as frações resultantes são separadas manualmente em diferentes fluxos de materiais.

2.3.1 Desmontagem

Atualmente, a demanda global pela redução de gastos com energia e matérias-primas, no processo de fabricação, tornou-se uma questão muito emergente, o que aumentou numerosamente a necessidade de fabricação mais eficiente. Como resultado, as demandas do mercado por viabilidade de reciclagem

³ IBM é uma empresa dos Estados Unidos (EUA) voltada para área de informática, fundada em 1911 pelo fundador Charles Ranlett Flint.

econômica de produtos e redução do impacto ambiental negativo, no fim de sua vida útil, aumentaram (SCHLUEP; SPITZBART; BLASER, 2015).

De acordo com OSTI, GERUTI, LIVERANI E CALIGIANA (2017), as abordagens de desmontagem tornaram-se uma questão muito importante ao fim de vida útil de produtos. Uma desmontagem eficiente pode melhorar o comportamento do ciclo de vida dos produtos na reciclagem e reutilização e também facilita a manutenção e o reparo durante o serviço. Ademais, promove a reciclagem de produtos em seu fim de vida útil, permitindo a recuperação e reutilização de componentes e materiais.

Nos últimos anos, a desmontagem manual de equipamentos eletroeletrônicos foi considerada uma atividade desvantajosa, por ser difícil o processo de desmonte e requer muito tempo e também o uso de muitas ferramentas pelo operador (SILVA, 2015)..

Segundo SOH, ONG E NEE (2015), a desmontagem está ligada ao design do produto, o qual tem o conceito de design usado pelos desenhista do produto para facilitar o processo de desmontagem. Geralmente envolve:

- Simplificar o processo de desmanufatura;
- Reduzir o tempo e o custo necessário para a desmontagem;
- Permitir a recuperação de componentes e materiais.

De acordo com KOHL (2014), a desmontagem consiste em remover os componentes e colocá-los em lotes homogêneos com o objetivo de serem recuperados pelas indústrias apropriadas.

MÜNCHEN (2016) realizou a desmontagem manualmente, através de ferramentas adequadas e, em sequência, foram analisados 37 HDs obtendo 54 pares de ímãs de diferentes marcas, anos e tamanhos, originários de computadores desktops e laptops.

Em seus estudos, PEIRÓ, GIRÓN e DURRANY (2020) desmontaram discos rígidos utilizando ferramentas padronizadas, com o auxílio de chave de fenda manual (bits Torx T6-T8), uma alavanca e ferramentas de perfuração. No estudo foram desmontados 25 discos rígidos, fabricados entre 1996 à 2015, a partir de uma instalação local de reciclagem de REEE. Foram analisadas 19 amostras de discos rígidos de 3,5" e seis amostras de discos rígidos de 2,5". Antes da desmontagem, foi utilizado para a medição um paquímetro digital, uma balança eletrônica para a

massa e realizada a codificação com base na marca de fabricação e no número da amostra. Durante a desmontagem das unidades de discos rígidos, os autores apontaram o número de componentes liberados juntamente com as informações das tarefas, operações, número e tipo de ferramentas utilizadas, além do número de elementos de fixação (ver figura 4). Observando a figura 4 é possível notar a posição de uma placa de circuito impresso (destacada em verde na figura à esquerda) e a posição dos ímãs permanentes (destacada em verde na figura à direita) na amostra de disco rígido. A posição dos parafusos extraídos, para separar a placa de circuito impresso, e dos ímãs permanentes é indicada em vermelho.

Figura 4 – Posição da placa de circuito impresso (esquerda) e ímãs permanentes (direita) na amostra de disco rígido.



Fonte: PEIRÓ, GIRÓN e DURRANY (2020).

2.4 IMÃS DE NEODÍMIO-FERRO-BORO

Ímãs de NdFeB, originalmente pesquisados, desenvolvidos e introduzidos por Sumitomo *Specialty Metals* (Japão) e General Motors (EUA), têm a força coercitiva mais forte entre os ímãs disponíveis atualmente. No momento presente, os ímãs NdFeB são empregados como um dos componentes essenciais do micromotor das unidades de disco rígido e gravadores de DVD. Além disso, eles são usados em alto-falantes compactos, automóveis, veículos híbridos e entre outros.

2.4.1 Neodímio

O Neodímio representa cerca de 18% dos metais do grupo terras raras. Seu nome é derivado do grego: Neo - novo e Didymios - gêmeos, um elemento da tabela periódica com símbolo Nd, número atômico igual a 60 e massa atômica 144,2g (Tabela periódica). Foi considerado como gêmeo do Lantânio por ter sido separado do óxido de Dídimo pelo Barão von Welsbach em 1885 (CABRAL, 2014).

O neodímio está na linha 6 da tabela periódica, sendo exibido na tabela 1 apresentando propriedades importantes deste elemento (MÜNCHEN, 2016).

Tabela 1 – Propriedades do elemento Neodímio

	Neodímio
Símbolo	Nd
N° atômica	60
Massa atômica (g/mol)	144.24
Densidade (g/cm³)	7.008
Temp. Fusão (°C)	1021
Temp. Ebulição (°C)	3068

Fonte: adaptado de München, 2016.

Segundo GUPTA e KRISHNAMURTHY (2005), ímãs fortes ⁴ feitos de neodímio podem ser usados para elevar milhares de vezes a sua própria massa. Esse elemento foi descoberto em 1885 pelo químico Austríaco Carl Auer von Welsbach e, originalmente era usado para colorir vidro.

Conforme GUPTA e KRISHNAMURTHY (2005), Carl Auer von Welsbach encontrou o novo elemento em um mineral chamado de didímio, que consiste então na mistura de dois elementos químicos: praseodímio e neodímio. Didímio, por sua vez, havia sido encontrado em outro mineral difícil de ser extraído, conhecido como cério, encontrado originalmente na Suécia em 1803. Os químicos levaram quase um século para analisar completamente o elemento químico cério. Quando o fizeram, descobriram que continha sete novos elementos, o neodímio foi um deles.

⁴ Ímãs fortes são os que fazem parte de uma categoria chamada de metais de terras raras, como os ímãs de neodímio, que contêm ferro e boro.

2.4.2 Características de ímãs Neodímio-ferro-boro (NdFeB)

De acordo com OMODARA *et al.*, (2019), os ímãs NdFeB têm excelentes propriedades magnéticas, alta produtividade, alta eficiência energética e acessibilidade.

Desde o final dos anos 80, as ligas magnéticas à base de NdFeB são os materiais com o maior desempenho magnético disponível. Estes ímãs são produzidos por sinterização em fase líquida ou, por fiação por fusão (MÜNCHEN, 2016).

Conforme MÜNCHEN e VIET (2017), além Fe, Nd e B, esses ímãs contêm Pr, Dy e vestígios de alguns metais de transição. A presença de Co e Dy nos ímãs sintetizados ajudam a aumentar a temperatura de Curie⁵ e melhora a estabilidade da temperatura. Além do mais, a adição de Dy e Tb é eficaz para aumentar a coercividade, pois aumentam o campo de anisotropia magnética do composto FeB (Nd, Dy, Tb). A concentração dos metais encontrados nos ímãs por diversos autores é apresentada na tabela 2.

Tabela 2 – Composição dos ímãs

Elemento	Nd	Pr	Dy	Fe	B	Co
Média (%)	25,30	3,83	2,66	64,56	0,97	2,42
Desvio padrão (%)	3,79	2,94	1,67	4,38	0,13	2,01

Fonte: Adaptado de München, 2016.

Em concordância com MÜNCHEN e VIET (2017), os ímãs de NdFeB apresentam magnetização de saturação elevada, aproximadamente 16kG e produto magnético máximo entre 40 MGOe, maiores valores conhecidos entre ímãs. Entretanto, os ímãs de NdFeB apresentam temperatura de Curie em torno de 312°C, sendo desta forma pouco resistente a altas temperaturas.

Conforme FERREIA (2019), mesmo que os ímãs de NdFeB apresentem excelentes propriedades magnéticas e vantagem econômica, comparado aos ímãs de Sm-Co, apresentam baixa resistência a corrosão. Por isso, os ímãs apresentam um revestimento resistente à corrosão do material. O revestimento do ímã é

⁵ Temperatura Curie - temperatura na qual o alinhamento dos momentos desaparece completamente e o material não é mais capaz de apresentar magnetização (Angelo, 2005).

constituído por uma camada de Ni seguida por uma camada de Cu-Ni e outra camada de Ni.

2.5 DESMAGNETIZAÇÃO

Os ímãs permanentes são geralmente magnéticos duros, ou seja, possuem alta coercividade.

A indução magnética, medida em Tesla ou Gauss, é a resposta do material a um campo magnético, que normalmente é medido em Ampère por metro A/m em unidades SI ou Oersted (Oe). O fluxo magnético⁶ é a indução magnética total que atravessa uma superfície e, é calculado como a integral da superfície do componente normal da indução magnética que passa por essa superfície.

A coercividade, ou o campo coercitivo (H_c), é o grau em que um material ferromagnético pode suportar um campo magnético externo sem se desmagnetizar. (SAMIN, 2018).

Um material ferromagnético é tipicamente dividido em domínios ferromagnéticos nos quais todos os dipolos magnéticos são paralelos entre si, ocorrendo porque permitem que o material ferromagnético minimize sua energia magnética total (SAMIN, 2018).

De acordo com GRITLI, TANI, ROSSI e CASADEI (2019), a desmagnetização é quando um material imantado pode ser desmagnetizado desde que seus domínios fiquem desalinhados. Em materiais ferromagnéticos, isso pode ser obtido por meio de aquecimento do material, fazendo com que seus domínios magnéticos fiquem fora do alinhamento. Quando a temperatura Curie do material é excedida, a magnetização é perdida.

Em REISDÖRFER, BERTUOL E TANABE (2019), a desmagnetização foi usada principalmente para favorecer uma etapa de retificação do disco rígido. Os autores desmagnetizaram os ímãs em um mufla, a temperaturas entre 300 e 400° C, por períodos de 15, 30, 45 e 60 minutos. A tabela 3 ilustra os resultados obtidos pelos autores, em termos de porcentagem de remoção de magnetismo.

⁶ Fluxo magnético: unidade de medida no Sistema Internacional (SI) em Weber (Wb).

Tabela 3 – Remoção percentual de magnetismo dos ímãs, usando diferentes tempos e temperaturas

Tempo (min)	Temperatura		
	300°C	350°C	400°C
15	95%	99,6%	100%
30	95,1%	100%	100%
45	99,7%	100%	100%
60	99,8%	100%	100%

Fonte: REISDÖRFER, BERTUOL E TANABE, 2019

De acordo com REISDÖRFER, BERTUOL E TANABE (2019), para garantir a desmagnetização completa dos ímãs, a condição adotada foi a temperatura de 350°C e um tempo de 30 minutos. Os autores realizaram desmagnetização em temperaturas mais baixas e tempos diferentes, porém resultaram em desmagnetização incompleta de algumas amostras.

Nos estudos de reciclagem de disco rígido TANVAR, BARNWALL e DHAWAN (2020), desmontaram manualmente 100 discos rígidos. Os ímãs retirados foram desmagnetizados, por aquecimento a 350°C por 1 hora, em um mufla.

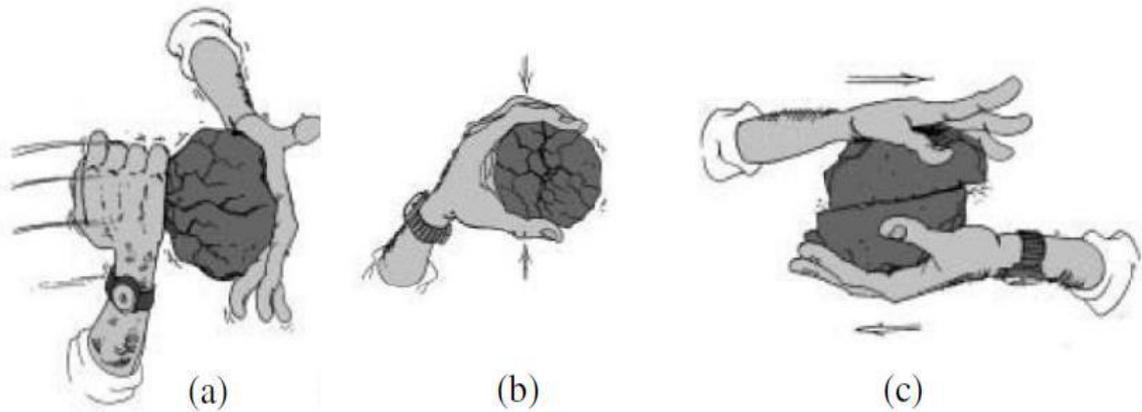
Para garantir a completa desmagnetização de cada ímã, MÜNCHEN (2016), aqueceu-os em um forno elétrico, em torno de 320°C, por 260 minutos.

2.6 PRINCÍPIO DE FRAGMENTAÇÃO

No processo de cominuição podem ocorrer três mecanismos, o de impacto, compressão e abrasão, ocorrendo em conjunto ou isoladamente, demonstrados na figura 5 (OLIVEIRA, 2012).

O mecanismo de impacto, figura 5a, ocorre quando é aplicada uma força de forma rápida e, em intensidade muito superior à resistência de partículas. É o modelo de fratura que ocorre em moinhos, na zona de queda das bolas, e gera distribuição granulométrica. No mecanismo de compressão da figura 5b, a partícula é submetida à aplicação de uma tensão entre duas superfícies. E, o mecanismo de cisalhamento ou abrasão, figura 5c, é a resultante do atrito entre as partículas do minério e, entre corpos moedores e partículas, gerando pequena diminuição do tamanho da partícula original e a formação de finos (OLIVEIRA, 2012).

Figura 5 – Mecanismos de fragmentação: (a) impacto, (b) compressão, (c) abrasão ou cisalhamento



Fonte: OLIVEIRA, 2012.

2.7 CONCEITO DE COMINUIÇÃO

Segundo TAGGART E WILLS, (2007), a cominuição é a primeira operação no beneficiamento do mineral, tendo como finalidade reduzir o tamanho de partículas, além de:

- Liberar o mineral de interesse para as operações posteriores de concentração;
- Preparar a superfície das partículas minerais para reações químicas, processos de concentração, filtração e pelotização;
- Adequar um material para transporte ou segundo as características exigidas para um certo produto.

De acordo com ROSA (2013), o processo de cominuição é a fase na qual podem ser divididas a britagem e a moagem. A britagem é qualificada como a primeira etapa do processo sendo dividida pela faixa granulométrica do produto. Em contrapartida, a moagem é a última etapa do processo, determinando produtos mais finos, tendo produto com menores tamanhos.

2.8 CONCEITO DE MOAGEM

Segundo WELLENKAMP (1999), a moagem é uma técnica operacional unitária a qual tem por finalidade a redução de tamanho das partículas. Apesar da

moagem apresentar um papel de suma importância no setor de indústria mineral, a operação no processo de moagem ou cominuição de partículas, pode ser considerada muito ineficaz do ponto de vista energético.

A moagem dependerá muito do mecanismo de fragmentação, que também dependerá muito da resistência do material a ser processado e do ambiente (seco/úmido). Entretanto, para apresentar granulometria menor que 100 μm , e ultrafina, menor que 10 μm , são usados diferentes tipos de moinhos (WELLENKAMP, 1999).

Segundo WANG E FORSSBERG (2017), no processo de moagem de materiais resistentes, ou abrasivos, pode ocorrer a contaminação do produto pela abrasão da carcaça ou do meio moedor. Para reduzir essa contaminação, é recomendada a utilização de moinhos revestidos de materiais resistentes, como metais duros, carbeto de tungstênio, óxido de alumínio, carbeto de silício, dióxido de zircônio.

As moagens podem ser realizadas em ambientes úmidos ou secos, as diferenças entre as condições do processo devem ser levadas em consideração. A transferência e o movimento de partículas pelo ar, em caso de moagem a seco ou úmido, pode afetar significativamente o consumo de energia dos circuitos de retificação (OGONOWSKI & WOTOSIEWICZ, 2018). Essas diferenças de energia se tornam significativas, principalmente quando considera-se que cerca de 3% da eletricidade gerada mundialmente é consumida em moagem mineral (DENIZ, 2013).

De acordo com GUPTA (2005), em processos em que existem limites distintos em relação à contaminação, a decisão de realizar uma moagem a úmido ou a seco é um desafio significativo. Essas diferenças no processo de moagem também alteram as propriedades dos produtos de moagem, o que por sua vez, pode afetar a eficiência dos processos de separação a jusante, como flotação de espuma.

Conforme SEKE & PISTORIUS (2006), a flotação de espuma é o principal método de concentração de minérios para a recuperação de partículas finas, isto é, partículas de 100 μm ⁷. A distribuição do tamanho de partículas, a liberação de minerais e as propriedades de superfície das partículas são alguns fatores decisivos para a flotação, que são controladas pelo meio ambiente durante o processo de moagem.

⁷ μm : unidade de medida micrómetro.

A moagem fina é considerada um processo para a redução de tamanho, onde o tamanho médio das partículas em massa do produto é inferior a $500\mu\text{m}$, também significando que praticamente todas as partículas têm menos de 1mm (GRAVELSINS, 1998).

A tabela 4 apresenta a classificação dos tipos de moinhos quanto às moagens finas e ultrafinas, além da indicação do tipo de esforço predominante e informações sobre o limite mínimo de granulometria e o ambiente de operação (TINO,2016).

Tabela 4 – Classificação dos moinhos quanto às moagens fina e ultrafina

Moinho Esforço	Pressão	Arraste	Impacto	Choque	Granulometria	Ambiente
Moinho com Meio Moedor						
a) moinho cilíndricos		x	x		fina	seco/ úmido
b) moinhos vibratórios		x	x		fina	seco/ úmido
c) moinhos planetários	x	x			ultrafina	seco/ úmido
d) moinhos de atrição		x			ultrafina	úmido
Moinhos de Choque						
1. Moinhos com rotor						
a) moinhos universais				x	fina	seco
b) moinhos de pinos				x	ultrafina	seco
c) moinhos de rotor				x	ultrafina	seco
2. Moinho a jato						
a) oval				x	ultrafina	seco
b) espiral				x	ultrafina	seco
c) contra fluxo				x	ultrafina	seco
Moinhos de Rolos Verticais	x	x			fina	seco
Moinhos de Rolos de Alta Pressão	x				fina	seco

* granulometria fina < 100µm, ultrafina <10 µm

Fonte: adaptada Tino, 2016

2.8.1 Eficiência de moagem

De acordo com ROSA (2013), o conceito de eficiência de moagem está ligado ao seu consumo energético e à granulometria do produto, tal como se resume:

- Redução da porcentagem dos minerais de interesse nos rejeitos dos processos de concentração;
- Redução no desgaste dos corpos moedores e dos revestimentos;
- Diminuição do consumo de energia;
- Aumento da quantidade de mineral liberado;
- Redução dos custos operacionais.

Ademais, ROSA (2013) afirma que a “eficiência” está ligada também às características de cada minério, tais como tenacidade e dispersão do mineral de interesse na ganga. No entanto, é de suma importância realizar comparações entre diferentes equipamentos tratando o mesmo material ou, entre diferentes minérios processados em um mesmo circuito.

A redução de tamanho tem por finalidade aumentar as superfícies, como na tabela 5, que apresenta alguns estudos realizados pelos autores sobre a moagem de imãs, após a desmagnetização.

Tabela 5 – Estudos de moagem de imãs NdFeB

Autor	Equipamento	Tempo (h) - rpm	Granulometria	Esferas
REISDÖRFER.G.,BER-TUOL.D., TANABE.E.H (2019)	Moinho de bolas	1 hora a 90rpm	<400µm	–
MÜNCHEN, D.D (2016)	Moinho de facas	5 minutos por batelada a 1500 rpm	Três frações: 0,500 mm a 0,250 mm	–
CIRO. E., ALZATE.A., LÓPEZ.E., SERNA.S., GONZALEZ.O. (2019)	Triturador de rolo	–	–	–
BINNEMANS.K., ÖNAL.M., RIAÑO.S. (2020)	Moinho de disco	–	<250 µm	–
SASAI.R., SHIMAMURA.N. (2016)	Moinho planetário	24 horas a 300rpm		Esferas de zircônia (diâmetro 10mm)

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

München (2016) obteve três frações granulométricas: superior a 35 mesh (0,50 mm), entre 35 e 60 mesh e inferior a 60 mesh (0,25 mm). A fração com a granulometria inferior a 60 mesh, foi a que apresentou maior eficiência de lixiviação dos metais neodímio e praseodímio em relação às outras duas frações. Em contrapartida, no estudo de Reisdörfer, Bertuol e Tanabe (2019), foram obtidas partículas menores que 400 μm (0,4 mm), porém baixa eficiência de recuperação do Nd.

No entanto, o presente estudo adaptará o estudo da moagem de München (2016), para atingir a granulometria inferior a 60 mesh, pois München verificou em seu estudo que as partículas com menor granulometria apresentaram a maior quantidade de material lixiviado, logo, ele concluiu que uma maior área superficial favorece a lixiviação.

2.8.2 Corpo moedor

O corpo moedor é a parte do moinho que produz trabalho útil, a quantidade de trabalho útil é afetada pelo tamanho e tipo do corpo moedor, o tipo de movimento e os espaços entre as partículas e o corpo moedor. A moagem em moinhos é um fenômeno de probabilidade entre partículas e corpos moedores, no entanto, pode ocorrer mecanismo um impacto, compressão e abrasão durante o processo de moagem, em que estes podem afetar no desempenho da moagem (LIMA; SILVA, 2011).

No interior do moinho são carregados de corpos moedores, cerca de 40% do volume interno do moinho é preenchido pela carga de corpos moedores e pelo material a ser moído (KRÜGER, 2004).

2.9 TIPOS DE MOINHOS

2.9.1 Moinho de faca

É utilizado normalmente quando o material apresenta tenacidade elevada (energia necessária para que o impacto leve o material à ruptura). A função principal do moinho de faca é realizar a moagem de amostras secas através de um motor, o

qual é responsável por movimentar as lâminas de facas no interior, a fim de atingir granulometria menores para favorecer as análises laboratoriais (TAVARES, 2017).

Figura 6 – Interior do moinho de faca



Fonte: Registrada pela autora, 2021.

2.9.2 Moinho de bolas

A moagem no equipamento moinho de bolas (figura 7) consiste de um corpo cilíndrico girando em torno de seu eixo, que é parcialmente preenchido com bolas, sua carcaça é composta de uma chapa calandrada e soldada, fechada nas duas extremidades por peças de aço fundido, denominadas tampas, cabeças e espelhos (BRUNATTO, 2017).

No interior do tambor cilíndrico rolam as bolas de alumina (corpo moedores) juntamente com o material a ser moído. A fragmentação ocorre através da movimentação da carga, isto é, dos corpos moedores juntamente com o minério, que tendem a girar em contatos uns com os outros pressionando as partículas minerais e assim cominuindo o minério (BRUNATTO, 2017).

Os moinhos de bola têm basicamente dois regimes de operação: catarata e cascata. A determinação desta forma de trabalho se obtém basicamente através de duas variáveis: velocidade e volume de carregamento (BRUNATTO, 2017).

Figura 7 – Moinho de bola



Fonte: Registrada pela autora, 2021.

2.9.3 Moinho excêntrico

O Moinho excêntrico é também conhecido como Moinho Periquito. Esse equipamento é usado para efetuar moagens e homogeneizações rápidas de materiais como esmaltes, tintas, minérios e entre outros.

Seu princípio de funcionamento é a centrifugação dos jarros cerâmicos, que por sua vez são carregados com o material a ser moído e a carga de agentes de moagem. O atrito e a movimentação das esferas gerados dentro do jarro é o que proporciona a moagem e a homogeneização dos materiais. Por mais de 40 anos, os moinhos excêntricos têm sido utilizados para moagem fina e pulverização⁸ de matérias-primas em escala industrial (TAVARES, 2001).

Algumas características do moinho excêntrico, na figura 8, conforme (TAVARES, 2001), são encontradas a seguir:

- Tempo de moagem programável;
- Reprodutividade das características granulométricas;
- Expressiva economia de tempo e matérias primas;
- Ideal para moagem a úmido ou a seco;
- Resistente à abrasão e choque mecânicos;
- Construção robusta com um mínimo de manutenção;
- Funcionamento suave e silencioso;
- Temporizador de precisão;
- Desligamento automático;

⁸ Pulverização é redução a pó de uma substância dura.

Figura 8 – Moinho excêntrico



Fonte: Registrada pela autora, 2021.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta informações sobre os materiais e equipamentos que foram utilizados e a metodologia proposta para atingir os objetivos apresentados.

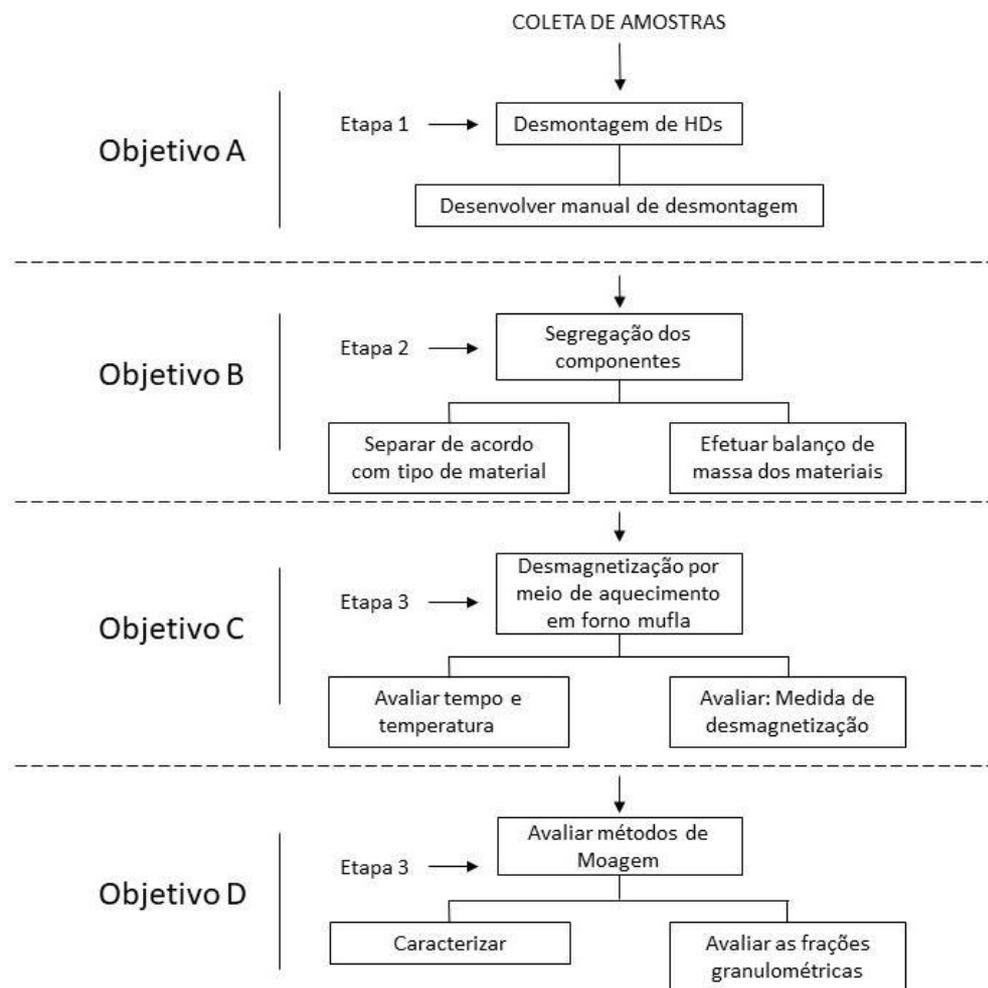
Para a elaboração do estudo, primeiramente foi realizada coleta de amostras. Os HDs foram cedidos pela Cooperativa de Resíduos Eletroeletrônicos Paulo Freire, localizada em Porto Alegre, Rua Waldemar Gonçalves Pires, no estado de Rio Grande do Sul.

Os métodos utilizados para o projeto estão descritos a seguir. A metodologia foi dividida em 4 etapas:

- Etapa 1: desmontagem das amostras e construção de manual de desmontagem de HDs – atende objetivo a (Objetivo a: desenvolver um métodos de desmontagem de HDs);
- Etapa 2: segregação dos componentes desmontados dos HDs e separar os ímãs de NdFeB – atende objetivo b (Objetivo b: efetuar o balanço de massa dos resíduos de HDs de computadores de mesa e notebooks.)
- Etapa 3: desmagnetização por meio de aquecimento em forno mufla e avaliar tempo e temperatura para desmagnetização – atende objetivo c (Objetivo c: avaliar diferentes temperaturas e tempos para desmagnetização.)
- Etapa 4: realizar a moagem dos ímãs – atende objetivo d (Objetivo d: caracterizar e avaliar as frações granulométricas obtidas.)

A figura 9 mostra um diagrama das etapas da metodologia e a relação com os objetivos específicos da dissertação.

Figura 9 – Etapas aplicadas na metodologia



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

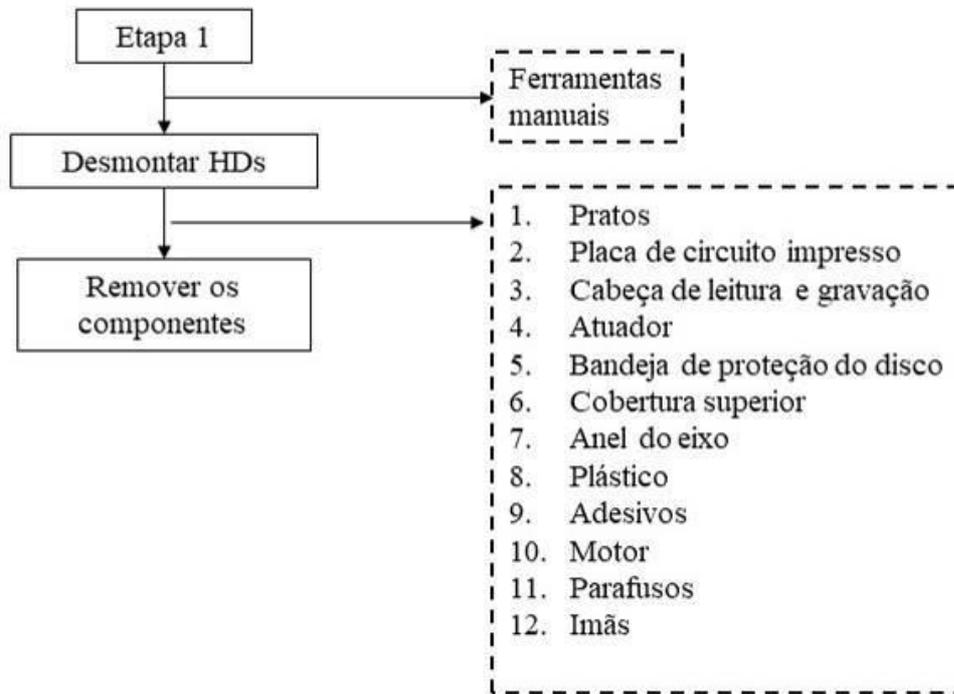
3.1 PROCESSO DE DESMONTAGEM DE HDS

A desmontagem dos HDs (Hard Disk Drives) foi efetuada de modo manual, a qual necessitou da utilização de ferramentas manuais (alicates, chaves de fenda, jogo de chaves, dentre outras) e equipamentos de proteção individual (guarda-pó e luvas).

Durante o processo de desmontagem, é de suma importância e responsabilidade do pesquisador ter conhecimento de cada componente gerado além de ter cautela no processo de separação.

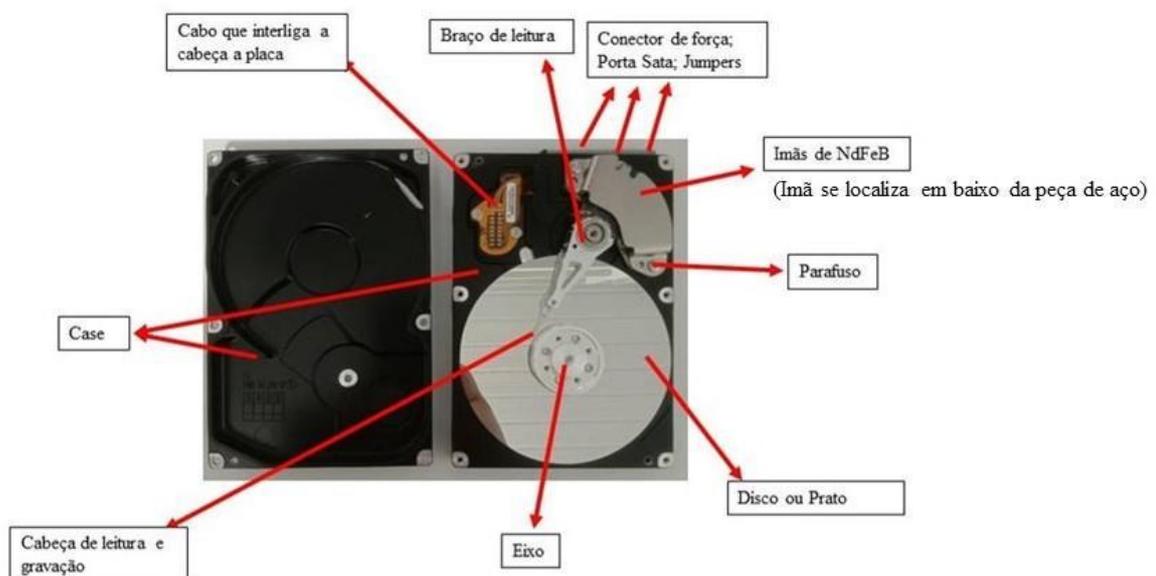
A desmontagem dos HDs foi baseada no fluxograma proposto por Kohl (2014), como pode ser observado na figura 10, e os componentes desmontados podem ser observados nas figuras 11 e 12.

Figura 10 – Fluxograma da metodologia utilizada para desmontagem dos HDs



Fonte: Adaptada de Kohl, 2014.

Figura 11 – Componentes constituintes dos HDs



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 12 – Componentes dos Hds



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

O manual de desmontagem consistirá os seguintes pontos:

- **Descrição da tarefa:** consiste em descrever as partes a serem removidas;
- **Etapa de operação:** consiste em descrever numericamente a operação envolvida na tarefa;
- **Descrição da operação:** consiste em descrever a operação a ser realizada (desparafusar ou puxar);
- **Ferramenta:** descrever qual ferramenta a ser utilizada, como chaves de ferramentas ou retirada de tal com as próprias mãos;
- **Tipo de ferramenta:** descrever detalhadamente o tipo de ferramentas a serem utilizadas seja Torx t8, t6, t10, chave de fenda, martelo, etc.;
- **Quantidade:** descrever a quantidade de parafusos a serem retirados no processo da tarefa.

3.1.1 O tempo de desmontagem

A avaliação do tempo de desmontagem, foi utilizado o cronômetro do celular Y17. A avaliação consistiu nas desmontagens dos HDs de computadores de mesa

3.5" (10×14×2,3) e notebooks 2.5" (7×10×0,7), a fim de obter o tempo médio de remoção das peças e desmontagem total.

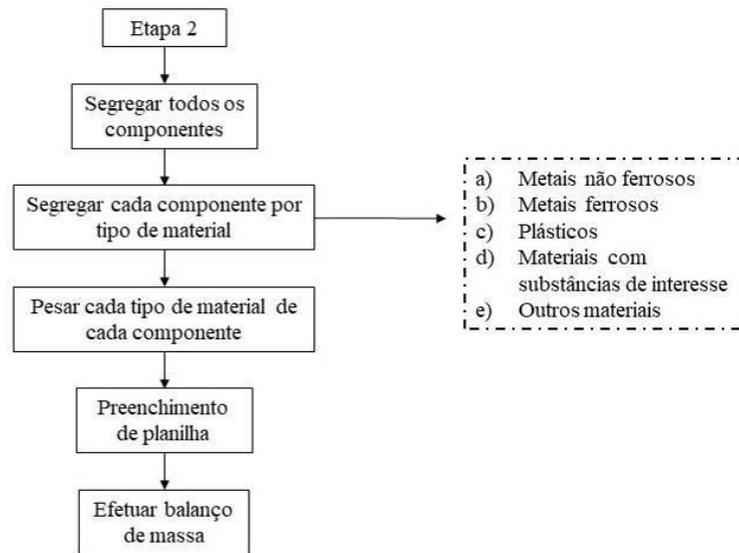
3.2 BALANÇO DE MASSA DOS HDS DE COMPUTADORES DE MESA E NOTEBOOKS

A avaliação do balanço de massa dos HDs foi realizada por meio de balança digital, essa seguiu em duas etapas:

- Antes da desmontagem: apresentar descrições técnicas e físicas das amostras de HDs a serem analisadas, contendo informações do modelo, marca, ano, série e capacidade de memória em unidade de Gigabytes (GB), Tera Bytes (TB) e Megabytes (MB).
- Depois da desmontagem: segregação dos materiais encontrados (adaptado no estudo da autora KOHL, 2014): (1) plásticos, (2) metais não ferrosos, (3) metais ferrosos, (4) materiais com substâncias de interesse (PCIs, microprocessadores e seus soquetes, módulos de memória, capacitores eletrolíticos de alumínio e componentes eletrônicos), (5) materiais considerados perigosos (baterias), (6) fios e cabos, (7) outros materiais (tecidos, fitas adesivas, esponjas, látex, borrachas, rejeitos misturados (plásticos com metal), cerâmicas, etc).

A segregação dos componentes dos HDs foi baseada no fluxograma proposto por Kohl (2014), como pode ser observado na figura 13.

Figura 13 – Fluxograma da metodologia utilizada para segregação dos materiais



Fonte: Adaptada de Kohl, 2014.

3.3 AVALIAÇÃO DE TEMPERATURAS E TEMPOS PARA DESMAGNETIZAÇÃO

Na figura 14, estão representadas as etapas do processo de caracterização.

Figura 14 – Fluxograma de caracterização



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

3.3.1 Desmagnetização térmica

A desmagnetização dos imãs é necessária para evitar a aderência às partes metálicas dos equipamentos utilizados no processo de moagem. Esse processo foi dividido em duas etapas:

- Preparação das amostras;
- Teste de magnetização.

3.3.1.1 Preparação das amostras

A desmagnetização foi realizada pelo método de aquecimento em forno Mufla, marca GREFORTEC, modelo GFT-00016, na Unisinos campus Unisinos São Leopoldo, no Laboratório de Química da Escola Politécnica.

Para a definição da melhor temperatura de desmagnetização, a pesquisa foi aplicada às três temperaturas de desmagnetização (320°C, 350°C e 400°C) nos tempos de 15, 30 e 45 minutos, com base nos estudos no estudo de Reisdörfer, Bertuol e Tanabe (2019), München (2016) e TANVAR, BARNWALL e DHAWAN (2020). Com a finalidade de comparar o tempo e a temperatura que favorecem a perda de magnetização do ímã, promovendo o menor custo energético.

Reisdörfer, Bertuol e Tanabe (2019) em suas pesquisas estudaram a temperatura de 300°C. Porém, nos tempos 15, 30, 45 e 60 minutos, estudados pelos autores, não foi obtida a desmagnetização total do material, apenas cerca de 95,1% a 99,7 % de desmagnetização. No estudo de München (2016) e TANVAR; BARNWALL e DHAWAN (2020), optaram em utilizar a temperatura de 320°C, pois os autores relatam que a esta temperatura é que promoverá a perda de magnetismo do ímã NdFeB.

Para a definição da melhor temperatura de desmagnetização, foram preparadas 9 amostras. As amostras foram colocadas separadamente em cadinhos de porcelana e expostas aos tempos e temperaturas conforme detalhados.

Figura 15 – Preparo de amostra no cadinho para desmagnetização



Fonte: Registrada pela autora, 2021.

3.3.1.2 Teste de desmagnetização

Para a avaliação da eliminação do magnetismo, foi realizada uma pré-avaliação por medições de campo magnético utilizando um medidor de Gauss (figura 16).

Figura 16 – Instrumento de Medição Gaussímetro



Fonte: Registrado pela autora, 2021.

Posteriormente, foi realizada uma seleção através do resultado obtido: aqueles menos magnetizados seguiram para mais uma avaliação no Laboratório de Metrologia Elétrica do Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT-SP).

Os ensaios dos ímãs foram realizados em uma balança analítica (figura 17) no Laboratório de Metrologia Elétrica do IPT-SP, em que o ímã é apoiado numa base não magnética, posicionada sobre o prato de pesagem da balança analítica. A leitura é zerada e um bloco de aço é deslizado paralelamente (4,0 mm de distância) acima do ímã, a atração magnética diminui a ação do peso e a leitura da balança é anotada.

Figura 17 – Ensaio de avaliação magnetização



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

3.3.1.3 Cálculo de consumo energético em função da eficiência de magnetização

Todo equipamento elétrico possui uma potência apresentada em Watts, cujo símbolo é W , com tal informação vista na identificação do equipamento.

O cálculo do consumo energético no equipamento foi feito com base na potência e no tempo em que o aparelho permanece ligado, com isso podemos saber qual tempo, e temperatura, é necessária para desmagnetizar os ímãs com maior eficiência em questão de consumo energético.

Para calcularmos o consumo energético utiliza-se a seguinte fórmula:

$$\text{Consumo} = P \times \Delta t$$

P – potência (kW)

Δt – Intervalo de tempo em uso (h)

3.3.2 Fluorescência de Raios X

A fim de identificar a composição química do ímã, foram realizadas análises qualitativas, pelo método de Fluorescência de Raios X, para discernir os elementos

inorgânicos presentes na amostra. O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais (LCVMAT).

Efetuaram-se 2 análises químicas qualitativas no Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X, a fim de caracterizar os elementos químicos presentes nos ímãs de computadores de mesas e notebooks. As análises foram efetuadas no revestimento do ímã e na parte interna do ímã.

A fluorescência de Raios X (FRX), é uma técnica analítica que pode ser utilizada para determinar a composição química de uma ampla variedade de tipos de amostras, incluindo sólidos, líquidos, pastas, pós soltos, para determinar a espessura e composição das camadas e revestimentos (SILVA, 2019).

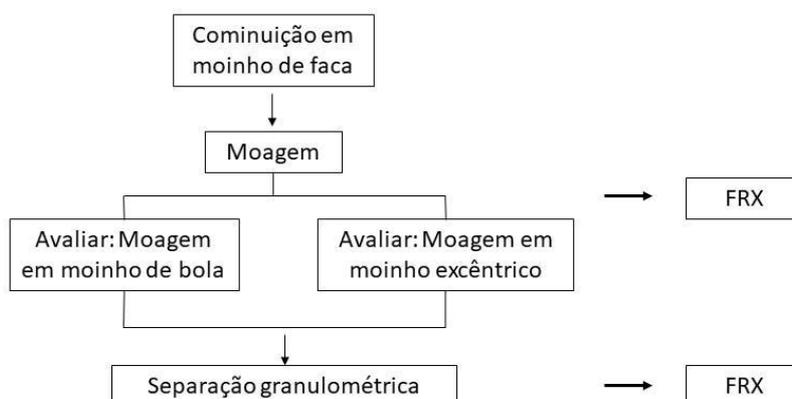
Neste ensaio, as medições são realizadas a partir da excitação de Raios X fluorescentes na amostra em análise, que tem seu espectro alterado a partir de sua reflexão na amostra pelo sistema do equipamento, o qual determina a quantidade de cada elemento presente a partir das características das ondas refletidas (SILVA, 2019).

3.4 MOAGEM DE IMÃS E CARACTERIZAÇÃO GRANULOMETRICA

3.4.1 Moagem de ímãs de NdFeB

Na figura 18, estão representadas as etapas do processo de moagem.

Figura 18 – Fluxograma do processo de moagem



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Para esta etapa, optou-se em avaliar dois equipamentos de moagem, localizados no laboratório de Materiais de Construção Civil, campus Unisinos de São Leopoldo, o Moinho de bolas e Moinho excêntrico (conhecido como Periquito).

Para a moagem, foi necessário também definir os corpos moedores, que são estruturas fundamentais para estes processos de moagem. De acordo com SAMPAIO; LUZ; e FRANÇA (2010), no processo de moagem é aconselhável selecionar diferentes tamanhos de bolas para conseguir um maior rendimento da moagem.

Os corpos moedores, que estão disponíveis no Laboratório de Materiais de Construção em Engenharia civil, são bolas de Alumina com os respectivos diâmetros e massa apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Diâmetro e massa de corpos moedores

Corpos moedores de Alumina	
Diâmetro (cm)	Massa (g)
1 cm	2,5 g
2 cm	18,5 g
4 cm	135 g

Fonte: ?

3.4.2 Tipos de moagem e tempo de moagem

De acordo com SAMPAIO; LUZ; e FRANÇA (2010) , a definição do tempo de moagem de uma amostra dependerá da natureza do material. O tamanho da partícula resultante da moagem é de suma importância para o estudo em paralelo com esta pesquisa, o qual tem por finalidade a recuperação de neodímio. Em seu estudo, München (2016), verificou que as partículas com granulometria menores (< 0,25mm) apresentaram maior eficiência de lixiviação do neodímio e praseodímio. A presente pesquisa tem como meta obter esta granulometria.

3.4.2.1 Moinho de faca

No processo de moagem foram adotados alguns métodos. Inicialmente, os ímãs foram cominuídos no moinho de facas, com o propósito de obter partículas

menores para moagem consecutiva em moinho de bolas e moinho excêntrico. O processo de moagem é descrito nos itens a seguir.

Preliminarmente, os imãs de computadores de mesa e de notebooks foram cominuídos em conjunto e, posteriormente, foram moídos nos moinhos. A cominuição dos imãs no moinho de faca, teve por finalidade fragmentar os imãs em pedaços menores, para assim, passar para o processo de moagem.

O material cominuído pode apresentar diferentes granulometrias, por isso realizou-se a classificação granulométrica. Para este fim utilizou-se peneiras vibratórias com abertura maior a menor (2,38 mm à 0,149 mm), programando 10 vibrações por minutos durante 300 segundos (figura 19).

Figura 19 – Agitador de peneira



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

3.4.2.2 Moinho de bolas

As amostras dos imãs que foram cominuídos no moinho de faca foram subdivididas em três frações para a realização do experimento. O moinho de bolas foi carregado no cilindro 403,5 gramas de corpos moedores entre diâmetro 1cm e 2cm, e 540 gramas de corpo moedor de diâmetro 4cm, compondo 200 gramas de quantidade de material no jarro cilíndrico do moinho, como pode ser observado nas informações da planilha 1.

O tempo de moagem de imãs foi baseado no estudo de Reisdörfer, Bertuol e Tanabe (2019), por meio de equipamento de moinho de bolas, no intervalo de 30, 45 e 60 minutos, a fim de obter partículas menores que 0,25 mm.

Planilha 1 – Características da carga de bolas utilizada no moinho de bolas

Número de bolas	Diâmetro das bolas (cm)	Massa (g)	Tipo de bola
10	1 cm	25 gramas	Alumina
20	2cm	378,5 gramas	Alumina
4	4 cm	540 gramas	Alumina
Total	–	943,5 gramas	Alumina
Resultados obtidos nos testes de moagem com moinho de bolas			
Aberturas (mm)	% Passante		
	t ₁	t ₂	t ₃
t= tempo de moagem (min). t ₁ =30; t ₂ =45; t ₃ =60;			

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

3.4.2.3 Moinho excêntrico

No caso da moagem de imãs por moinho excêntrico, não há estudos de referência sobre este método utilizado. No entanto, a pesquisa averiguou a possibilidade da realização através deste moinho, pois durante pré-testes decorrente de moagem de imãs provenientes de caixa de som, foi o que obteve melhor resultado comparado com a de moinho de bolas.

Após as amostras de imãs que foram cominuídas no moinho de faca, o material obtido passou para o processo de moagem no moinho excêntrico e foram subdivididas as frações. Em cada fração foram carregadas 100g de material em cada jarro cerâmico e dentro de cada um desses foram carregados 176 gramas de corpos moedores de 2 cm de diâmetro, conforme a descrição da planilha 2.

Figura 20 – Preparação da amostra a ser moída no moinho excêntrico



Fonte: Registrada pela autora, 2021.

Definiu-se o tempo de moagem para o estudo experimental de 30, 45 e 60 minutos, a fim de obter partículas menores que 0,25 mm.

Planilha 2 – Características da carga de bolas utilizada no moinho excêntrico

Número de bolas	Diâmetro das bolas (cm)	Massa (g)	Tipo de bola
10 (Jarro 1)	2 cm	176 gramas	Alumina
10 (Jarro 2)	2 cm	176 gramas	Alumina
Total	–	176g cada jarro	Alumina
Resultados obtidos nos testes de moagem com moinho excêntrico			
Aberturas (mm)	% Passante		
	t ₁	t ₂	t ₃
t= tempo de moagem (min). t ₁ =30; t ₂ =45; t ₃ =60;			

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A comparação entre os dois métodos de moagem foi em função do tempo, eficiência energética, e no resultado da obtenção, a partir da granulometria do material resultante.

3.4.3 Fluorescência de Raios X

Antes da separação granulométrica dos imãs moídos, em cada moagem foi separada uma porção bruta de cada amostra do equipamento, com intenção de realizar a análise química de forma qualitativa. Esta análise tem a finalidade de

auxiliar na avaliação, caso durante o processo de moagem haja a contaminação do material no moinho.

Há dois tipos de contaminação durante os processos de moagem: a contaminação primária e a contaminação cruzada (SERTEK, 2010):

- Contaminação primária: consiste na abrasão da amostra com as ferramentas do equipamento, fazendo com que o material que o compõe seja incorporado à amostra.
- Contaminação cruzada: acontece entre amostras, em que uma pequena fração da amostra processada anteriormente se incorpora à seguinte. Muitas vezes negligenciada, deve ser notada também a possibilidade de mudança no estado de oxidação dos elementos maiores em função do tempo de moagem.

Alguns autores presumem que a contaminação primária pelo equipamento de moagem pode ser maior na etapa final dos processos de tratamento de amostras e, que depende principalmente, da composição da superfície do equipamento, da dureza da amostra e do tempo de moagem (SERTEK, 2010).

3.4.4 Análise química das frações granulométricas em FRX

As amostras com granulometria de até 0,25mm, foram submetidas à análise de forma qualitativa por meio de equipamento de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX), a fim de localizar a presença do elemento neodímio.

3.4.5 Consumo energético no processo de moagem

O objetivo de calcular o consumo energético no processo de moagem, tem por finalidade avaliar qual o tempo e método de moagem mais eficiente. Já que a avaliação pode contribuir para algumas estratégias, como avaliar e minimizar os gastos energéticos na moagem em função do tempo e obter melhor resultado na moagem.

Para calcular o consumo energético usou-se a seguinte fórmula:

$$\text{Consumo} = P \times \Delta t$$

P — potência (kW)

Δt — Intervalo de tempo em uso (h)

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados e discussões individualmente de cada um dos objetivos estudados. No item 4.1 apresentam-se os resultados do desenvolvimento da desmontagem de Hds, bem como o tempo médio para desmontagem. No item 4.2 apresentam-se os resultados do balanço de massa dos componentes obtidos dos hds. No item 4.3 apresentam-se a avaliação de temperatura e tempo para desmagnetização dos imãs e no item 4.4 apresentam-se os métodos de moagem dos imãs de Hds.

4.1 DESENVOLVIMENTO DO MANUAL DE DESMONTAGEM DE HDS

Um dos passos da metodologia é gerar uma sequência de desmontagem e um diagrama de desmontagem para HDs, Neste sentido, a planilha 3 mostra a sequência de desmontagem para a amostra do HD. Durante a desmontagem do HD (amostra S1), o número de componentes obtidos é anotado juntamente com as informações das tarefas, operações, número e tipo de ferramentas utilizadas, além do número de elementos de fixação. A demonstração do processo de desmontagem, está anexa no apêndice A.

Os HDs foram desmontados usando ferramentas padronizadas, como:

- Martelo
- Chave de fenda
- Chave Phillips
- Chaves Torx T6-T10
- EPI- Luvas e Jaleco
- Alicates

Na Planilha 3 é ilustrado o esquema de sequência de desmontagem para um HD.

Planilha 3 – Sequência de desmontagem de disco Rígido (HD)

Etapa	Descrição da tarefa	Etapa de Operação	Descrição da operação	Ferramentas	Tipo de ferramenta	Quantidade
1	Retire a placa de circuito impresso (PCI)	1	Desparafusar	Chave de fenda	Torx T10	5
		2	Retirar PCB	Mãos	—	—
2	Remova isolador PCI	1	Puxar	Mãos	—	—
		2	Retirar adesivo	Mãos	—	—
3	Retire a cobertura superior	1	Desparafusar	Chave de fenda	Torx T10	6
		2	Etiquetas/ Adesivos	Estilete	9mm	3
		3	Desparafusar	Chave de fenda	Torx T10	1
		4	Puxar	Mãos	—	—
4	Bandeja de proteção do disco	1	Desparafusar	Chave de fenda	Torx T08	3
		2	Puxar	Mãos	—	—
5	Retire o ímã do atuador 1	1	Desparafusar	Chave de fenda	Torx T08	1
		2	Puxar	Mãos	—	—
6	Retire o atuador	1	Desparafusar	Chave de fenda	Torx T10	2
		2	Puxar	Mãos	—	—
7	Retire braço de leitura	1	Desparafusar	Chave de fenda	Hexagonal 2,5 mm/ Alicate	1
		2	Puxar	Mãos	—	—
8	Retire o ímã do atuador 2	1	Desparafusar	Chave de fenda	Torx T08	1
		2	Puxar	Mãos	—	—
9	Retire o anel do eixo	1	Desparafusar	Chave de fenda	Torx T10	4
		2	Puxar	Mãos	—	—
10	Retire suporte plástico	1	Retirar	Mãos	—	—
11	Retire o prato	1	Puxar	Mãos	—	—
12	Remova o motor do eixo	1	Desparafusar	Chave de fenda	Torx T08	3
		2	Puxar	Mãos	—	—
13	Caixa de HD	1	Retirar	Mãos	—	—

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

O esquema de desmontagem foi desenvolvido quando as sequências de desmontagem estavam completas, no apêndice A é possível verificar visualmente as etapas de desmontagem do HD de um computador de mesa, o qual não difere do processo de desmonte de um HD de notebook.

4.1.1 Tempo de desmontagem

O tempo de desmontagem de um HD varia de acordo com o ano de fabricação e tamanho, como por exemplo, os HDs mais antigos em que estão citados no apêndice B, foram mais difíceis de desparafusar, pois os parafusos podem estar mais desgastados e além de ser necessário o uso de outras ferramentas para a desmontagem. As planilhas 4 apresentam o tempo de desmontagem de cada peça do HDs da amostra S1 (3.5" polegadas) e W1 (2.5" polegadas).

Planilha 4 – Tempo de desmontagem HD 3.5" polegadas

Operação	Parte	HD 3.5"	HD 2.5"
		(10×14×2,3 cm)	(7×10×0,7 cm)
		Tempo (segundos)	Tempo (segundos)
1	Retirada da placa de circuito impresso (PCB)	92	83
2	Retirada da cobertura superior	124	92
3	Remoção isolador PCB	2	2
4	Remoção da bandeja de proteção do disco	75	–
5	Retirada do ímã do atuador 1	55	53
6	Retirada o atuador PCB	35	30
7	Retirada do braço de leitura	180	173
8	Retirada do ímã do atuador 2	52	53
9	Retirada do anel do eixo	120	120
10	Retirada suporte plástico	2	2
11	Retirada do prato	2	2
12	Remoção do motor do eixo	183	183

Fonte: Elaborado pela autora, 2021

Após a desmontagem, o resultado mostra que o tempo médio para desmontar um HD de 3.5" polegadas é de 15 minutos. E, para HD de 2.5" polegadas, o tempo é de 13 minutos.

4.2 BALANÇO DE MASSA DOS HDS DE COMPUTADORES DE MESA E NOTEBOOKS

4.2.1 Balanço de massa e segregação dos componentes

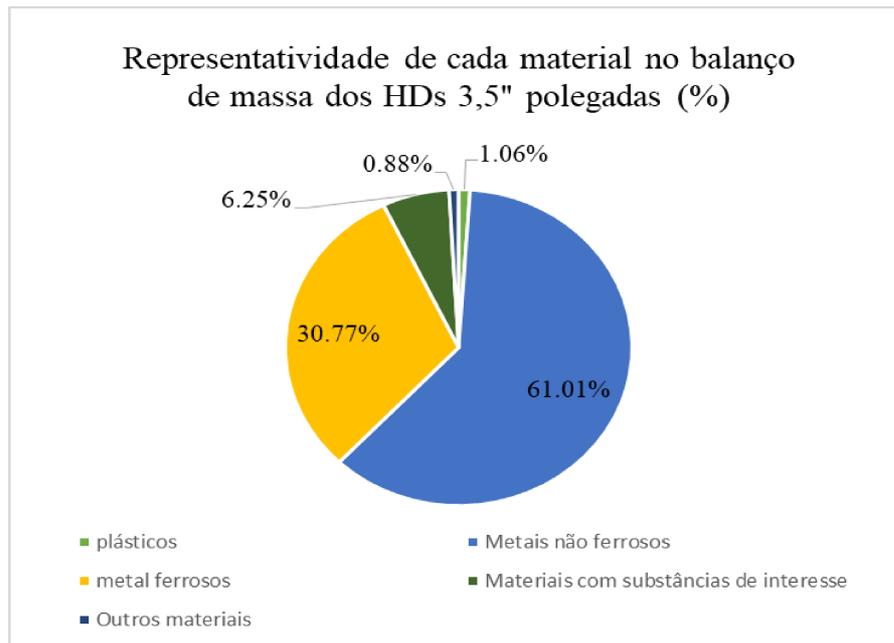
A avaliação do balanço de massa dos HDs foi efetuada por meio de balança digital modelo SL0363. Na primeira, efetuou-se o balanço de massa inicial do HD, bem como a identificação do ano, marca e modelo (anexa no apêndice B e C), e a segunda etapa consistiu em pesagem dos componentes separadamente.

Foram desmontados 60 HDs de 3.5", fabricados entre 1997 e 2013, sendo 52 destes com identificação e 10 sem identificação; 9 HDs de 2.5" polegadas fabricadas entre 2003 e 2013, sendo 8 com identificação e 1 sem identificação.

Identificados os dados dos HDs, seguiu-se a desmontagem dos HDs e a segregação dos componentes. Os materiais encontrados foram segregados em cinco grupos de materiais (adaptado no estudo da autora KOHL, 2014): (1) plásticos, (2) metais não ferrosos, (3) metais ferrosos, (4) materiais com substâncias de interesse (PCIs, microprocessadores e seus soquetes, módulos de memória, capacitores eletrolíticos de alumínio e componentes eletrônicos), (5) outros materiais (tecidos, fitas adesivas, esponjas, látex, borrachas, rejeitos misturados (plásticos com metal), cerâmicas, etc).

Os gráficos 1 e 2 apresentam os dados consolidados da massa dos materiais dos HDs 3.5" polegadas e 2.5" polegadas e, nos apêndices D e E apresentam os dados detalhados da massa dos materiais do HDs 3.5" polegadas e 2.5" polegadas.

Gráfico 1 – Representatividade de cada material na massa de HDs 3,5" polegadas



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

O gráfico 1 apresenta a média de massa obtida dos HDs de computadores, 3,5" polegadas, com um peso de 0,4953kg. Após a desmontagem destes, obteve-se a seguinte massa dos materiais: 0,005kg de plásticos, 0,3022kg de metais não ferrosos (ligas de Al), 0,1523kg de metal ferroso (ligas de aço comum e inoxidável), 0,0309kg de materiais com substâncias de interesse (PCI) e 0,0043 outros materiais (fitas adesivas, látex, rejeitos misturados (plástico com metal), etc). Ressaltando que o metal não ferroso Al compõe majoritariamente o material (liga de Al) mais representativo neste componente, o qual representa 61,00%.

As figuras 21 e 22 apresentam a segregação do HD de computador por tipo de material realizado para o presente estudo.

Figura 21 – HD 3,5" montado (computador). Medidas (10×15×2). 1- Vista de cima, 2- Vista de baixo, 3- HD aberto.



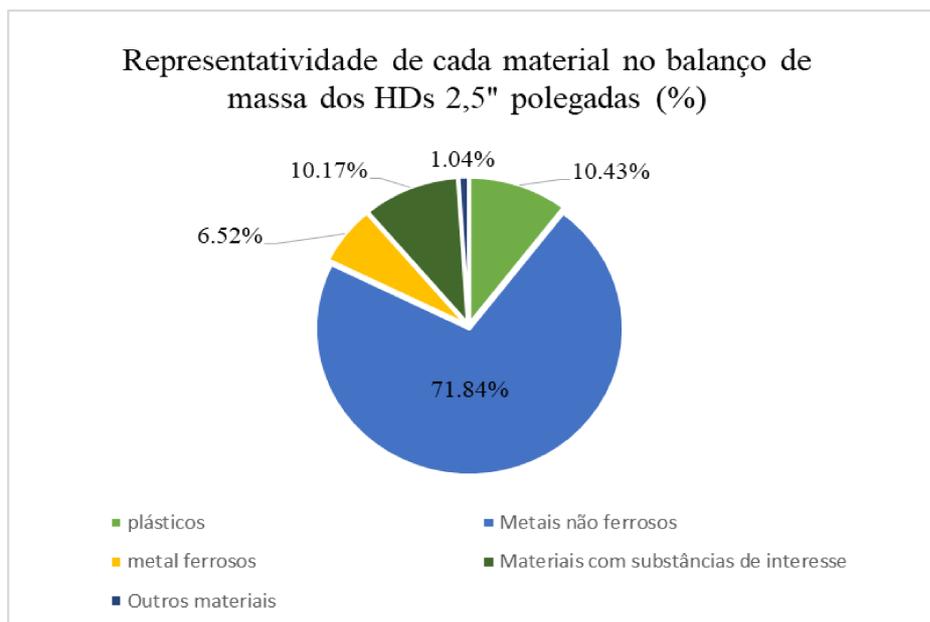
Fonte: Registrado pela autora, 2021.

Figura 22 – Segregação do HD 3.5" (computador) por tipo de material: 1- Metais não ferrosos (ligas de Al), 2- Metais ferrosos (aço comum e inoxidável), 3- Plásticos, 4- Materiais com substâncias de interesse, 5- Outros materiais.



Fonte: Registrado pela autora, 2021.

Gráfico 2 – Representatividade de cada material na massa dos HDs 2.5" polegadas



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

O gráfico 2 apresenta a média de massa obtida dos HDs de notebooks (2.5" polegadas), que foi de 0,0958kg. Após a desmontagem destes, obteve-se a seguinte massa dos materiais: 0,01kg de plásticos, 0,0688kg de metais não ferrosos, 0,0062kg de metal ferrosos, 0,0097kg de materiais com substâncias de interesse (PCI) e 0,001kg de outros materiais (fitas adesivas, látex, rejeitos misturados (plástico com metal),etc). Ressaltando que o metal não ferroso é o material mais representativo neste componente, o qual representa 71,84%.

As figuras 23 e 24 apresentam a segregação do HD de notebook por tipo de material realizada para o presente estudo.

Figura 23 – HD 2.5" montado (notebook). Medidas (7×10×0,7). 1- Vista de cima, 2- Vista de baixo, 3- HD aberto



Fonte: Registrado pela autora, 2021.

Figura 24 – Segregação do HD 2.5" (notebook) por tipo de material: 1- Metais não ferrosos, 2- Metais ferrosos, 3- Plásticos, 4- Materiais com substâncias de interesse, 5- Outros materiais.



Fonte: Registrado pela autora, 2021.

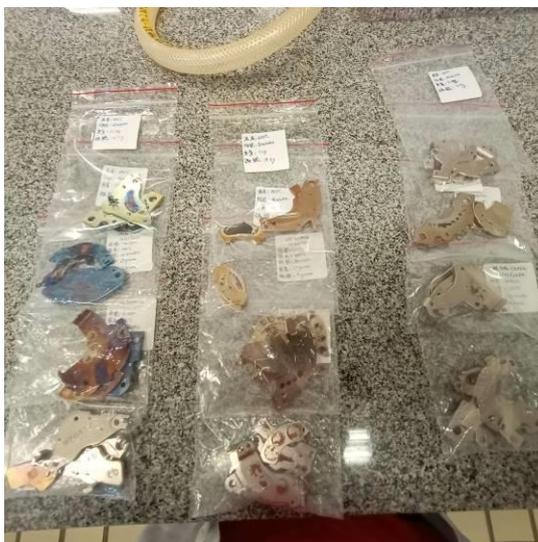
4.3 AVALIAÇÃO DE TEMPERATURA E TEMPO PARA DESMAGNETIZAÇÃO DOS IMÃS

4.3.1 Desmagnetização térmica

4.3.1.1 Preparação das amostras e teste de magnetização

Na figura 25, apresentam-se as amostras realizadas de acordo com o tempo e temperatura definido.

Figura 25 – Amostras desmagnetizadas separadas de acordo com temperatura e tempo para avaliação no Gaussímetro



Fonte: Registrado pela autora, 2021.

Após o tratamento térmico, a desmagnetização das amostras foi avaliada através de um medidor de Gauss, o qual foi disponibilizado pelo responsável Herlon de Oliveira Morsch. Contudo, devido ao medidor de Gauss apresentar uma grande variação entre os valores obtidos e por equipamento não ser muito conciso, optou-se em fazer uma média dos valores observados na planilha 5 e eliminar as amostras que estavam mais magnetizadas. Por outro lado, as amostras menos magnetizadas seguiram para o teste de magnetização no Laboratório de Metrologia Elétrica do Instituto de Pesquisa Tecnológica, conforme descrito no item 3.3.1.

Planilha 5 – Resultado da avaliação do Gaussímetro (Média)

Tempo (min)	Temperatura		
	320°C(mGs)	350°C(mGs)	400°C (mGs)
15	155.66	0.76	1.05
30	0.266	0.73	0.7
45	1.2	1.45	0.75

Fonte: Elaborado pela Autora, 2021.

Realizando o levantamento das médias de desmagnetização dos ímãs, pode-se observar que quanto menor resultado obtido no medidor de Gauss em miligauss, menos magnetizado estão os ímãs. Mas, como as amostras dos ímãs

apresentam espessura e tamanhos variados, isso também pode acabar influenciando no tempo de desmagnetização dos ímãs.

Figura 26 – Tamanhos variados de ímãs



Fonte: Registrado pela autora, 2021.

No entanto, pode-se deduzir que, em diferentes temperaturas de desmagnetização que foram testados, o tempo de permanência foi insuficiente para desorientar totalmente os campos magnéticos dos ímãs, que corrobora com a afirmação de REISDÖRFER, BERTUOL E TANABE (2019) e München (2016).

Foram selecionados ímãs que foram desmagnetizados nos tempos de 15, 30 e 45 minutos, na temperatura de 350°C, para a realização de mais um teste de magnetização. Os resultados destes são apresentados na planilha 6, que trata dos resultados dos ensaios de magnetização.

Planilha 6 – Resultados do ensaio de magnetização

Amostra	Tempo (min)	Massa (g)	Espessura (mm)	Face	Leitura balança (mg)	Média duas Faces (mg)
1	15	4,7965	1,75	Sup	-13,0	-12,6
				Inf	-12,1	
2	30	3,0310	1,81	Sup	-12,8	-15,6
				Inf	-18,3	
3	45	4,7758	1,73	Sup	-11,2	-9,6
				Inf	-8,0	
4	60	4,3230	2,09	Sup	-22,7	-22,5
				Inf	-22,3	

Fonte: Resultado obtido no Laboratório de Metrologia Elétrica
Elaborado pela autora, 2021.

Através deste método, o imã mais desmagnetizado é da amostra 3 com o de tempo 45 minutos de tratamento térmico.

Após este processo, os imãs foram cominuídos e moídos pelos métodos de moagem adotados, cominuição em faca, moagem em moinhos de bola e excêntrico.

4.3.1.2 Cálculo de consumo energético na desmagnetização por aquecimento em forno mufla

A partir da potência nominal do forno mufla de 7kW, a tabela 7 apresenta os resultados do consumo energético durante o processo de desmagnetização, considerando 5 minutos adicionais para aquecimento do forno até a temperatura determinada no projeto.

Tabela 7 – Consumo energético no processo de desmagnetização

Resultado de consumo energético durante o processo de desmagnetização			
Potência do equipamento (kW)	Δt_1 (Horas)	Δt_2 (Horas)	Δt_3 (Horas)
7 kW	2.33 kWh	4.08 kWh	5.83 kWh
t= tempo de moagem (min). $t_1=15$; $t_2=30$; $t_3=45$;			

Fonte : Elaborado pela Autora, 2021.

A desmagnetização, por meio de aquecimento em forno mufla, apresenta grande consumo de energia, pois quanto maior o tempo de consumo e o grau de aquecimento, maior será o consumo de energia elétrica.

4.3.2 Fluorescência de Raios X

Encontraram-se o total de 9 elementos químicos nas amostras de imãs. O resultado de fluorescência de raios X do imã corrobora com a afirmação de FERREIRA (2019), de que o revestimento dos imãs de Hds são formados por camada de níquel (Ni), tanto na amostra de computadores de mesas como de notebooks. A camada que envolve o imã é importante, pois protege o imã contra a corrosão causada pela degradação superficial, queda no rendimento das

propriedades magnéticas e algumas vezes a pulverização do material (München, 2016).

O elemento Nd foi encontrado numa faixa intermediária de teor, denominada de menor quantidade na análise qualitativa, mostrando afirmação de MÜNCHEN (2016) e PAUMANN (2018), que os ímãs são majoritariamente formados pelo elemento ferro e numa liga com Nd. Outros elementos químicos **V, Cr, Ni, Cu, Ca** foram encontrados como elemento traço, mostrando a afirmação MÜNCHEN (2016) e FERREIRA (2019), de que esses metais são utilizados na fabricação da liga.

Tabela 8 – Composição dos ímãs

Descrição da amostra	Elementos majoritários (>50%)	Menor quantidade (5%<x<50%)	Elementos Traços (<5%)
Revestimento do ímã (notebook)	Ni		Fe, Co, Nd, At
Revestimento do ímã (computador de mesa)	Ni		Fe, Co, Ca, At
Parte interna do ímã (computador mesa)	Fe	Nd	V, Cr, Ni, Cu, Ca
Parte interna do ímã (notebook)	Fe	Nd	Ni, Cu, Ca

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

4.4 Métodos de moagem

4.4.1 Moagem de ímãs de NdFeB

4.4.1.1 Moinho de faca

Foram cominuídos inicialmente 425,8 gramas de ímãs entre computadores de mesa e notebooks, em que as perdas chegaram a 2,18%. Observou-se que o ímã apresenta caráter quebradiço, do qual desprenderam-se partículas de granulometria fina que aderiram nas paredes do moinho em função da força eletrostática, dificultando a remoção.

A separação granulométrica foi estabelecida, obtendo-se os seguintes resultados conforme tabela 9.

Tabela 9 – Frações granulométricas obtidas com o moinho de faca

Abertura (mm)	Massa retido (g)
2.38	247.3
1.19	102.3
0.59	43.8
0.297	15.2
0.149	5.7
Passante 0.149	2.2

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Pode-se notar que na cominuição no moinho de faca, o resultado da granulometria não apresenta homogeneidade, por equipamento ser muito robusto, no entanto, é necessário reprocessado na moagem, afim de atingir a granulometria <0,25mm. O resultado corrobora com o MÜNCHEN (2016), obtendo três frações granulométricas no moinho de faca: superior a 0,5mm; entre 0,5mm e 0,25mm; e inferior a 0,25mm. Porém, a quantidade que atingiu a granulometria menor que 0,25mm foi menos que 1%.

No entanto, após a cominuição os imãs seguiram para a etapa de moagem nos moinhos determinado no projeto.

4.4.1.2 Moinho de bolas

A planilha 7, apresenta os resultados obtidos no moinho de bolas.

Planilha 7 – Resultado na moagem do equipamento moinho de bolas

Resultados obtidos nos testes de moagem com moinho de bolas			
Aberturas (mm)	% Passante		
	t ₁	t ₂	t ₃
0,59	199,9 gramas	199,9 gramas	198,5 gramas
0,35	0,01 gramas	0,01 gramas	1,5 gramas
t = tempo de moagem (min). t ₁ =30; t ₂ =45; t ₃ =60;			

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Através desse experimento, concluiu-se que a eficiência de moagem no moinho de bolas é baixa nos tempos de 30 e 45 minutos em comparação ao tempo de 60 minutos.

Mesmo assim, a granulometria obtida no moinho de bolas é ineficaz, o qual corrobora com o estudo de Reisdörfer, Bertuol e Tanabe (2019), sendo assim, granulometria $>0,25\text{mm}$, não favorece para projeto de recuperação do Nd.

A justificativa pelo baixo rendimento do produto final da moagem, pode estar associado a velocidade de rotação do moinho, pois o meio de moagem começa a centrifugar-se e então as esferas caem sobre as outras, reduzindo drasticamente a eficiência do sistema.

4.4.1.3 Moinho de excêntrico

O resultado do primeiro teste demonstrou eficiência na moagem, em comparação ao moinho de bolas, no resultado de 30 minutos, mostrou 21% de eficiência na moagem.

Em relação ao segundo teste em 45 minutos de moagem, verificou-se uma eficiência maior, ocasionando em uma eficiência de moagem de 37,10%.

O resultado do terceiro teste, no tempo de 60 minutos, apresentou uma eficiência menor em comparação ao segundo teste no excêntrico. O resultado apresentou 29,9% de eficiência na moagem.

Pode-se notar que o rendimento inicial da moagem é alto em comparação aos tempos mais longos de moagem. Segundo ASSIS (2019), no início do processo de moagem pode acontecer de reduzir drasticamente o diâmetro médio das partículas, sendo que o processo vai se tornando cada vez menos eficaz até praticamente ter uma mínima variação com o decorrer do tempo.

No entanto, pode-se justificar neste caso que nas mesmas condições de moagem, pode haver redução na eficiência de moagem, caso o material for moído a partir de 60 minutos, porém com um maior consumo energético em função do tempo extra de moagem. E também, parte do material pode ficar aderido nas paredes do jarros cerâmicos do moinho e nas bolas do moinho. Esta aglomeração tende a diminuir a área de contato, trazendo redução da eficiência de moagem.

O resultado dos testes mencionados acima, pode ser analisada através da planilha 8.

Planilha 8 – Resultado na moagem do equipamento moinho excêntrico

Resultados obtidos nos testes de moagem com moinho excêntrico			
Aberturas (mm)	% Passante		
	t ₁	t ₂	t ₃
1,19	158,5 gramas	126,9 gramas	141,6 gramas
0,59	0 gramas	0 gramas	0 gramas
0,35	7,8 gramas	14,6 gramas	7 gramas
0,149	8,9 gramas	17,7 gramas	10,1 gramas
Passante 0,149	25,3 gramas	41,9 gramas	41,3 gramas
t= tempo de moagem (min). t ₁ =30; t ₂ =45; t ₃ =60;			

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Durante o processo de moagem de imãs no moinho excêntrico, pode-se notar que não houve qualquer perda de material ou desgaste nos corpos moedores (figura 27).

Figura 27 – Moagem no moinho excêntrico



Fonte: Registrado pela autora, 2021.

4.4.1.4 Cálculo de consumo energético na cominuição e moagem

As informações de potência no equipamento são na unidade do Sistema Internacional hp (horse power), no entanto, foi necessário transformar as unidades para a unidade padrão do Sistema Internacional de Medidas (SI), o qual foi definido pela Organização Internacional para Normatização (ISSO) segundo as normas ISSO 31 e ISO 1000.

Todavia, é preciso atentar-se na equivalência das medidas de transformação:

- 1hp = 0.7457 kW

Dados as seguintes informações dos Equipamentos:

- Potência no Moinho de Faca (hp): 1.5 Hp equivale a 1.1kW;
- Potência no Moinho de bolas (hp): 1.5 hp equivale a 1.12 kW;
- Potência no Moinho Excêntrico (hp): 0.33 hp equivale a 0.25 kW.

A tabela 10, apresenta os resultados do consumo energético durante o processo de cominuição e moagem.

Tabela 10 – Consumo energético nos moinhos

Resultado de consumo energético durante processo de cominuição e moagem			
Tipo de moagem	Moinho de facas	Moinho de bolas	Moinho excêntrico
Potência do equipamento	1.1 kW	1.12 kW	0.25 kW
Moinho de faca			
Tempo		Resultado (kWh)	
Δt (minutos)	3 minutos	0.055kWh	
Moinho de bolas			
Δt_1 (minutos)	30	0.56 kWh	
Δt_2 (minutos)	45	0.84 kWh	
Δt_3 (minutos)	60	1.12 kWh	
Moinho excêntrico			
Δt_1 (minutos)	30	0.125 kWh	
Δt_2 (minutos)	45	0.187 kWh	
Δt_3 (minutos)	60	0.25 kWh	

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Através do resultado obtido, pode-se concluir que quanto maior for a potência do aparelho, maior seu consumo. E conseqüentemente, quanto mais tempo o equipamento permaneceu ligado maior foi o consumo de energia elétrica.

4.4.2 Fluorescência de Raios X

Antes da separação granulométrica na peneira vibratória, foi separada uma porção bruta de cada amostra do equipamento para a realização da análise química de forma qualitativa, conforme indicado na tabela 11.

Tabela 11 – Análise FRX após moagem

Amostra	Elementos majoritários (>50%)	Menor quantidade (5%<x<50%)	Elementos Traços (<5%)
Moinho Excêntrico	Fe	Nd	Si, Ni, Al, Ca, K, Cu, Nb, Zr, Pr
Moinho de bolas	Fe	Nd	Al, Ca, Cu, Zn, K, W, Nb
Moinho de Facas	Fe	Nd	Al, V, Ca, K, Cu, S, Nb

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Por meio da tabela 11, é possível observar que foi detectado alguns elementos que não apareceram na primeira análise de FRX, como alumínio, potássio, enxofre e nióbio. A presença do potássio e enxofre, provavelmente é uma contaminação que ocorreu no moinho de facas. Pois, no laboratório que foram realizados a moagem, o equipamento foi utilizado para realizar a moagem de outros materiais além dos imãs.

No moinho de bolas, foi detectada os elementos zinco e tungstênio, que não apresentou na análise no moinho de facas. O elemento zircônio é um elemento metálico que pertence a classe dos metais de transição, no entanto, pode-se explicar que esta é uma liga utilizada para fabricação do imãs. E o tungstênio é um metal de transição muito resistente à corrosão. Neste caso, é possível afirmar que durante a fabricação dos imãs foi utilizado este elemento para evitar o possível corrosão do imã.

No moinho excêntrico, foi notado a presença de silício e zircônio. Estes elementos químicos é da própria composição química dos corpos moedores de alumina.

Outros traços de elementos que foram exibidos na análise são percebidos como cobre, nióbio, praseodímio e entre outros, são da própria composição do imã. Pois, de acordo com o ano de fabricação e produção, a composição da fabricação do imã pode variar e, outro fato que pode explicar e justificar esta situação, é que podem ter sido encontrados valores comerciais baixos desses elementos que compõem os imãs ocasionando em um preço inferior, por questões econômicas, por exemplo.

4.4.3 Análise química das frações granulométricas via fluorescência de Raios X

Após realizar a separação granulométrica na peneira vibratória, a porção obtida inferior a 0,25mm dos imãs foram direcionadas para uma análise de fluorescência de Raios X e, os dados obtidos, estão retratados na tabela 12.

Tabela 12 – Análise FRX da fração <0,25mm

Elementos majoritários (>50%)	Menor quantidade (5%<x<50%)	Elementos Traços (<5%)
Fe	Nd	Si, Ca, Ni, Mg, Al, K, Cu, Nb, Zr

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Por meio dos resultados da tabela 12, é possível comprovar a afirmação de que os imãs são formados por Fe e Nd, apesar de que o Nd apresenta valor intermediário, ou chamado em menor quantidade. O elemento boro não aparece em nenhuma das análises realizadas, visto que conforme a afirmação de MÜNCHEN (2016), este elemento é de baixa energia de transição eletrônica, por essa razão não é possível ser detectado na análise de fluorescência de raios X.

5 CONCLUSÃO

Tendo em vista os aspectos observados, é cabível evidenciar que a desmontagem dos HDs foi moroso, pois foi executado de forma manual, com a intenção de recuperar os materiais de forma mais eficiente.

Uma vantagem na desmontagem manual dos Resíduos Eletroeletrônicos, é que pode-se alcançar tanto uma descontaminação e uma melhor eficiência de triagem, entretanto a eficiência de desmontagem é baixa devido à grande quantidade de peças a serem desmontadas e removidas.

Ademais, houve muita variabilidade das amostras apresentadas dos HDs devido ao intervalo de tempo em relação às datas de fabricação desses, de 1997 a 2013. A desmontagem manual foi prejudicada devido ao desgaste das peças, o que resultou no impedimento de remoção de algumas peças que consiste no HDs e também o imã.

A partir dos resultados da desmagnetização, é possível afirmar que o tempo e a temperatura ideal para este procedimento, conforme amostras avaliadas, é de 45 minutos a uma temperatura de 350°C, em que o campo magnético foi inibido e as ligas magnéticas puderam ser cominuídas sem que houvesse aglomeração de partículas. Além disso, quanto maior a espessura dos imãs, maior o tempo para desmagnetização.

Já em relação a moagem, as amostras foram primeiramente cominuídas no moinho de facas, devido ao fato das amostras apresentarem tamanhos avantajados. A cominuição foi realizada com a finalidade de reduzir o tamanho das amostras, pois tamanhos grandes dificultam o processo de moagem e isso pode acabar danificando os equipamentos e da mesma forma os corpos moedores.

Uma das desvantagens de cominuir as amostras no moinho de facas, é que pode ocorrer a contaminação do próprio material com outros materiais contidos em uma moagem realizada anteriormente. Outra desvantagem, é a possibilidade de perda de material, já que estes ficam aderidos nas paredes dos moinhos, dificultando sua remoção. Após a pesagem da massa do material, inicial e final, expôs-se que a cominuição no moinho de facas resultou em uma perda de material de 2,18%.

No resultado do moinho de bolas, observou-se grande ineficiência de moagem, mesmo que as amostras foram cominuídas inicialmente e reprocessada no moinho de bolas, em que o resultado chegou a 0%.

No moinho excêntrico o resultado no tempo de 30 minutos indicou o valor de 12,65% da fração atingiu a granulometria desejada, em 45 minutos de moagem, 20,95% da fração atingiu a granulometria desejada e, no tempo de 60 minutos, 20,65% da fração atingiu a granulometria desejada, salientando que a granulometria desejada é inferior a $<0,25\text{mm}$.

Assim, pode-se constatar que após a moagem, o moinho de bolas apresentou os piores resultados referente ao processo. Por outro lado, o moinho excêntrico apresentou um rendimento total de 26,05% mostrando-se mais eficiente que o moinho de bolas.

Portanto, para as condições utilizadas neste estudo, após desmontagem manual dos HDs, o tempo e temperatura de desmagnetização dos imãs foi de 45 minutos e 350°C , assim como a moagem no moinho excêntrico foi mais eficiente no tempo de moagem de 45 minutos.

REFERÊNCIAS

- BALDÉ, C.P., FORTI, V., GRAY, V., KUEHR, R., STEGMANN, P. *The global E-Waste monitor 2017: Quantities, Flows, and Resources*. United Nations University. Disponível em: https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/Global-E-waste_Monitor_2017__electronic_single_pages_.pdf. Acesso em 24 de janeiro de 2020.
- BINNEMANS, K., JONES, P., BLANPAIN B., GERVEN T., YANG Y., WALTON A., BUCHERT M. *Recycling of rare earths: a critical review*. Journal of Cleaner Production, Vol. 51 (2013), pág 1-22.
- BREHM, F. A. *Adição de óxido de zinco (ZnO) em pastas de cimento visando viabilidade a reciclagem de pós de aciaria elétrica (PAE) na construção civil*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM- Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS, Tese de Doutorado, 2004.
- BRUNATTO.M.L. *Eficiência da moagem de pó cerâmico em moinho agitador de esferas*. Ano 2017, 1-88p. Dissertação em Engenharia Mecânica – Universidade de Caxias do sul- UCS, Caxias do sul-RS.
- CALLISTER.W.D., RETHWISCH.D.G. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 9ª edição.
- CHRISTMANN, O. *A forward look into rare earth supply and demand: a role for sedimentary phosphate deposits?* Procedia Engineering. Vol. 2014, n. 83, pág. 19 – 26, 2014.
- COSSU. R., WILLIAMS ID. *Urban mining: Concepts, terminology, challenges, Waste management*. Pág 1-3, (2015).
- D.BAHL, D., HUDAK, J., BOGNER, R.H. *Comparison of the ability of various pharmaceutical silicates to amorphize and enhance dissolution of indomethacin upon grinding*, Pharmaceutical Development Technology. pág. 255-269, (2008).
- DENIZ, V. *Comparisons of dry grinding kinetics of lignite, bituminous coal, and petroleum coke*, Energy Sources Part A Recovery until Environ. pág. 913-920, (2013).
- DIRECTIVE, E. C. *Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment, WEEE, off*. Journal Europe Union. Vol. 197 (2012), pág.38-71.
- Eurostat, *Recycling Rate of WEEE, Retrieved from 2018*. Acesso em 21 de Agosto http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=de&pcode=t2020_rt1308&plugin=1.
- FERREIRA, A.H. *Caracterização microestrutural e modelamento de curvas de histerese de ímãs NdFeB*. Volta redonda, 2019. Dissertação de Mestrado em Engenharia metalúrgica da Universidade Federal Fluminense.

- FIGUEIRA, H. V.; LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. Britagem e moagem. In: Tratamento de minérios, 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.4. p.143-210.
- FILHO, P.C.S., GALAÇO, A.R.B.S., SERRA, O.A. Terras Raras: Tabela periódica, descobrimento, exploração no Brasil e aplicações. Scielo Brasil: Química Nova 42 (10), outubro de 2019.
- FORTI, V. O crescimento do lixo eletrônico e suas implicações globais. Revista Panorama setorial da Internet. Número 4, dezembro, 2019. Universidade das Nações Unidas- Vice reitoria na Europa (UNU-VIE).
- GOLEV, A. et al. *Rare earths supply chains: current status, constraints and opportunities*. Resources policy. Vol. 2014, n. 41, pág. 52-59, Março 2014.
- GRAVELSINS, R.J. *Studies of Grinding of Wood and Bark-wood Mixtures with the Szego Mill*. Toronto University, Tese de Doutorado, 1998. Acesso em 15 de novembro de 2019.
- GRITLI, Y., TANI, A., ROSSI, C., CASADEI, D. *Assessment of current and voltage signature analysis for the diagnosis of rotor magnet demagnetization in five-phase AC permanent magnet generator drives*. Mathematics and Computers in Simulation, volume 158, pág 91-106, (2019).
- GUPTA C. K. *The effect of particle size distribution on grinding rate in dry ball milling*. Laval University, Canada, pág. 23-27, (1987).
- GUPTA C. K., KRISHNAMURTHY N. *Extractive Metallurgy of rare earths*. Boca Raton. Boca Raton, FL, USA; London, UK; New York, NY, USA, 2005; Pág. 396-411.
- GUPTA, C. K., KRISHNAMURTHY N. *Extractive Metallurgy of rare earths*. Boca Raton, (2005).
- GUTBERLET, J. *Cooperative urban mining in Brazil: Collective practices in selective household waste collection and recycling*, Waste management, pág 22-31., Volume 45, (2015).
- ITAKURA, T.; SASAI, R.; ITOH, H. *Resource recovery from Nd-Fe-B sintered magnet by hydrothermal treatment*. Journal Alloys Compounds. Vol. 408–412, pág. 1382–1385. (2006).
- JEREMY, S. *How long do hard drives last? Lifespan and signs of failure*. Prosoft Engineering, (2017).
- KOHL, C.A. *Caracterização e valorização de resíduos de gabinetes de microcomputadores de mesa*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Rio grande do sul, RS, 2014.
- KRÜGER, F.L. *Corpos moedores côncavos*. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, MG, 2004.

LIXANDRU, A., VENKATESAN, P., JÖNSSON, C., POENARU, I., HALL, B., YANG, Y., WALTON, A., GÜTH, K., GAUB, R., GUTFLEISCH, O. *Identification and recovery of rare-earth permanent magnets from waste electrical and electronic equipment*. Waste Management 2017 October; vol. 68, pág. 482-489.

MÜNCHEN, D.D. *Recuperação de Neodímio a partir de ímãs de Neodímio-Ferro-boro por meio de processos mecânicos e hidrometalúrgicos*. Porto Alegre, 2016. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MÜNCHEN, D.D., VEIT.H.M. *Neodymium as the main feature of permanent magnets from hard disk drives (HDDs)*. Waste Management, volume 61, pág. 372-376, 2017.

MURDANTE, S.B., PIKAL, M.J., SHANKER, R.M., BOGNER, R.H. *Solubility advantage of amorphous pharmaceuticals: A thermodynamic analysis*. Journal Pharmaceutical Science. pág. 1254-1264, (2010).

OGONOWSKI, S., WOLOSIEWICZ, M., *Comparison of wet and dry grinding in electromagnetic mill*, Journal Minerals, pág. 1-19., (2018).

OLIVEIRA.R.F. *Uma Revisão dos Princípios de Funcionamento e Métodos de Dimensionamento de Moinhos de Bolas*, Minas Gerais, julho de 2012. 8-60p. Monografia de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais, Universidade Federal de Minas Gerais.

OMODARA.L., PITKAAHO.S., TURPEINEN.EM., SAAVALAINEN.P., ORAVISJARVI.K., KEISKI.R. *Recycling and substitution of light rare Earth elements, cerium, lanthanum, neodymium, and praseodymium from end-of-life applications- A review*. Journal of Cleaner Production, volume 236, 2019.

ÖNAL.M.A.R., RIAÑO.S., BINNEMANS.K. *Alkali baking and solvometallurgical leaching of NdFeB magnets*. Hydrometallurgy, volume 191, 2020.

ONGONDO, F. O., WILLIAMS, I. D., CHERRETT T. J. *How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic waste*. Waste Manage. Vol. 31 (2011), pág 714-730.

OSTI.F., CERUTI.A., LIVERANI.A., CALIGIANA.G. *Semi-automatic design for disassembly strategy planning: an augmented reality approach*, Procedia Manufacturing, volume 11, pág 1481-1488, (2017).

PAULA.L.F., ALVES.A., RIBEIRO.E.A., MADURRO.A.G.B., MADURRO.J. *Diretrizes para construção de um moinho de bolas para a moagem de sólidos em laboratórios*. Química nova. ISSN0100-4042 volume.37 no. 4. São Paulo. Acesso: <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140114>.

PAUMANN.J.T. *Caracterização de discos rígidos e recuperação de neodímio de ímãs de neodímio-ferro-boro*. Dois irmãos, 2018. Relatório na Mostra internacional de ciência e tecnologia- MOSTRATEC.

PEIRÓ.L.T., GIRÓN. A. C., DURANY.X.G. *Examining the feasibility of the urban mining of hard disk drives*. Journal of Cleaner Production, volume 248, (2020).

REISDÖRFER.G.,BERTUOL.D., TANABE.E.H. *Recovery of neodymium from the magnets of hard disk drives using organic acids*. Minerals Engineering, volume 143, (2019).

REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU: Critical Raw Materials for the EU, European Commission and Brussels, Belgium, p. 13-27, 2014.

ROSA, A.C. *Desempenho dos Circuitos de Moagem Direto e Inverso da Samarco*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 2013.

SAMIN.A.J. *A review of radiation-induced demagnetization of permanent magnet*. Journal of Nuclear Materials. Volume 503, pág 42-55, (2018).

SAMPAIO.J.A., BARBATO.C.N. *Ensaio de moagem em laboratório- Capítulo 9, Parte III Moagem-CETEM/MCT*, (2010).

SCHLUEP.M., SPITZBART.M., BLASER.F. *Best environmental practice for the manual dismantling of ICT equipment*. Cambodia, 2015. UNIDO train the trainer program.

SEKE, M.D., PISTORIUS, P.C. *Effect of cuprous cyanide, dry and wet milling on the selective flotation of galena and sphalerite*. Miner engineering, pág. 1-11, (2006).

SERTEK.J.P. *Estudo das contaminações provenientes do processo de cominuição de amostras geológicas*. Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia-USP, Dissertação de Mestrado, 2010.

SILVA.G.R. *Caracterização de aços por técnicas de raios X*. Nova Friburgo, 2019. Dissertação em Ciência e Tecnologia de Materiais do Instituto Politécnico. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

SILVA.N.G. *Avaliação técnica e ambiental da incorporação de pó de aciaria elétrica (PAE) em material cerâmico*. Programa de pós-graduação em engenharia civil, UNISINOS, Dissertação de Mestrado, 2018.

SILVA.S.J. *Metais terras raras e discos rígidos de computador: quanto o Brasil perde com a ausência de reciclagem de eletrônicos?* Porto alegre, 2015. Trabalho de conclusão de Engenharia ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SOH.S.L., ONG.S.K., NEE.A.Y.C. *Aplocation of design for disassembly from remanufacturing perspective*, Procedia CIRP, pág 577-582, (2015).

TAGGART, A. *Handbook of Mineral Dressing*. John Wiley and Sons, 1945.

TANVAR.H., BARNWAL.A., DHAWAN.N. *Characterization and evaluation of discarded hard disc drives for recovery of copper and rare earth values*. Journal of Cleaner Production, volume 249, (2020).

TAVARES, L.M. *A review of advanced ball mill modelling*. KONA powder and particle journal, p 106-124, (2017).

TAVARES, L.M. *Um novo método para cálculo da eficiência energética de moinhos industriais*. Matéria (UFRJ), Rio de Janeiro, V. 6, n. 1, 2001.

TINO, A. A. A. *Moagem Ultrafina de Gipsita em Moinho Planetário de Bolas: Caracterização Dimensional, Morfológica e Estrutural do Estado Particulado*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral Mina- UFPE, Dissertação de Mestrado, 2016.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. *Obsolete Computers, “gold mine” or High-Tech Trash? Resource Recovery from Recycling*. USGS Fact Sheet FS-060-0a: 2001. Disponível em: <http://pubs.usgs.gov/fs/fs060-01/fs060-01.pdf>. Acesso em: 16 de novembro, 2019.

USGS- U.S. *Geological Survey*. Mineral Commodity Summaries. 2019.

WALTON, A., HAN YI, ROWSON, N.A., SPEIGHT, J.D., MANN, V.S.J., SHERIDAN, R.S., BRADSHAW, A., HARRIS, I.R., WILLIAMS.A.J. *The use of hydrogen to separate and recycle neodymium-iron-boron-type magnets from electronic waste*. Journal of Cleaner Production. October; vol. 104, pág. 236-241 (2015).

WANG.J.L., GUO.M.Y.,LIU.M.M., WEI.X.Q., *Long-term outlook for global rare earth production*. Resources Policy, volume 65, (2020).

WELLENKAMP, F.J. *Moagens Fina e Ultrafina de Minerais Industriais: uma revisão*. Series Technologic Mineral. Rio de Janeiro: CETEM/MCT,1999.

WILLS, B.A. *Mineral Processing Technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 7º edição Oxford: Elsevier, 2007.

XAVIER.L.H., GIESE.E.C., DUTHIE.A.C.R., FREITAS.F.A. *Sustainability and the circular economy: a theoretical approach focused on e-waste urban mining*, Resources Policy, (2019).

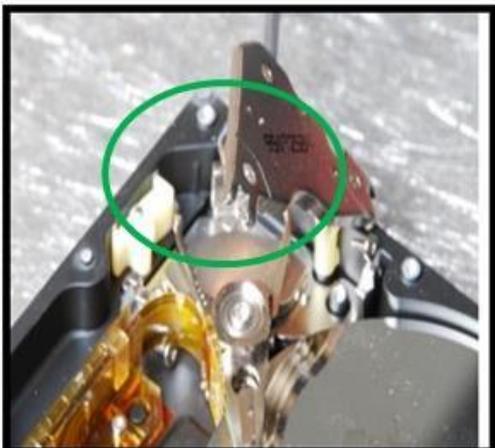
YANG, Y., BINNEMANS, K., GERVEN, T., WALTON, A., BUCHERT, M., GÜTH, K., VAN GERVEN, T. *REE recovery from end-of-life NdFeB permanent magnet scrap: critical review*. Journal of Sustainable Metallurgy 2016 September. Disponível em <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs40831-016-0090-4>. Acesso em 16 de setembro de 2019.

APÊNDICE A – DEMONSTRAÇÃO DA DESMONTAGEM DE DISCO RÍGIDO (HD)

LEGENDA

- Amarelo : posição dos parafusos;
- Verde: posição dos imãs;
- Vermelho: braço atuador;

<p>1</p>	<p>Colocar o HD na bancada de trabalho de cabeça para baixo de modo que a Placa de circuito impresso (PCI) possa ser vista. Remova todos os parafusos. Em alguns casos, o parafuso pode ser de cabeça sextavada. Basta desparafusar, retirar a placa e passar para etapa seguinte.</p> <p>Ferramenta: Torx T10 / T08</p> <p>Utilização de luva é essencial, pois podem ter peças de corte!</p>	
<p>2</p>	<p>Colocar o HD na vista superior para cima. Desparafuse a tampa superior do HD. Retire o adesivo que contém na tampa, pois um ou mais parafusos podem estar cobertos por adesivos. Remova a tampa superior e prossiga para etapa seguinte.</p> <p>Ferramenta: Chave Torx T10/T08.</p> <p>Para remover o adesivo, utilize uma faca, espátula metálica ou estilete 9mm.</p>	

3	<p>Alguns HD podem apresentar bandeja de proteção do disco, neste caso é só seguir o processo de desparafusar.</p> <p>Ferramenta: Chave Torx T07/T08.</p>	
4	<p>Remova o imã de neodímio-ferro-boro do atuador 1 com auxílio de uma chave Torx-t08. Armazene os ímãs para uma futura recuperação de metais.</p> <p>Ferramenta: Chave Torx T07/T08.</p>	
5	<p>Remova a estrutura que segura o ponteiro, conhecido como braço atuador. Para retirá-lo, utilize uma chave hexagonal ou alicate girando 360° até que o ponteiro se solte totalmente.</p> <p>Ferramenta: Chave Hexagonal 2,5mm/ Alicate.</p>	

6	<p>Remova o ímã de neodímio-ferro-boro do atuador 2 com auxílio de uma chave Torx-t08. Armazene os ímãs para uma futura recuperação de metais.</p> <p>Ferramenta: Chave Torx T07/T08.</p>	
7	<p>Remova todos os parafusos do anel do eixo e retire também o suporte plástico. Após a remoção do anel do eixo, o prato se soltará.</p> <p>Ferramenta: Chave Torx T08/T10.</p>	
8	<p>Para remover o motor, desparafuse a placa circular inferior juntamente com o motor. Em alguns HDs, o motor não está preso por há parafusos impossibilitando a remoção, pois o motor está soldado junto com a carcaça do HD, o qual isto está ligado ao design (neste caso um punção e martelo podem ser usados para separá-lo da carcaça)</p> <p>Ferramenta: Chave Torx T07/T08.</p>	

9	Separe as partes de acordo com a sua composição.	 A photograph showing the disassembled components of a hard drive laid out on a yellow surface. The parts include a large black metal housing, a silver metal cover, a green printed circuit board (PCB) with various electronic components, a silver metal disk, a silver metal ring, a small black plastic component, and several screws and small metal parts. A watermark in the bottom left corner of the photo reads "Shot on Y17 Vivo AI camera" and a timestamp in the bottom right corner reads "2020.02.02 14:57".
---	--	--

Fonte: Registrada pela autora, 2021.

**APÊNDICE B – DESCRIÇÃO TÉCNICA E FÍSICA DAS AMOSTRAS DE HDS 3.5”
ANALISADAS**

Disco rígido de 3.5” polegadas						
Amostra	Modelo	Marca	Ano	Capacidade (GB, MB, TB)	Massa (kg)	S/N
F1	MAX3147RC	Fujitsu	2006	146 GB	0,533	DQ03P6C04R4 N
H1	BA3120	Hitachi	2010	1 TB	0,485	0438016BA312 00C03
IBM1	DCAS-32160	IBM	1997	160MB	0,533	—
M1	STM380211A S	Diamond Max 20	2000	80GB	0,452	6PS30YQV
M2	STM3800215A S	Diamond Max 20	2000	80GB	0,540	9DS111-327
M3	STM380215A	Diamond Max 21	2000	80GB	0,423	9QZ9BRDQ
M4	STM380215A S	Diamond Max 21	2000	80 GB	0,540	9QZ8GK89
M5	6Y200MOSTD	Diamond Max 21	2000	200 GB	0,342	Y60ZH2WE
Q1	SG041RRT	Quantum Fireball	2000	4GB	0,522	QML20000LD- A
Q2	CX64A491	Quantum Fireball	2002	6,4GB	0,438	M A3F0E
S1	HD5024J	Samsung	2010	500GB	0,422	52BWJ602B56 611
S2	SP0802N	Samsung	2006	80GB	0,555	SOEWJ1SL701 52
S3	HD502HI	Samsung	2009	500GB	0,378	PEJUD5C4N80 05
S4	SV2011H	Samsung	2003	20GB	0,561	0606J1FW223 97
S5	HD103SI	Samsung	2010	1000GB	0,558	S23ZJ50Z9111

						19
S6	HD081GJ	Samsung	2008	80GB	0,552	S19SJ5436047 39
S7	SP0842N	Samsung	2006	80GB	0,543	S0JFJ1SL9414 18
S8	HD161HJ	Samsung	2005	160GB	0,555	SOV3JQSS101 93
S9	HD081GJ	Samsung	2008	80GB	0,425	S196J50Q4526 8
S10	HD161GJ	Samsung	2008	160GB	0,342	S14DJ9DS510 18
S11	HD502HI	Samsung	2010	500GB	0,474	S1ZVJ50Z1159 40
S12	HD502HJ	Samsung	2011	500 GB	0,474	S2BVJ56B504 220
S13	HD502HJ	Samsung	2011	500 GB	0,422	S2BVJ56B504 236
S14	HD502HJ	Samsung	2010	500GB	0,474	S2BWJ60ZA01 62
S15	HD502HJ	Samsung	2010	500 GB	0,474	S2BVJ606B61 554
S16	HD080HJ	Samsung	2007	80 GB	0,552	SOHQJ56P401 65
S17	HD502HJ	Samsung	2011	500 GB	0,474	S2BVJ56B504 23
S18	SP0823N	Samsung	2005	80 GB	0,543	SO6QJ20Y416 18
S19	SP0802N	Samsung	2006	80 GB	0,543	SOEWJ1SL25 011
S20	SP0411N	Samsung	2006	40 GB	0,474	SOEWJ1SL25 004
S21	HD080HJ	Samsung	2007	80 GB	0,425	S08EJ56P2119 89
ST2	ST3500312CS	Seagate	2013	500GB	0,545	9GW132
ST3	ST2000DM001	Seagate	2013	2000GB	0,545	W241JG45
ST4	ST31000424S	Seagate	2000	1000GB	0,640	9WK0794M

S						
ST5	ST36421A	Seagate	2000	6448MB	0,646	3BE0PAMD
ST6	ST3500312CS	Seagate	2013	500 GB	0,583	6VV4MY6L
ST7	ST2000DL003	Seagate	2013	2000 GB	0,545	5YD1THL0
ST8	ST320410A	Seagate	2000	20 GB	0,342	5FGOEW3
ST9	ST3000DM001	Seagate	2015	3000 GB	0,583	ZA500P95
ST10	ST3250318AS	Seagate	2000	250 GB	0,476	9VM9QASY
T1	DT01ACA050	TOSHIBA	2013	500GB	0,467	—
T2	DT01ACA050	TOSHIBA	2013	500	0,474	83S59LGASX1 3
W1	WD400	Wester digital	2006	40GB	0,518	WCAM9E8836 83
W2	WD400	Wester digital	2005	40GB	0,474	WMAMC37725 3
W3	WD10EARS	Wester Digital	2012	1TB	0,485	WCAV5W4726 8
W4	WD2500AAJ S	Wester digital	2011	250GB	0,476	WCAV2Y8521 35
W5	WD400	Wester digital	2005	40 GB	0,474	WCAMA28453 6
W6	WD1600AABS	Western Digital	2007	160 GB	0,476	WCAP9443361 8
W7	ED800JD	Western Digital	2007	80 GB	0,518	WMAM9TT375 9
W8	WD800JD	Western Digital	2007	80 GB	0,425	WMAM9UN169
W9	WD800JD	Western Digital	2007	80 GB	0,474	WMAM9MW35 9
W10	WD2500	Western Digital	2008	250 GB	0,476	WCAT1165308 2

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

**APÊNDICE C – DESCRIÇÃO TÉCNICA E FÍSICA DAS AMOSTRAS DE HDS 2.5”
ANALISADAS**

Disco rígido de 2.5” polegadas						
Amostra	Modelo	Marca	Ano	Capacidade (GB, MB, TB)	Massa (kg)	S/N
S1	ST500LM01 2	Samsung	2013	500GB	0,096	S2YTJ5DD A00087
S2	HM160HI	Samsung	2009	160GB	0,095	S1C6J56S5 36667
S3	HM321HI	Samsung	2011	320GB	0,095	S2K5J56B4 24857
S4	HM321HI	Samsung	2010	320GB	0,096	S29RJ56ZA 07030
ST1	ST9160821A S	Seagate	2003	160GB	0,095	5MABEAH M
T1	MK5076GSX	Toshiba	2011	500GB	0,097	51J1F1LIS MS6
W1	WD6400BEV T	Wester digital	2009	640GB	0,098	WXE1AA0 M9807
W2	WD3200BPV T	Wester digital	2013	320GB	0,095	WX21E43Y F511

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

APÊNDICE D – MASSA DOS MATERIAIS DOS HDS 3.5" POLEGADAS

Massa dos materiais (kg)						
Amostra	HD (kg)	Plásticos	Metais não ferrosos	Metal ferrosos	Materiais com substâncias de interesse	Outros materiais
F1	0,533	0,005	0,325	0,175	0,023	0,005
H1	0,485	0,005	0,295	0,149	0,031	0,005
IBM	0,533	0,005	0,325	0,175	0,023	0,005
M1	0,452	0,004	0,298	0,109	0,036	0,005
M2	0,540	0,005	0,325	0,170	0,035	0,005
M3	0,423	0,004	0,246	0,136	0,032	0,005
M4	0,540	0,005	0,325	0,170	0,035	0,005
M5	0,342	0,003	0,189	0,123	0,022	0,005
Q1	0,522	0,005	0,322	0,160	0,034	0,001
Q2	0,438	0,005	0,293	0,113	0,022	0,005
S1	0,422	0,004	0,289	0,102	0,022	0,005
S10	0,342	0,003	0,189	0,123	0,022	0,005
S11	0,474	0,005	0,276	0,163	0,025	0,005
S12	0,474	0,005	0,276	0,163	0,025	0,005
S13	0,422	0,007	0,289	0,102	0,022	0,005
S14	0,474	0,005	0,276	0,163	0,025	0,005
S15	0,474	0,005	0,276	0,163	0,025	0,005
S16	0,552	0,005	0,342	0,170	0,034	0,001
S17	0,474	0,005	0,276	0,163	0,025	0,005
S18	0,543	0,005	0,339	0,165	0,032	0,002
S19	0,543	0,005	0,339	0,165	0,032	0,002
S2	0,555	0,005	0,344	0,170	0,035	0,001
S20	0,474	0,004	0,293	0,142	0,030	0,005
S21	0,425	0,005	0,253	0,132	0,030	0,005
S3	0,378	0,005	0,332	0,015	0,021	0,005
S4	0,561	0,007	0,362	0,145	0,041	0,006
S5	0,558	0,005	0,343	0,170	0,035	0,005

S6	0,552	0,005	0,342	0,170	0,034	0,001
S7	0,543	0,005	0,339	0,165	0,032	0,002
S8	0,555	0,005	0,345	0,172	0,032	0,001
S9	0,425	0,005	0,253	0,132	0,030	0,005
ST1	0,583	0,004	0,353	0,186	0,035	0,005
ST10	0,476	0,005	0,252	0,173	0,042	0,004
ST2	0,545	0,005	0,342	0,163	0,030	0,005
ST3	0,545	0,005	0,342	0,163	0,030	0,005
ST4	0,640	0,020	0,387	0,182	0,045	0,006
ST5	0,646	0,020	0,368	0,212	0,041	0,005
ST6	0,583	0,004	0,353	0,186	0,035	0,005
ST7	0,545	0,005	0,342	0,163	0,030	0,005
ST8	0,342	0,003	0,189	0,123	0,022	0,005
ST9	0,583	0,004	0,353	0,186	0,033	0,005
ST10	0,476	0,005	0,252	0,173	0,042	0,004
T1	0,467	0,004	0,299	0,133	0,028	0,003
T2	0,474	0,004	0,293	0,142	0,030	0,005
W1	0,518	0,005	0,323	0,152	0,030	0,005
W2	0,474	0,004	0,293	0,142	0,030	0,005
W3	0,485	0,005	0,295	0,149	0,031	0,005
W4	0,476	0,005	0,252	0,173	0,042	0,004
W5	0,474	0,004	0,293	0,142	0,030	0,005
W6	0,476	0,005	0,252	0,173	0,042	0,004
W7	0,518	0,005	0,323	0,152	0,030	0,004
W8	0,425	0,005	0,253	0,132	0,030	0,005
W9	0,474	0,004	0,293	0,142	0,030	0,005
W10	0,476	0,005	0,252	0,173	0,042	0,004
MÉDIA	0,4953	0,00524	0,3022	0,1523	0,0309	0,0043

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

APÊNDICE E – MASSA DOS MATERIAIS DOS HDS 2.5" POLEGADAS

Massa dos materiais (kg)						
Amostra	HD (kg)	Plásticos	Metais não ferrosos	Metal ferrosos	Materiais com substâncias de interesse	Outros materiais
S1	0,096	0,010	0,069	0,006	0,010	0,001
S2	0,095	0,010	0,068	0,006	0,010	0,001
S3	0,095	0,010	0,068	0,006	0,010	0,001
S4	0,096	0,010	0,069	0,006	0,010	0,001
ST1	0,095	0,010	0,068	0,006	0,010	0,001
T1	0,097	0,010	0,070	0,007	0,009	0,001
W1	0,098	0,010	0,071	0,007	0,009	0,001
W2	0,095	0,010	0,068	0,006	0,010	0,001
MÉDIA	0,0958	0,01	0,0688	0,0062	0,0097	0,001

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.