



Dissertação de Mestrado

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES EM MEMÓRIAS RAM

Autora: ALINE ARRUDA BARRETO

Orientador: PROF. DR. IURE BORGES DE MOURA AQUINO

Coorientador: PROF. DR. WLADYMYR JEFFERSON BACALHAU DE SOUSA

Área de Concentração:

Exploração Mineral

**Campina Grande – PB
2023**

Dissertação de Mestrado

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS ELEMENTOS
QUÍMICOS PRESENTES EM MEMÓRIAS RAM**

Autora: ALINE ARRUDA BARRETO

Dissertação de Mestrado apresentada dia 28 de Julho de 2023, ao Programa de Pós – Graduação do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de Mestra em Exploração Petrolífera e Mineral.

Área de Concentração:
Exploração Mineral

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Iure Borges de Moura Aquino (PPGEPM/UFCG – Orientador)

Prof. Dr. Wladymyr Jefferson Bacalhau de Sousa (CERTBIO/UFCG – Coorientador)

Prof. Dr. Ademar Virgolino da Silva Netto (CEAR/UFPB – Avaliador Externo)

Profa. Dra. Albaniza Alves Tavares (CERTBIO/UFCG – Avaliadora Externa)

Campina Grande – PB
2023

B273c

Barreto, Aline Arruda.

Caracterização tecnológica dos elementos químicos presentes em memórias RAM / Aline Arruda Barreto. - Campina Grande, 2023.

98 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.

"Orientação: Prof. Dr. Iure Borges de Moura Aquino, Prof. Dr. Wladymyr Jefferson Bacalhau de Sousa."

Referências.

1. Resíduos Eletrônicos. 2. Memória RAM. 3. Reciclagem. 4. Mineração Urbana. 5. Caracterização Tecnológica. I. Aquino, Iure Borges de Moura Aquino. II. Sousa, Wladymyr Jefferson Bacalhau de. III. Título.

CDU 628.4.032(043)

ALINE ARRUDA BARRETO

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS ELEMENTOS QUÍMICOS
PRESENTES EM MEMÓRIAS RAM**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós – Graduação do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, pertencente à linha de pesquisa em Mineração Urbana e área de concentração em Exploração Mineral, como requisito para obtenção do título de Mestra em Exploração Petrolífera e Mineral.

Aprovada em: 28/07/2023

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Iure Borges de Moura Aquino
Orientador – UAMG – UFCG

Prof. Dr. Wladymyr Jefferson Bacalhau de Sousa
Coorientador – CERTBIO – UFCG

Prof. Dr. Ademar Virgolino da Silva Netto
Avaliador Externo – CEAR – UFPB

Profa. Dra. Albaniza Alves Tavares
Avaliadora Externa – CERTBIO - UFCG

Campina Grande – PB
2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EXP. PETROLIFERA E MINERACAO
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitário, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM EXPLORAÇÃO
PETROLÍFERA E MINERAL, REALIZADA EM 28 DE JULHO DE 2023

CANDIDATA: **ALINE ARRUDA BARRETO**

COMISSÃO EXAMINADORA:

Presidente da Comissão e orientador: Prof. Dr. Iure Borges de Moura Aquino -
CPF: 351.980.048 - 98

Coorientador: Prof. Dr. Wladymyr Jefferson Bacalhau de Sousa - CPF: 012.221.304-16

Membro Interno: Profa. Dra. Albaniza Alves Tavares - CPF: 056.844.834-02

Membro Externo: Prof. Dr. Ademar Virgolino da Silva Netto - CPF: 049.017.344-66

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS
COMPONENTES DA MEMÓRIA RAM.

HORA DE INÍCIO: 15:00h

LOCAL: Sala Virtual na plataforma *Google Meet*.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 50 minutos, a candidata foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização, no tema de sua dissertação, obtendo conceito **APROVADA**. Face à aprovação, declara a presidente da Comissão achar-se a examinada legalmente habilitada a receber o Grau de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral, cabendo a Universidade Federal de Campina Grande, como de direito, providenciar a expedição do Diploma, a que a mesma faz jus. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por mim, CARLOS MARIO ECHEVERRI MISAS, coordenador do PPGEPM.

Campina Grande, 15 de agosto de 2023.

Recomendações:

DR. CARLOS MARIO ECHEVERRI MISAS

Coordenador

DR. IURE BORGES DE MOURA AQUINO

Presidente da Comissão e Orientador

DR. WLADYMYR JEFFERSON BACALHAU DE SOUSA

Coorientador

DRA. ALBANIZA ALVES TAVARES

Examinador Interno

DR. ADEMAR VIRGOLINO DA SILVA NETTO

Examinador Externo

ALINE ARRUDA BARRETO

Candidata

2 - APROVAÇÃO

2.1. Segue a presente Ata de Defesa de Tese de Mestrado da candidata **Aline Arruda Barreto**, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.

2.2. No caso de examinadores externos que não possuam credenciamento de usuário externo ativo no SEI, para igual assinatura eletrônica, os examinadores internos signatários certificam que os examinadores externos acima identificados participaram da defesa da tese e tomaram conhecimento do teor deste documento



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS MARIO ECHEVERRI MISAS, COORDENADOR(A)**, em 15/08/2023, às 09:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **IURE BORGES DE MOURA AQUINO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/08/2023, às 09:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aline Arruda Barreto, Usuário Externo**, em 15/08/2023, às 11:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wladymyr Jefferson Bacalhau de Sousa, Usuário Externo**, em 15/08/2023, às 12:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Albaniza Alves Tavares, Usuário Externo**, em 15/08/2023, às 13:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ademar Virgolino da Silva Netto, Usuário Externo**, em 15/08/2023, às 14:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **3698972** e o código CRC **74388277**.

*Dedico este trabalho aos meus queridos pais,
Eurilene e Marco Antonio,
com todo meu amor e gratidão.*

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por tantas bênçãos a mim concedidas, e a Nossa Senhora por sempre ser minha intercessora e por sempre passar na frente em tudo e em todos os momentos da minha vida!

Aos meus pais, Eurilene do Socorro e Marco Antonio, por tantos ensinados, sempre sendo referências na minha vida em todos os sentidos, e por todo o apoio aos meus sonhos, nunca me deixando desistir, em hipótese nenhuma, de nada. Qualquer forma de agradecimento seria incapaz de demonstrar o quanto vocês significam para mim, todo o amor do mundo não seria suficiente para descrever o meu sentimento!

Aos meus avós maternos, Eunice e Espedito, por toda a ajuda durante meus estudos, e por sempre estarem presentes em todos os momentos da minha vida, tanto pessoal como acadêmica. Aos meus avós paternos, Josefa Cecília (*In Memoriam*) e Manoel (*In Memoriam*) que cuidam de mim do Céu.

Aos meus familiares, em especial às minhas tias, Eloisa (*In Memoriam*), Emiriam e Maria (*In Memoriam*), por tanto amor, carinho e cuidado comigo, a vocês todo o meu amor, que são verdadeiros anjos na minha vida.

Aos meus padrinhos, Heloísa e José Holgacio, minha eterna gratidão por tanto cuidado, amor, carinho e atenção comigo. Vocês são verdadeiros presentes de Deus na minha vida!

Ao meu orientador prof. Dr. Iure Aquino, por ter me acompanhado e instruído desde o início desse projeto, com muita paciência, sempre muito prestativo e atencioso, que sem dúvidas, foi fundamental para a conclusão desta dissertação, ao senhor, minha eterna gratidão.

Ao meu coorientador prof. Dr. Wladymyr Bacalhau, por tantos ensinamentos, conselhos, pela paciência e amizade. Não existem palavras para agradecer tamanha cooperação!

Agradeço ao Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste (CERTBIO – UFCG) pela viabilização das análises químicas e todos os ensaios que foram necessários para que minha pesquisa fosse executada com êxito, assim como ao Laboratório de Análises Mineraias (LAM – UFCG) e ao Laboratório Especializado em Caracterização e Tratamento de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (LECTRE³ – UFCG), por toda a cooperação para que fosse feito todo o processo necessário para a preparação das amostras.

Aos meus amigos de longas datas, que me deram apoio durante essa jornada e aos amigos que ganhei durante a graduação e principalmente, na pós-graduação, sei o quanto fiquei ausente em muitos momentos, meu muito obrigada pela paciência, amizade e principalmente,

pelo carinho. Obrigada por terem me ajudado a ser quem eu sou hoje, aprendendo a cada novo dia, dando um passo de cada vez.

Aos meus professores da Graduação e da Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral – PPGEPM, aos funcionários da Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia (UAMG – UFCG) e do Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste (CERTBIO – UFCG), e em especial a profa. Dra. Elissandra Moura por sempre acreditar em mim desde o início da minha graduação, minha eterna gratidão por todos os conhecimentos a mim transmitidos e pelos inúmeros conselhos.

Meus sinceros agradecimentos à FAPESQ e CAPES, pelo financiamento do meu projeto de pesquisa, concedendo-me uma bolsa de mestrado, tornando possível e exequível a conclusão desse trabalho.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram com palavras de carinho, conselhos e principalmente com orações, tenham certeza de que foram de extrema importância. Minha eterna gratidão a cada um de vocês!

RESUMO

Nas últimas décadas, a sociedade moderna testemunhou avanços significativos, especialmente na área tecnológica, com o desenvolvimento de Equipamentos Eletroeletrônicos. No entanto, esse progresso trouxe consigo uma nova categoria de resíduos - os Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) - que resultam do descarte de dispositivos eletrônicos, como computadores (uma das principais fontes de REEE), *notebooks*, celulares e *smartphones*. Esses resíduos emergiram como um desafio crescente no cotidiano moderno, impulsionados por seu aumento exponencial e agravados pelo descarte inadequado, que pode acarretar sérios riscos para a saúde humana e o meio ambiente. As memórias RAM, que são um tipo de Placa de Circuito Impresso, compreendem uma mistura de polímeros, cerâmicos e metais. Essa composição inclui elementos valiosos como Cobre (Cu), Prata (Ag), Ouro (Au) e Paládio (Pd), entre outros metais preciosos. Como resultado, surgiu a necessidade de pesquisar métodos para reciclar esses resíduos, a fim de permitir a reutilização desses materiais sem causar danos ambientais. Diante dessa problemática, o objetivo deste estudo foi conduzir uma Caracterização Tecnológica de memórias RAM retiradas de computadores inoperantes na Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. É importante ressaltar que este trabalho pioneiro em nível nacional servirá de base para futuros estudos na área de Mineração Urbana. O processo teve início com a desmontagem, separação e pesagem dos componentes dos gabinetes. Em seguida, foram aplicados procedimentos como Cominuição e Separação Granulométrica através de conjuntos de peneiras. Estes foram seguidos por processos de Separação Magnética, que visaram obter uma fração concentrada de metais (principalmente Cobre, Ouro, Ferro e Prata) e outra fração contendo polímeros e cerâmicos. Por meio destes passos, foram realizadas análises utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por Energia Dispersiva (MEV-EDS), Difração de Raio-X (DRX) e Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios-X (EDX), permitindo a qualificação e quantificação dos componentes nas memórias RAM estudadas. Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade técnica da pesquisa. As análises de MEV-EDS, DRX e EDX revelaram, de maneira geral, resultados positivos, com a presença de elementos como Cobre, Ouro, Ferro, Nióbio e outros nas amostras Magnéticas e Não-Magnéticas. A pesquisa obteve êxito na identificação e quantificação dos elementos químicos presentes nas memórias RAM, revelando sua viabilidade. Além disso, a redução das memórias RAM foi realizada com sucesso, gerando amostras Magnéticas e Não-Magnéticas. A pesquisa destacou os principais elementos químicos presentes nas memórias RAM, como Bromo, Bário, Cobre, Cálcio, Estanho, Ferro, Silício, Arsênio, Chumbo e Níquel. Por fim, concluiu-se que os principais metais com potencial econômico foram identificados, como Ouro, Ferro, Paládio, Cobre e Prata, demonstrando sua viabilidade social e ambiental, uma vez que a reciclagem desses materiais evitaria a exploração dos recursos naturais e o descarte inadequado dos REEE.

Palavras Chaves: Memória RAM; Resíduos Eletroeletrônicos; Reciclagem; Mineração Urbana; Caracterização Tecnológica.

ABSTRACT

Over the past few decades, modern society has witnessed significant advancements, particularly in the technological realm, with the development of Electro-Electronic Equipment. However, this progress has brought about a new category of waste - Electronic and Electrical Equipment Waste (e-Waste) - stemming from the disposal of electronic devices such as computers (one of the primary sources of EEEW), notebooks, cell phones, and smartphones. These wastes have emerged as a growing challenge in modern daily life, driven by their exponential increase and exacerbated by improper disposal, which can pose serious risks to human health and the environment. Random Access Memory (RAM) modules, a type of Printed Circuit Board (PCB), consist of a mixture of polymers, ceramics, and metals. This composition includes valuable elements such as Copper (Cu), Silver (Ag), Gold (Au), and Palladium (Pd), among other precious metals. As a result, the need to research methods for recycling this waste has arisen, to enable the reuse of these materials without causing environmental harm. Given this issue, the objective of this study was to conduct a Technological Characterization of RAM modules extracted from non-operational computers at the Federal University of Campina Grande - UFCG. It's important to highlight that this pioneering work at the national level will serve as a foundation for future studies in the field of Urban Mining. The process commenced with disassembling, separating, and weighing the cabinet components. Subsequent steps included Comminution and Granulometric Separation using sets of sieves. These were followed by Magnetic Separation processes, aimed at obtaining a concentrated fraction of metals (mainly Copper, Gold, Iron, and Silver) and another fraction containing polymers and ceramics. Through these steps, analyses were conducted using Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS), X-ray Diffraction (XRD), and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX), enabling the qualification and quantification of components in the studied RAM modules. The obtained results demonstrated the technical feasibility of the research. The SEM-EDS, XRD, and EDX analyses, on the whole, revealed positive outcomes, with the presence of elements such as Copper, Gold, Iron, Niobium, and others in both Magnetic and Non-Magnetic samples. The study succeeded in identifying and quantifying the chemical elements present in the RAM modules, revealing their viability. Additionally, the reduction of RAM modules was successfully executed, resulting in Magnetic and Non-Magnetic samples. The research highlighted the key chemical elements present in the RAM modules, including Bromine, Barium, Copper, Calcium, Tin, Iron, Silicon, Arsenic, Lead, and Nickel. Finally, it was concluded that the main metals with economic potential have been identified, such as Gold, Iron, Palladium, Copper, and Silver, demonstrating their social and environmental viability, since the recycling of these materials would avoid the exploitation of natural resources and the improper disposal of e-Waste.

Key Words: RAM Memory; Electronic Waste; Recycling; Urban Mining; Technological Characterization.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condicionantes para implantação de tecnologias de reciclagem.	19
Tabela 2 – Porcentagem de metal encontrado em média nos minérios e nas placas de circuito impresso.	36
Tabela 3 – Composição e os valores dos metais presentes em placas de circuito impresso de um modo genérico.	37
Tabela 4 – Balanço de massa das memórias RAM após cominuição.	50
Tabela 5 – Quantificação de peso total e em porcentagem dos computadores inoperantes da UFCG.	52
Tabela 6 – Descrição das amostras referentes a memória RAM triturada.	55
Tabela 7 – Pesagem após a Separação Magnética.	77
Tabela 8 – Resumo das pesagens dos materiais magnético e não-magnético após a separação magnética.	78
Tabela 9 - Descrição das amostras analisadas referentes a memória RAM.	78
Tabela 10 - Elementos Químicos presentes nas Memórias RAM.	80
Tabela 11 - Os dez principais elementos químicos presentes na memória RAM.	82
Tabela 12 - Os principais metais presentes na memória RAM.	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Memórias RAM.....	14
Figura 2 – Intervenção da mineração urbana no ciclo de transformação da natureza..	23
Figura 3 - Esquema ilustrativo da Lei de Bragg..	32
Figura 4 – Local de armazenamento dos resíduos eletroeletrônicos da UFCG.....	39
Figura 5 – Computadores obsoletos armazenamento na UFCG.....	40
Figura 6 – Gabinetes de computadores recolhidos para desmontagem e pesagem..	40
Figura 7 – Desmontagem e separação dos macros componentes.	41
Figura 8 – Gabinete desmontado e seus macros componentes separados.	41
Figura 9 – Pesagem inicial de um gabinete.	42
Figura 10 – Fluxograma demonstrando as operações iniciais..	42
Figura 11 - Triturador picador forrageiro adaptado.....	43
Figura 12– Conjunto de peneiras e o agitador eletromagnético.	44
Figura 13 - Equipamento de MEV-EDS modelo TM–1000.....	45
Figura 14 - Difratômetro de raios-X.	46
Figura 15 - Separador Magnético de Tambor.	47
Figura 16 - Amostras solubilizadas em Hidróxido de Sódio (NaOH) em porcentagens de 5%, 10% e 20%.....	48
Figura 17 - Amostra 1: Material não-magnético com o retido a 325 <i>mesh</i> ; Amostra 2: Mistura do material magnético e não-magnético retido a 100 <i>mesh</i> ; Amostra 3: Material magnético retido na peneira de 325 <i>mesh</i>	49
Figura 18 – Fluxograma da Memória RAM.	51
Figura 19 – Pesagem dos componentes dos gabinetes obsoletos..	53
Figura 20 - Material utilizado - Amostra 1: 7 <i>mesh</i> ; Amostra 2: 48 <i>mesh</i> ; Amostra 3: 325 <i>mesh</i> ; Amostra 4: Passante 325 <i>mesh</i> ..	53
Figura 21 - Amostras analisadas no CERTBIO - UFCG.....	54
Figura 22 – Imagens de MEV referentes a Amostra 1.....	56
Figura 23 – Imagens de MEV referentes a Amostra 2.....	57
Figura 24 – Imagens de MEV referentes a Amostra 3.....	58
Figura 25 – Imagens de MEV referentes a Amostra 4.....	59
Figura 26– EDS geral referente a Amostra 1 com magnificação de 1000x.....	60
Figura 27– EDS geral referente a Amostra 2 com magnificação de 1000x.....	60
Figura 28 – EDS geral referente a Amostra 3 com magnificação de 1000x.....	61

Figura 29 – EDS geral referente a Amostra 4 com magnificação de 1000x.....	61
Figura 30 – Difratoograma referente ao DRX da amostra 1.....	63
Figura 31 – Resultados obtidos através das análises de DRX no <i>software Crystallographica Search–Match</i> para a amostra 1.....	65
Figura 32 – Difratoograma representando os principais picos e seus respectivos elementos químicos da amostra 1.....	66
Figura 33 – Difratoograma referente ao DRX da Amostra 2.....	67
Figura 34 – Resultados obtidos através das análises de DRX no <i>software Crystallographica Search–Match</i> para a amostra 2.....	68
Figura 35 – Difratoograma referente ao DRX da Amostra 3.....	69
Figura 36 – Resultados obtidos através das análises de DRX no <i>software Crystallographica Search–Match</i> para a amostra 3.....	71
Figura 37 – Difratoograma representando os principais picos e seus respectivos elementos químicos da amostra 3.....	72
Figura 38 – Difratoograma referente ao DRX da Amostra 4.....	73
Figura 39 – Resultados obtidos através das análises de DRX no <i>software Crystallographica Search–Match</i> para a amostra 4.....	75
Figura 40 – Difratoograma representando os principais picos e seus respectivos elementos químicos da amostra 4.....	76

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABREE – Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos
- BSE – Elétrons Retroespalhados (*backscattering electrons*)
- CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
- CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
- CERTBIO – Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste
- DDR – Double Data Rate (Taxa de Transferência Dobrada)
- DRX – Difração de raios-X
- EDS – Espectroscopia por energia dispersiva
- EDX – Espectroscopia de raios-X por Energia Dispersiva
- e-Waste – Mundialmente conhecido como *electronic waste* ou resíduo eletroeletrônico
- FAPESQ – Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba
- FM – Fração Magnética
- FNM – Fração Não Magnética
- IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
- ICDD – *International Center for Diffraction Data*
- ICMS – Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços
- IFPB – Instituto Federal da Paraíba
- IFRN – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
- LAM – Laboratório de Análises Mineraias
- LECTRE³ – Laboratório Especializado em Caracterização e Tratamento de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos
- MMA – Ministério do Meio Ambiente
- MET – Microscopia Eletrônica de Varredura de Transmissão
- MEV – Microscopia eletrônica de varredura
- MTR – Manifestos de Transporte de Resíduos
- ONU – Organização das Nações Unidas
- PCI – Placas de Circuito Impresso
- PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos, mediante a Lei número 12.305/10 (2010)
- REEE – Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos
- SE – Elétrons Secundários (*secondary electrons*)
- SEM – Microscopia Eletrônica de Varredura em Ambiente

SINIR – Sistema Nacional de Informações de Resíduos

SISNAMA – Sistema Nacional do Meio Ambiente

STEM – Microscopia Eletrônica de Varredura de Refração

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1.	Objetivo Geral	12
2.2.	Objetivos Específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1.	Memória de Acesso Aleatório (<i>Random Access Memory</i>) – Memória RAM	13
3.2.	Definição Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos – REEE	14
3.3.	Legislação Federal Pertinente – Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos	16
3.4.	A realidade dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos no Brasil	22
3.5.	Metodologias para Caracterização Tecnológica de Memória RAM	23
3.5.1	Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	25
3.5.2	Sistema de Dispersão de Energia (<i>Energy Dispersive System</i>) – EDS	29
3.5.3	Difração de Raios-X – DRX	31
3.5.4	Espectroscopia de raios-X por Energia Dispersiva – EDX	33
3.6.	Caracterização dos componentes presentes na Memória RAM	35
3.7.	Valoração econômica dos elementos químicos	38
4	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1.	Coleta dos REEE	39
4.2.	Cominuição das memórias RAM	43
4.3.	Peneiramento do material cominuído	44
4.4.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) – MEV-EDS	45
4.5.	Difração de Raios-X – DRX	46
4.6.	Separação Magnética	46
4.7.	Análises químicas após a Separação Magnética	47
4.8.	Espectroscopia de raios-X por Energia Dispersiva – EDX	48
5	RESULTADOS	50
5.1.	Desmontagem dos Gabinetes	52
5.2.	Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	53
5.3.	Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X – EDS	59
5.4.	Difração de Raios X – DRX	62

5.5.	Separação Magnética	76
5.6.	Espectroscopia de raios-X por Energia Dispersiva – EDX	78
5.7.	Dados Compilados.....	81
6	CONCLUSÕES	84
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	87
8	BIBLIOGRAFIA	88

1 INTRODUÇÃO

O ser humano sempre utilizou os recursos naturais de forma inconsciente e sem planejamento prévio, e ao passar dos anos gerou-se uma grande quantidade de rejeitos e/ou resíduos com pouca ou mesmo nenhuma preocupação sobre sua reciclagem. O rápido e acelerado consumo impulsionado pela tecnologia provocou impactos consideráveis tanto na esfera social quanto no meio ambiente (NICOLAI, 2016; CAMPOS *et al.*, 2020).

De acordo com Hayne e Wyse (2018), a evolução tecnológica das últimas décadas é expressiva, proporcionando uma melhoria na conectividade, agilidade e facilidade de troca de informações. Além disso, há um aumento notável na busca e desenvolvimento de novas tecnologias, o que resulta em equipamentos tornarem-se obsoletos em curtos períodos (FRANCISCO Jr. *et al.*, 2021). Isso leva a um aumento na procura por novos equipamentos e, consequentemente, gera uma quantidade residual de resíduos eletroeletrônicos.

A estimativa anual é que cerca de 40 milhões de toneladas de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos são gerados, dos quais apenas 3% possuem destinação correta. O objetivo do Ministério do Meio Ambiente, é que o Brasil alcance até 2025, pelo menos, a taxa de 17% de reciclagem de eletroeletrônicos que devem ser coletados em mais de cinco mil pontos espalhados em 400 municípios (BRASIL, 2020; SZIGETHY; ANTENOR, 2020).

Estima-se que cerca de 50% dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos têm em sua composição metais essenciais, o que aguça o interesse na área da reciclagem e com isso, ocorre a diminuição dos custos na produção final. Empresas de países como Suécia, Noruega e do Reino Unido, que possuem embargos menores e capital de investimento maior investem cada vez mais nesse novo nicho do mercado (AFONSO, 2018; DACOREGIO, 2018).

Segundo B. Ghosh *et al.* (2015), com o avanço acelerado da tecnologia, é importante garantir a disponibilidade de materiais essenciais para a produção de diversos dispositivos eletrônicos, como smartphones, computadores, entre outros. Isso se torna uma preocupação cada vez mais importante devido ao crescente consumo de matérias-primas e ao impacto ambiental negativo causado pela herança desses materiais.

Nesse contexto, a reciclagem é vista como uma solução eficiente e ambientalmente responsável para obter metais preciosos, como prata, ouro e cobre, a partir de dispositivos eletrônicos que já foram descartados. Além de garantir a disponibilidade de materiais essenciais para a fabricação de novos produtos, a reciclagem também ajuda a reduzir o impacto ambiental negativo causado pela geração desses materiais. Portanto, a reciclagem é uma solução crucial

para equilibrar a necessidade tecnológica e o bem-estar ambiental (ABRAMOVAY; SPERANZA; PETITGAND, 2013; CUNHA; AUGUSTIN, 2014).

No Brasil, a questão da regulamentação da reciclagem de resíduos sólidos é debatida há vários anos. Contudo, somente em agosto de 2010, foi publicada a Lei Federal nº 12.305/2010, conhecida como a Lei da Política Nacional dos Resíduos Sólidos – PNRS, estabelecendo a logística reversa, que torna fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de eletroeletrônicos responsáveis por recolher e destinar adequadamente esses resíduos (EL-DEIR, 2014; SOLIANI; KUMSCHLIES; SCHALCH, 2018).

Infelizmente, mesmo com a implementação da lei, o descarte inadequado de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) ainda é um problema persistente devido à falta de informação da população. Além disso, é possível afirmar que as empresas fabricantes de tecnologias são as principais causadoras desses problemas ambientais (BOSQUESI; FERREIRA, 2018).

Mediante ao exposto, o presente trabalho teve como objetivo realizar a caracterização tecnológica, ou seja, foi realizado análises químicas quali-quantitativas dos elementos químicos presentes nas memórias RAM que foram retiradas dos computadores inoperantes da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, tendo em vista que a sua composição não se encontrava detalhada em outros trabalhos pré-existentes, além do fato das memórias RAM possuírem um alto valor de mercado.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho consistiu em realizar a caracterização tecnológica qualitativa e quantitativa dos elementos químicos presentes nas memórias RAM.

2.2. Objetivos Específicos

- Realizar o levantamento da legislação e políticas públicas direcionadas para Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE);
- Identificar os elementos químicos presentes nas memórias RAM;
- Quantificar os elementos químicos presentes nas memórias RAM.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Memória de Acesso Aleatório (*Random Access Memory*) – Memória RAM

A memória RAM (*Random Access Memory*) é um tipo de memória volátil utilizada em computadores para armazenar dados temporariamente enquanto o computador é utilizado. A RAM permite que o sistema operacional, os programas e os dados sejam acessados rapidamente pelo processador. Quando o computador é desligado, os dados armazenados na RAM são perdidos (ALECRIM, 2011; SOUZA, 2011).

A quantidade de RAM em um computador é uma das principais considerações na escolha de *hardware* para desempenho e capacidade de multitarefa. Quanto mais RAM um computador tiver, mais programas ele será capaz de executar ao mesmo tempo sem sofrer lentidão (STALLINGS, 2017).

A tecnologia de memória RAM está constantemente evoluindo, com novas versões sendo lançadas com maior velocidade e largura de banda, podendo citar como tipos de RAM: DDR (*Double Data Rate*), DDR2, DDR3 e DDR4. Por exemplo, a DDR4, é uma versão mais recente da DDR que oferece uma largura de banda significativamente maior e consome menos energia. E a velocidade e largura de banda da RAM também são importantes para o desempenho do computador (CADENELLI *et al.*, 2019).

Além disso, a RAM também está sendo utilizada em outros dispositivos além de computadores, como *smartphones* e *tablets*, onde é igualmente importante para a velocidade e desempenho geral do dispositivo, pois a memória RAM é uma parte vital do *hardware* de um computador. E a demanda por memórias RAM de alto desempenho está aumentando com a crescente demanda por computação em nuvem e inteligência artificial (SIQUEIRA *et al.*, 2016; MACEDO *et al.*, 2018; BANDEIRA, 2022).

Em resumo, a memória RAM (Figura 1) é uma parte crítica de qualquer sistema computacional moderno, e sua importância para o desempenho e capacidade de multitarefa está aumentando com as tendências da tecnologia. Ela é composta por *chips* de memória RAM, controladores de memória, dissipadores de calor e outros componentes que trabalham juntos para fornecer ao processador acesso rápido à memória para que ele possa executar tarefas com eficiência (STALLINGS, 2017; BARBOSA, 2018).

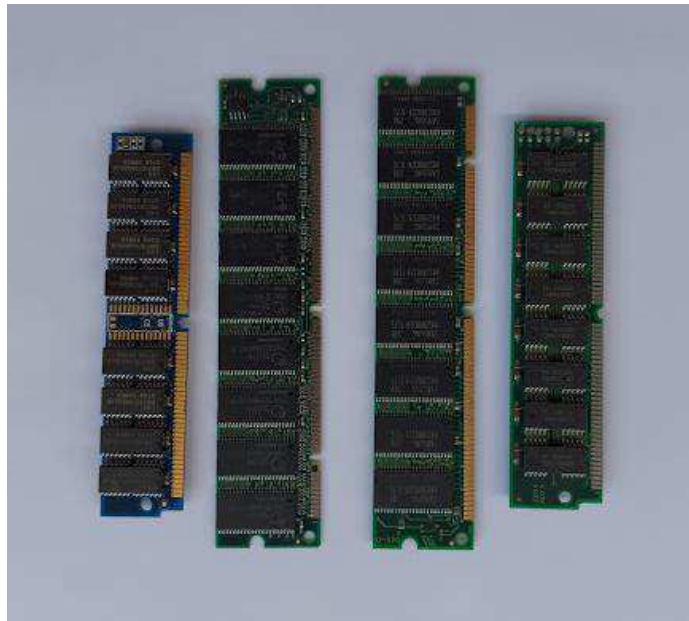


Figura 1– Memórias RAM. (Dados da pesquisa, 2021).

3.2. Definição Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos – REEE

O resíduo eletrônico é proveniente do descarte de aparelhos eletrônicos, como por exemplo, computadores, *notebooks*, televisões, celulares, *smartphones*, baterias, entre outros. Ao longo dos anos a sociedade moderna passou por diversos avanços, principalmente no setor tecnológico com o desenvolvimento vários equipamentos eletrônicos, mas este avanço é responsável pela geração de um novo tipo de resíduo sólido, que é conhecido como os Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos – REEE (SANTOS, 2016; SANTANA; MARQUES, 2017).

Os Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), por sua vez, são um grande problema ambiental e socioeconômico, pois os equipamentos eletroeletrônicos rapidamente se tornam obsoletos e são descartados em grandes quantidades. De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), a produção global de REEE ultrapassou a marca de 50 milhões de toneladas por ano, com uma taxa de crescimento anual de 3 a 5%, na qual, grande parte, não é descartado corretamente, gerando um desperdício de cerca de US\$ 1,7 bilhão ao ano (NASCIMENTO *et al.*, 2018; LOURENÇO, 2019).

Com o avanço das inovações tecnológicas, é natural que os aparelhos e dispositivos eletrônicos fiquem ultrapassados em menores espaços de tempo. Esta rápida obsolescência gera um acúmulo em excesso de resíduo eletroeletrônico, tornando as empresas produtoras, as principais responsáveis por este problema ambiental. O Brasil se encontra no 5º lugar no ranking mundial de maiores produtores de resíduo eletrônico e o 1º lugar na América Latina, na qual produz anualmente cerca de 2,5 milhões de toneladas, e desse montante é coletado para

ser reciclado ou descartado de maneira adequada cerca de 3% (BALDÉ *et al.*, 2017; GREEN ELECTRON, 2021).

O resíduo eletroeletrônico contém mais de 100 componentes diferentes, das quais inúmeros são tóxicos e cancerígenos, como por exemplo: os metais pesados, halogênicos, que são perigosos para o meio ambiente e os seres humanos, caso não tenham o tratamento adequado ou não sejam reciclados de modo ambientalmente correto. Além de metais ferrosos e não-ferrosos, polímeros, vidros, cerâmicos, entre outros, sendo o ferro (Fe) e o aço correspondendo à 50% do resíduo, seguidos por 21% de polímeros, 13% de metais não-ferrosos, dentre outros constituintes. Os metais não-ferrosos consistem em metais nobres como o cobre (Cu) e o alumínio (Al) e metais preciosos como a prata (Ag), platina (Pt), paládio (Pd), ouro (Au) e outros, que são elementos economicamente viáveis e importantes. A presença de elementos como o chumbo (Pb), o mercúrio (Hg), o arsênio (As), o cádmio (Cd), o selênio (Se), o cromo (Cr) e retardantes de chamas, além da quantidade limite, classificam o resíduo eletrônico como um resíduo perigoso. Portanto, se a descontaminação é necessária de um ponto de vista, de outro, é necessário reciclar os elementos de cunho precioso envolvidos nesse sistema, pois muitos REEE são ricos em metais preciosos e elementos químicos, que são desperdiçados se não forem recuperados e reutilizados (NICOLAI, 2016; RAJOVIC, 2016; CALDAS *et al.*, 2019).

A gestão dos resíduos eletroeletrônicos, de modo geral, constitui-se em um problema emergente da sociedade atual, e as projeções indicam que em 2050 o número de pessoas vivendo em ambientes urbanos será extremamente elevado, o que tornará ainda mais complicado os desafios relativos à disposição dos resíduos. Conseqüentemente, o consumismo será elevado, dirigidos pelo avanço tecnológico e o acúmulo contínuo dos resíduos eletroeletrônicos no decorrer do tempo aumenta seu volume e a forma de disposição final desses resíduos é inadequada (SANTANA; JÚNIOR; EL-DEIR, 2020).

Uma notícia positiva é que a maioria dos REEE podem ser reciclados e reutilizados. A Mineração Urbana é uma técnica crescente que busca recuperar materiais valiosos a partir de resíduos pós-consumo, incluindo REEE. A reciclagem de REEE pode ajudar a preservar os recursos naturais, reduzir a poluição do ar e da água, e diminuir a quantidade de resíduos que precisam ser armazenados em aterros sanitários. Além de gerar novos empregos em setores como a reciclagem, a reutilização, a logística e o transporte, podendo criar também mercados para os materiais recuperados, que geram impactos positivos na economia (PEREIRA, 2018; XAVIER *et al.*, 2023).

No entanto, a gestão de REEE ainda é um desafio global, pois existe uma falta de infraestrutura adequada e de regulamentações eficazes em muitos países. Além disso, muitos REEE são exportados para países com regulamentações mais brandas ou para aterros sanitários em países em desenvolvimento, o que pode prejudicar gravemente o meio ambiente e a saúde humana (DEMAJOROVIC; AUGUSTO; SOUZA, 2016; SILVA; CAPANEMA, 2019).

Segundo Cunha, Bozelli e Leal (2015), a crescente preocupação com o meio ambiente de modo geral e com a questão da saúde pública em particular relacionada a resíduos sólidos indica que políticas sociais com a finalidade de tratar desses temas tendem a ser cada vez mais solicitadas. Além disso, sabe-se que para uma mudança para uma sociedade mais sustentável exige, necessariamente, um refino na gestão dos resíduos, e de acordo com esta perspectiva, a gestão dos resíduos nas cidades assume a escala de um desafio social e ambiental.

Resumidamente, conforme descrito por Castro *et al.* (2020), os resíduos eletroeletrônicos têm sido percebidos como um "problema" para algumas pessoas, no entanto, eles representam a solução para uma série de questões. Isso porque o descarte inadequado resulta em perdas econômicas para a população e para o meio ambiente, que acaba sendo explorado novamente para a obtenção de matéria-prima. Essa situação pode ser revertida através da aplicação da logística reversa, onde a implementação de políticas públicas e regulamentações eficazes se tornam fundamentais para assegurar a coleta correta, transporte e processamento adequado dos resíduos eletroeletrônicos.

3.3. Legislação Federal Pertinente – Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos

A partir da publicação da lei 12.305 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), à qual foi promulgada em 02 de agosto de 2010, reunindo um conjunto de princípios, diretrizes, objetivos, instrumentos, metas e ações, para serem adotadas pela União, isoladamente ou em parceria com os estados, municípios e os entes privados. Tem como seu objetivo construir uma gestão integrada dos resíduos sólidos, ambientalmente adequada (GOMES *et al.*, 2014).

A logística reversa é definida como um procedimento que viabiliza a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento ou para destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010). Ela deve ser iniciada pelas empresas a fim de diminuir o impacto ambiental. Para que isso ocorra, as empresas devem proporcionar meios aos clientes, para que os mesmos possam devolver seus produtos obsoletos. Além disso, campanhas

de educação ambiental devem ser veiculadas para que a logística reversa se torne eficaz (BARRETO; BARATA, 2018).

A Lei 12.305 de 2010 é considerada um marco histórico na gestão ambiental do Brasil, a PNRS apresenta uma visão progressista no combate a um dos maiores problemas do mundo atual que são os REEE. Tendo como um dos princípios a responsabilidade compartilhada entre governo, empresas e população, a nova legislação impulsiona o retorno dos materiais descartados às indústrias após o consumo, por meio da logística reversa, além de obrigar o poder público municipal a elaborar, implementar e executar planos para o gerenciamento desses resíduos (MAIELLO; BRITTO; VALLE, 2018).

Antes da Lei 12.305 de 2010, quando um consumidor descartava algum produto em um local inadequado, não era destinado de quem seria a responsabilidade. Após a implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, essa responsabilidade passou a ser dividida entre os diversos participantes da cadeia, já que é determinada a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Essa análise do ciclo de vida de um item compreende todo o processo do produto, desde a extração da matéria-prima, produção, consumo até o descarte final. A responsabilidade sobre o produto cabe aos comerciantes, fabricantes, importadores, distribuidores, cidadãos e titulares de serviços de manejo dos resíduos sólidos urbanos na logística reversa (BRASIL, 2010).

De modo geral a Lei nº 12.305 de 2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, tem os objetivos subdivididos em 15 pontos, sendo eles:

1. A proteção da saúde pública e qualidade ambiental;
2. Não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento de resíduos sólidos e destinação final ambientalmente adequada de resíduos;
3. Incentivar padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços;
4. Adotar, desenvolver e aprimorar tecnologias limpas para minimizar o impacto ambiental;
5. Reduzir o volume e perigo de resíduos perigosos;
6. Incentivar a indústria de reciclagem a promover o uso de matérias-primas provenientes de insumos de materiais reciclados;
7. Gestão integral de resíduos sólidos;
8. Articulação entre as diversas esferas do poder público, e entre essas esferas e o setor empresarial, com vistas ao desenvolvimento de cooperação técnica e financeira para a gestão integrada de resíduos sólidos;

9. Formação técnica contínua na área dos resíduos sólidos;
10. Regularidade, continuidade, funcionalidade e universalidade na prestação dos serviços públicos de limpeza urbana e gestão de resíduos sólidos, empregando mecanismos administrativos e econômicos que assegurem a recuperação do custo dos serviços prestados, como forma de garantir o seu funcionamento e sustentabilidade financeira.
11. Priorizar as aquisições e contratações governamentais, para:
 - a) produtos reciclados e produtos recicláveis;
 - b) bens, serviços e obras que atendam aos critérios de padrões de consumo social e ambientalmente sustentáveis;
12. Incluir catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis em ações de responsabilidade compartilhada ao longo do ciclo de vida do produto;
13. Estimular a implementação da avaliação do ciclo de vida do produto;
14. Incentivar o desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e reaproveitamento de resíduos sólidos, incluindo aproveitamento e aproveitamento energético;
15. Incentivar a rotulagem ambiental e o consumo sustentável.

Para que seja implantado uma tecnologia de reciclagem, tendo como base a logística reversa, torna-se necessário cumprir alguns requisitos para que o projeto seja viável (Tabela 1), as quais são listadas as características, descrição e vantagens e os benefícios para a empresa.

Tabela 1 – Condicionantes para implantação de tecnologias de reciclagem.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIÇÃO E VANTAGENS	BENEFÍCIOS PARA A EMPRESA
Flexibilidade para tratar diferentes materiais	A tecnologia deve permitir ajustes operacionais, mantendo a qualidade do produto numa faixa pré-determinada.	Economicidade do processo, operação ajustável às características da alimentação.
Elevada taxa de reação	Deve apresentar recursos para intensificar a reação dos reagentes, facilitar a homogeneização da mistura, permitindo o baixo consumo de insumos.	Baixo custo operacional, cinética de reação mais acelerada, menor consumo de energia e de insumos.
Design compacto, fácil montagem e adaptação	Deve ocupar menores espaços, permitir adaptações no circuito de modo que possa tratar diferentes materiais, gerando diferentes produtos mediante a adoção de ajustes relativamente simples.	Sistema versátil que pode ser rearranjado e apresentando baixo custo operacional.
Controle do processo	Deve apresentar e ter fácil controle a separação dos produtos sem comprometer a qualidade.	Obtenção de insumos dentro das necessidades de mercado.
Facilidade de <i>start up</i>	Equipamentos com eficiência comprovada, de fácil operação e manutenção.	Tempo mínimo de parada para operação, manutenção e revisão.

Fonte: Adaptado de SANTOS, 2014.

A reciclagem de resíduos eletroeletrônicos, segundo Santos, 2014, pode gerar inúmeros benefícios, como:

- Diminuição do consumo dos recursos naturais não-renováveis, substituindo-os por resíduos reciclados, sendo um processo mais viável tanto financeiramente como ambientalmente;
- A redução do descarte incorreto de resíduos eletroeletrônicos, a partir das atividades de reciclagem, já que não haverá acúmulos de resíduos que tendem a contaminar a natureza de modo geral;

- Por fim, a redução de tempo de produção das matérias-primas, tendo em vista que o retorno dos elementos químicos a partir da reciclagem para a indústria é mais rápido e mais econômico.

Um dos impasses para estabelecer a logística reversa dos resíduos eletroeletrônicos está no Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), cobrado pelos estados na entrada e saída de mercadorias. Para a Agência Brasil, Zilda Veloso disse: *“Os estados não estariam reduzindo tributos, mas aplicando um imposto justo na entrada da comercialização. A não cobrança dos impostos sobre o resíduo descartado vai implicar em um preço mais justo para propiciar a reciclagem”*, explicando que a decisão depende de negociações com os estados. E outra questão em debate são os pontos de recolhimento, que de acordo com a classificação de resíduos, podem ser considerados locais de armazenamento de resíduo perigoso, portanto, sujeitos a licenciamento ambiental (VERDÉLIO, 2016).

Para que a Lei 12.305 de 2010 fosse executada com maior rigidez, foi promulgado decretos, e em 12 de fevereiro de 2020 foi assinado o decreto de nº 10.240 que estabelece normas para a implementação do sistema de logística reversa para produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e de seus componentes. O foco do decreto são os equipamentos de uso doméstico, exclusivamente utilizados por pessoas físicas. Ficando de fora os aparelhos de uso governamentais ou corporativos, o uso industrial e o uso comercial por pessoa jurídica (FERREIRA, 2020).

Um dos objetivos do decreto nº 10.240/2020 é a operacionalização do processo de logística reversa dos produtos eletroeletrônicos em que deverá obedecer às etapas de descarte de recebimento e armazenamento temporário, seguido do transporte dos produtos eletroeletrônicos descartados dos pontos de recebimento até os pontos de consolidação, se necessário; e por fim, a destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2020).

Em 12 de janeiro de 2022 foi assinado o decreto de nº 10.936 que estabeleceu normas, nas quais regulamentaram alguns pontos julgados importantes que ainda não haviam ficado claros nos regulamentos anteriores e que a partir desse ponto tornaram a nova legislação mais clara e objetiva. Como por exemplo, a centralização da gestão dos Sistemas de Logística Reversa pelo Ministério do Meio Ambiente, através do Programa Nacional de Logística Reversa (PNLR) é uma dessas regulamentações, assim como a implementação e a operacionalização do sistema de Logística Reversa, que podem ser adotados procedimentos de compra de produtos ou de embalagens usadas, como postos de entrega de produtos eletrônicos, além da obrigatoriedade de emissão de documentos ambientais e Manifestos de Transporte de

Resíduos (MTR) no Sistema Nacional de Informações de Resíduos (SINIR), pelos sistemas de Logística Reversa tanto coletivos, como individuais (PGE/MS, 2022; BRASIL, 2022).

De acordo com o decreto de nº 10.936/2022, as legislações vigentes em âmbito estadual e municipal devem estar condizentes com o regulamento federal, uma vez que os locais devem possuir metas compatíveis com o de maior abrangência. Podendo firmar termos de compromisso com os fabricantes, importadores, distribuidores ou comerciantes para o controle e fiscalização do atingimento das metas previstas em harmonia com as estabelecidas em acordo setorial ou regulamento vigente. Além das cooperativas de catadores que podem participar de Programas de Logística Reversa desde que sejam legalmente constituídas, em conformidade com a norma ABNT NBR 16.156/2013 (Decreto 10.240/2020), que devem estar cadastradas e habilitadas no SINIR (Art. 14, Art. 40 e Art. 42) (XAVIER *e. al.*, 2023).

Outro ponto em questão é em relação aos Importadores e Fabricantes, nas quais, eles têm que sinalizar nas Declarações de Importação (DI) quem é o responsável pelo sistema de Logística Reversa. E caso a importação do produto eletroeletrônico seja realizada por uma empresa terceirizada, essa deverá sinalizar em contrato quem é o responsável pela Logística Reversa, caso contrário, o importador será responsabilizado e as empresas que comercializam componentes não estão mais isentas de Logística Reversa (PGE/MS, 2022).

Com a promulgação do decreto nº 10.936/2022 foi substituído algumas legislações anteriores e trouxe consigo a ênfase na logística reversa. Com isso, foi criado o Programa Nacional de Logística Reversa, que é responsável por fazer com que todos os setores da economia insiram seus dados e os seus resultados em um sistema único e padronizado. Desse modo, o país tem acesso facilitado às informações para compreender como está o desenvolvimento da logística reversa nacional. Essa mudança é passível de desencadear melhorias tanto do cunho ambiental como social (BRASIL, 2022).

Segundo a ABREE, existem cerca de 3,4 mil pontos de coleta de eletroeletrônicos no Brasil. Após o acordo regulamentado em forma de decreto, prevê-se que esse número aumente para 5 mil pontos até 2025, abrangendo os 400 maiores municípios do país, com mais de 80 mil habitantes, e representam, no total, 60% da população brasileira, representando uma parcela muito significativa dos resíduos de eletroeletrônicos que temos no Brasil (VILELA, 2020; RECICLA SAMPA, 2022).

Por fim, sobre o tema de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) pode-se indiretamente citar a normativa da ABNT 16156, a instrução normativa 12/2013 do IBAMA e

o decreto 11.044/2022, que abordam o tema em partes, mas não sendo os seus principais focos, apenas tópicos nas normativas e no decreto citados anteriormente.

3.4. A realidade dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos no Brasil

Segundo Xavier *et al.* (2021), a mineração urbana é vista como uma alternativa ambientalmente viável, já que tem como uma das suas principais características minimizar ao máximo a existência e a permanência dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos em depósitos, aterros sanitários, entre outros, além de proporcionar a redução da demanda por minérios da mineração tradicional, conseqüentemente reduzindo os impactos no meio ambiente.

Ao seguir para o final do processo da mineração tradicional, encontra-se os produtos industrializados que contêm em sua composição as substâncias originadas provenientes dos minérios extraídos. Dessa maneira, torna-se muito importante levar em consideração as relações básicas entre oferta *vs* demanda, na qual, em teoria, existe uma relação inversamente proporcional entre as mesmas que determinam a variação do preço final das matérias-primas e conseqüentemente dos produtos. Com a evolução da ciência, surgimento de novas tecnologias incorporadas aos processos produtivos e o crescimento da expectativa de vida associado ao aumento da população mundial fizeram com que a sociedade demandasse cada vez mais por produtos industrializados (LOURENÇO, 2019; SILVA; CAPANEMA; 2019; XAVIER *et al.*, 2021).

Em grande parte dos estudos observa-se que no Brasil há uma grande problemática na reciclagem dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, tendo em vista que a cadeia não se completa devido a vários fatores, como executar as normas previstas na Lei nº 12.305/2010 e seus decretos. No Brasil, mais de 90% dos seus resíduos sólidos são destinados para a disposição final em aterros sanitários, aterros controlados e lixões, sendo os 10% restantes distribuídos entre unidades de compostagem, unidades de triagem e reciclagem, unidades de incineração, vazadouros em áreas largadas e outros destinos (DEMAJOROVIC; AUGUSTO; SOUZA, 2016; NICOLAI, 2016; NASCIMENTO *et al.*, 2018).

A cidade de Manaus, por exemplo, é o maior polo industrial de eletroeletrônicos do país, na qual produz cerca de 50% do total de aparelhos eletrônicos, assim como mais de 70% dos computadores. A quantidade de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos aumenta exponencialmente a cada ano e a destinação final dos equipamentos obsoletos é diretamente proporcional ao crescimento da produção e da demanda por matérias-primas. Essa situação se

traduz por um processo de impactação na natureza, na qual ela é utilizada inicialmente como fonte de recursos naturais e minerais e, ao final, como depósitos de lixo, como observado na Figura 2 (NICOLAI, 2016; XAVIER *et al.*, 2021).

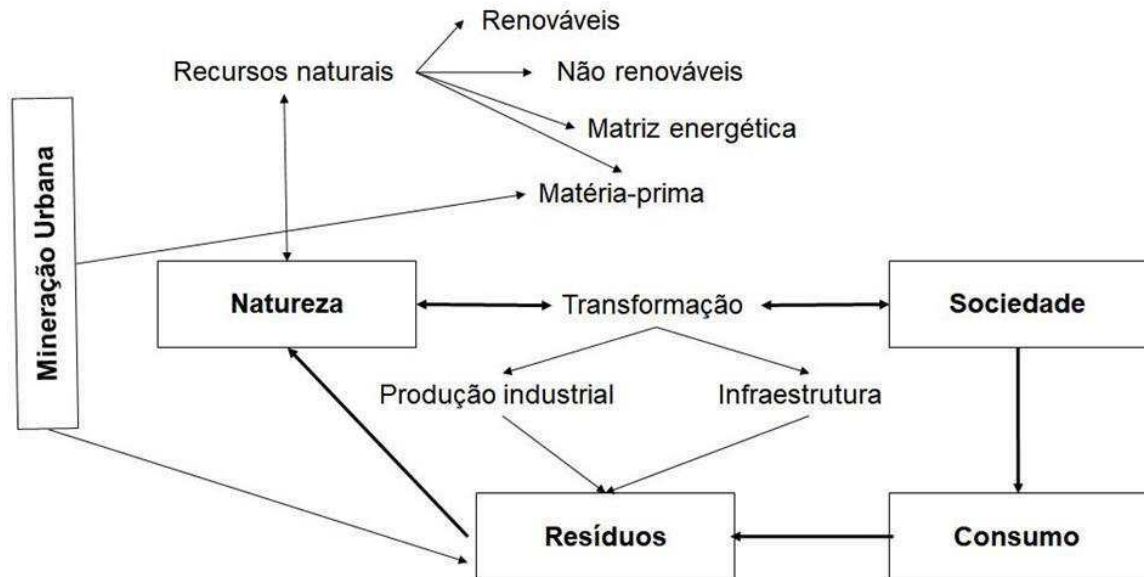


Figura 2 – Intervenção da mineração urbana no ciclo de transformação da natureza. Fonte: XAVIER *et al.*, 2021.

De acordo com Xavier *et al.* (2021), é essencial esclarecer que as "minas urbanas" são geralmente definidas como a "acumulação de materiais valiosos". Esta definição inclui a dimensão espacial, uma vez que essas minas estão situadas em depósitos de resíduos sólidos nas áreas urbanas. A mineração urbana, por sua vez, é o "processo de extração desses materiais a partir dos resíduos". Diferentemente das jazidas tradicionais, as jazidas urbanas são influenciadas pelas atividades humanas e crescem em paralelo com a produção industrial, não estando localizadas no subsolo.

3.5. Metodologias para Caracterização Tecnológica de Memória RAM

A caracterização tecnológica de minerais é o processo de estudar as propriedades físicas, químicas e minerais de uma amostra mineral com o objetivo de determinar sua qualidade, composição e potencial de uso para fins industriais. Ela é uma etapa importante na indústria mineral, pois permite identificar as melhores fontes de matérias-primas para a produção de produtos comerciais, utilizando-se de referências como: a literatura técnica e científica, normas e regulamentos industriais (NERY, 2016; TEIXEIRA, 2019).

A caracterização tecnológica pode ser realizada através de vários métodos, incluindo análise química, análise mineralógica, ensaios mecânicos, ensaios térmicos e ensaios de deformação. Esses métodos permitem obter informações detalhadas sobre as propriedades da amostra mineral, tais como composição química, tamanho de grão, textura, estrutura, resistência mecânica, entre outras (SANTOS, 2018).

O processo de caracterização tecnológica de minerais envolve vários passos, incluindo a coleta da amostra, a preparação da amostra, a realização dos ensaios e a interpretação dos resultados. A escolha dos métodos a serem utilizados na caracterização tecnológica dependerá do tipo de mineral e do objetivo específico do estudo (BORGES, 2014; OLIVEIRA, 2019).

Os resultados da caracterização tecnológica são usados para determinar a qualidade da amostra mineral, identificar as propriedades mais importantes da amostra e avaliar seu potencial de uso para fins industriais. Esses resultados também podem ser usados para melhorar o processo de extração, beneficiamento e beneficiamento de minerais, bem como para aprimorar o desenvolvimento de novos materiais (SANTOS, 2018).

Segundo Neumann, Scheneider e Neto, (2014), existem vários tipos de caracterização tecnológica de minerais que podem ser utilizados para analisar as propriedades de um mineral ou material. Alguns dos tipos mais comuns incluem:

- Análise de tamanho de partícula: esta técnica mede o tamanho das partículas de um mineral ou material, o que é importante para muitos processos tecnológicos.
- Análise de forma de partícula: esta técnica mede a forma das partículas de um mineral ou material, o que é importante para avaliar a qualidade e a distribuição de partículas em vários processos tecnológicos.
- Análise de textura: esta técnica avalia a textura das partículas de um mineral ou material, incluindo sua porosidade, densidade e outras características.
- Análise mineralógica: esta técnica identifica e quantifica os minerais presentes em um mineral ou material, o que é importante para avaliar sua composição química e propriedades.
- Análise de tamanho de grão: esta técnica mede o tamanho dos grãos de um mineral ou material, o que é importante para avaliar sua microestrutura.
- Análise de difração de raios-X: esta técnica utiliza raios-X para analisar a estrutura cristalina de um mineral ou material, o que é importante para determinar sua identidade mineral e propriedades.

- **Análise de espectroscopia:** esta técnica utiliza luz ou outros tipos de radiação para analisar a composição química de um mineral ou material.

Estes são apenas alguns dos tipos mais comuns de caracterização tecnológica de minerais. A escolha do tipo certo de caracterização depende do objetivo específico da análise e das propriedades que se deseja avaliar.

De modo geral, para que ocorra a Caracterização Tecnológica de uma amostra de cunho mineralógico, a mesma deve ser britada e moída a um tamanho de partícula indicado para a análise. Em seguida, a amostra deve ser homogeneizada e quarteada, para garantir a representatividade dos componentes presentes para obtenção das alíquotas para os diferentes ensaios (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2010).

A caracterização tecnológica torna-se uma etapa fundamental para o aproveitamento de um recurso mineral ou proveniente de REEE de forma otimizada, pois fornece ao engenheiro os subsídios, as composições químicas necessárias para o correto dimensionamento da rota de processos, otimizando assim, o rendimento global da planta (NEUMANN; SCHENEIDER; NETO, 2014).

Em conclusão, segundo Teixeira (2019), a caracterização tecnológica de minerais é uma parte fundamental da indústria mineral, pois permite avaliar a qualidade e as propriedades de diferentes tipos de minerais, identificar as melhores fontes de matérias-primas para a produção de produtos comerciais, e gerenciar de forma eficiente os recursos minerais.

3.5.1 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica que remonta aos anos 1930. Durante este período, os cientistas começaram a explorar a possibilidade de usar elétrons para examinar a estrutura de materiais. Em 1935, Max Knoll e Ernst Ruska construíram o primeiro Microscópio Eletrônico de Varredura, que foi capaz de ampliar imagens de superfícies de materiais em um fator de cerca de 50.000 vezes (CARMO, 2015; BALZUWEIT, 2016; JOANITTI; MORAIS; AZEVEDO, 2022).

Ao passar dos anos a tecnologia da MEV continuou a evoluir, permitindo aos cientistas visualizar cada vez mais detalhes da estrutura de materiais. Em 1950, o desenvolvimento da Microscopia Eletrônica de Varredura de Transmissão (TEM) permitiu aos cientistas examinar a estrutura interna de materiais pela primeira vez (MOREIRA *et al.*, 2023).

Houve várias modificações através de melhoras nos detectores, em 1963, o desenvolvimento da Microscopia Eletrônica de Varredura de Refração (STEM) permitiu os cientistas identificarem elementos químicos em uma amostra com alta precisão e em 1965 foi então construído o primeiro MEV comercial pela *Cambridge Scientific Instrument* (SILVA, 2013; OLIVEIRA, 2016).

Desde então, foram observados vários avanços, principalmente em relação as fontes de elétrons, a parte eletrônica e computacional. Além da substituição do sistema analógico pelo digital permite que as imagens sejam armazenadas e processadas facilmente, e o desenvolvimento de *softwares* específicos para operação e análise dos resultados (SOUSA, 2019).

Desde então, a tecnologia da MEV tem evoluído continuamente, permitindo aos cientistas visualizar estruturas com resoluções cada vez mais finas. A microscopia eletrônica de varredura é utilizada em várias áreas do conhecimento, e o uso desta técnica vem se tornando mais frequente por fornecer informações detalhadas, podendo ter aumentos de até 300.000 vezes. A imagem eletrônica de varredura é formada pela incidência de um feixe de elétrons no mineral, sob condições de vácuo (WEISS; PRASAD, 2011; OLIVEIRA, 2016).

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é considerada uma das técnicas mais avançadas de microscopia, pois permite a visualização de estruturas com resoluções até átomos individuais. É utilizada para examinar a estrutura e composição de materiais em nível nanométrico. Ela consiste em bombardear o material com elétrons e registrar a interação dos elétrons com a superfície do material, resultando em uma imagem detalhada da estrutura do material em questão (BITENCOURT; PANDOLFELLI, 2013; FERRARI *et al.*, 2019).

Segundo Ramos (2013) e Quizunda (2019), existem vários tipos de microscópios eletrônicos de varredura, incluindo a Microscopia Eletrônica de Varredura de Transmissão (MET), a Microscopia Eletrônica de Varredura de Refração (STEM) e a Microscopia Eletrônica de Varredura em Ambiente (SEM). Na qual, cada tipo de microscópio possui suas próprias vantagens e limitações e os mesmos são utilizados para diferentes propósitos.

A MET é uma técnica que utiliza elétrons transmitidos através de uma amostra ultrafina para criar uma imagem da estrutura interna do material. A STEM é uma variação da MET que permite a visualização de estruturas em nível de átomo, bem como a identificação de elementos químicos em uma amostra. Por fim, a SEM é uma técnica que utiliza elétrons rasantes para criar imagens da superfície do material, permitindo a visualização de sua textura, porosidade e outras características (COSTA, 2016; SALUSSOGLIA; GUERRA; AGUIAR, 2021).

A MEV é frequentemente combinada com outras técnicas, como a espectroscopia de raios-X e a microscopia óptica, para obter informações adicionais sobre a estrutura e composição de materiais. Além disso, a MEV tem sido usada para estudar uma ampla gama de sistemas, incluindo materiais biológicos, estruturas de átomos, materiais de nanotecnologia e muito mais (SOUSA, 2019; QUIZUNDA, 2019).

De acordo com Ramos (2013) e Bonotto (2021), a interpretação de imagens obtidas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) pode fornecer informações sobre a estrutura e a composição dos materiais. Algumas das informações que podem ser obtidas incluem:

- **Morfologia:** a MEV pode ser usada para visualizar a estrutura superficial de materiais em detalhes, incluindo a textura, as formas e os tamanhos das partículas. Isso é especialmente útil para avaliar a qualidade de superfícies de materiais, identificar defeitos e avaliar a homogeneidade de materiais.
- **Composição química:** a MEV pode ser combinada com outras técnicas, como a espectroscopia de raios-X, para obter informações sobre a composição química dos materiais. Por exemplo, pode-se identificar elementos presentes em uma amostra e quantificar sua concentração.
- **Estrutura cristalina:** a MEV pode ser usada para visualizar a estrutura cristalina de materiais. Isso é importante para compreender as propriedades mecânicas, elétricas e térmicas dos materiais.
- **Propriedades físicas:** a MEV pode ser usada para avaliar propriedades físicas, como dureza, condutividade elétrica, entre outras. Esta informação é importante para o desenvolvimento de novos materiais e para otimizar processos de produção.

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica valiosa para a análise de materiais e a caracterização de superfícies, e apresenta várias vantagens e desvantagens. Algumas das principais vantagens incluem:

- **Resolução elevada:** a MEV permite obter imagens detalhadas com resolução elevada, o que é especialmente importante para a identificação de estruturas minúsculas e superfícies.
- **Análise química:** o Sistema de Dispersão de Energia (EDS) é uma ferramenta valiosa que pode ser usada com a MEV para obter informações detalhadas sobre a composição química de materiais.

- Versatilidade: a MEV é uma técnica versátil que pode ser usada para analisar uma ampla variedade de materiais, incluindo metais, polímeros, cerâmicas, tecidos biológicos, entre outros.
- Análise em três dimensões: a MEV permite obter imagens em três dimensões, o que é especialmente útil para a caracterização de estruturas complexas.

No entanto, também existem algumas desvantagens associadas à MEV, incluindo:

- Preparação de amostras: a preparação de amostras para a MEV pode ser difícil e demorada, e requer habilidades técnicas especializadas.
- Custo elevado: os equipamentos para a MEV são caros, o que pode ser um obstáculo para algumas instituições ou pesquisadores.
- Destruição de amostras: a MEV envolve a bombardear as amostras com elétrons, o que pode causar danos irreversíveis em algumas amostras sensíveis.
- Limitações de espessura de amostra: a MEV é limitada pela espessura das amostras, já que as amostras muito espessas podem obscurecer as estruturas internas.

Segundo Vieira *et al.* (2021), o material a ser analisado é colocado no compartimento do MEV, e um vácuo é gerado e começa-se a escolher a área que será analisada. Com o início do bombardeamento de feixe de elétrons, que é feito pela fonte do microscópio, os elétrons presentes nas camadas mais internas dos átomos, que se encontram na superfície da amostra analisada, são ejetados fazendo com que uma lacuna seja formada. Decorrendo, assim, uma transição eletrônica, em que essa lacuna é preenchida por elétrons das camadas mais externas, promovendo a emissão da energia de raio-X, que irá equilibrar a diferença de energia entre os dois estados que o elétron percorreu.

A energia de raio-X que é emitida, deve ser lida pelo equipamento de acordo com a voltagem apresentada, e já que cada elétron de cada elemento químico tem a sua energia de emissão bem definida, o equipamento irá classificá-lo, podendo ou não mascarar o resultado, caso a energia seja semelhante, cabendo ao pesquisador ter seus possíveis resultados pré-definidos (OLIVEIRA, 2016; VIEIRA *et al.*, 2021).

A imagem eletrônica de varredura é representada em tons de cinza o mapeamento e a contagem de elétrons secundários (SE – *secondary electrons*) e retroespalhados (BSE – *backscattering electrons*) emitidos pelo material que está sendo analisado dessa forma, e conseqüentemente, gerando imagens com conformação tridimensional e de alta resolução. E a imagem de SE fornece detalhes da superfície ionizada do mineral ou do material observado em

tons de cinza e a imagem de BSE que é gerada pela emissão de elétrons retroespalhados e demonstra diferenças composicionais na região ionizada do mineral (DUARTE *et al.*, 2003).

De modo geral, segundo Joanitti, Morais e Azevedo (2022), a Microscopia Eletrônica de Varredura é uma técnica valiosa e versátil para a investigação de materiais em nível nanométrico. Com sua capacidade de fornecer imagens detalhadas da estrutura e composição de materiais, a MEV tem sido amplamente utilizada em muitas áreas da ciência e tecnologia. Além disso, a combinação da MEV com outras técnicas tem expandido ainda mais suas aplicações e possibilidades. A MEV oferece muitos benefícios, mas também tem algumas limitações e desvantagens que devem ser levadas em consideração ao decidir se é a técnica certa para a análise de determinadas amostras.

3.5.2 Sistema de Dispersão de Energia (*Energy Dispersive System*) – EDS

A história do Sistema de Dispersão de Energia (EDS) remonta aos primórdios da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), quando os cientistas começaram a explorar as possibilidades de usar elétrons para analisar materiais. Entre as décadas de 50 e 60, os primeiros sistemas de EDS foram desenvolvidos, permitindo aos cientistas obter informações detalhadas sobre a composição química de materiais. Desde então, o EDS tem evoluído continuamente, com o desenvolvimento de novos equipamentos e técnicas que melhoraram a precisão, sensibilidade e velocidade dos resultados (NEWBURY; RITCHIE, 2013; PRENCIPE *et al.*, 2015).

O EDS funciona detectando as radiações emitidas pelos elétrons acelerados durante a varredura da superfície da amostra com um feixe de elétrons. Estas radiações são conhecidas como radiação secundária e consistem principalmente de raios-X e elétrons. Ao detectar a radiação secundária, o EDS é capaz de identificar os elementos presentes na amostra e quantificar sua concentração. O EDS também pode ser usado para identificar a fase presente na amostra, como cristal ou amorfo (BURGESS; LI; HOLLAND, 2013; HODOROABA, 2020).

A precisão e a sensibilidade do EDS dependem de diversos fatores, incluindo o tipo de detector utilizado, a energia do feixe de elétrons e a preparação da amostra. Além disso, a presença de interferências, como a presença de elementos semelhantes na amostra, também pode afetar a precisão dos resultados (NEWBURY; RITCHIE, 2013).

O MEV pode ser acoplado ao sistema de EDS (*Energy Dispersive System*), o qual possibilita a determinação da composição qualitativa e semiquantitativa das amostras, visto que sua análise se restringe à superfície da substância, não tendo precisão, mas sim, uma estimativa

da concentração dos elementos presentes a partir da emissão de raios X característicos. O limite de detecção é da ordem de 1%, mas pode variar de acordo com as especificações utilizadas durante a análise, como pode-se citar, o tempo de contagem (VIEIRA *et al.*, 2021).

De acordo com D'Alfonso, *et al.* (2010) e Newbury e Ritchie, (2015), o Sistema de Dispersão de Energia (EDS) é uma ferramenta valiosa usada para análise química em conjunto com a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Algumas das principais vantagens do EDS são:

- Análise química rápida e precisa: na qual o EDS permite obter informações detalhadas sobre a composição química de materiais em questão de minutos, o que é muito mais rápido do que outras técnicas de análise química;
- Versatilidade: o EDS pode ser usado para analisar uma ampla variedade de materiais, incluindo metais, polímeros, cerâmicas, tecidos biológicos, entre outros;
- Facilidade de uso: o EDS é fácil de usar, já que não requer habilidades técnicas especializadas para a obtenção de resultados confiáveis e
- Resultados quantitativos: o EDS permite obter resultados quantitativos precisos da composição química de materiais, o que é especialmente importante para aplicações críticas como a produção de componentes de alta qualidade para indústrias aeroespaciais e automotivas.

Ainda de acordo com os autores, algumas das principais desvantagens associadas ao EDS, são:

- Preparação de amostras: a preparação de amostras para o EDS pode ser difícil e demorada, requerendo habilidades técnicas especializadas;
- Sensibilidade limitada a alguns elementos: o EDS é menos sensível a elementos como: o hidrogênio; o carbono e o nitrogênio, o que pode limitar a precisão dos resultados em algumas aplicações;
- Efeito de borda: o EDS pode ser afetado pelo efeito de borda, o que pode limitar a precisão dos resultados em amostras finas, e
- Interferências: o EDS pode ser afetado por interferências de espécies químicas adjacentes, o que pode limitar a precisão dos resultados em amostras complexas.

Além do EDS ser uma técnica rápida e não destrutiva, o que significa que não altera e/ou danifica a amostra durante a análise, uma das principais vantagens para se utilizar do MEV-

EDS é sua rapidez e facilidade na preparação das amostras, que varia de acordo com o objetivo da pesquisa. Dessa forma, um dos focos necessários para uma análise satisfatória é o modo da fratura, que persiste enquanto mais plano e polido for o material, melhor será o resultado semiquantitativo obtido (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007; VIEIRA *et al.*, 2021).

Os minerais não condutores de corrente elétrica para serem analisados no equipamento MEV-EDS devem ser previamente metalizados. A metalização consiste na precipitação, a vácuo, de uma película micrométrica de material condutor, como o ouro ou o carbono (DUARTE *et al.*, 2003).

Em resumo, segundo Prencipe *et al.* (2015), o EDS é uma ferramenta valiosa para a análise química dos materiais, mas também tem algumas limitações e desvantagens que devem ser levadas em consideração ao decidir se é a técnica certa para a análise de determinadas ações. No entanto, o EDS é amplamente utilizado em muitas áreas, incluindo a ciência dos materiais, a biologia, a geologia, a arqueologia e a indústria, graças à sua velocidade, precisão e versatilidade. Além disso, a tecnologia do EDS está constantemente evoluindo, o que significa que novas aplicações e soluções para desvantagens atuais podem ser desenvolvidas no futuro.

3.5.3 Difração de Raios-X – DRX

Os raios-X foram descobertos por Wilhelm Roentgen no final dos anos 1800. Quando essa radiação incide em matéria, vários fenômenos acontecem e o feixe é atenuado, tanto para a absorção quanto para o espalhamento. A primeira aplicação desta radiação foi demonstrada pelo próprio Roentgen, que publicou um trabalho em 1898, na qual, exibia a radiografia da mão. Aplicações industriais dos raios-X foram surgindo, não só explorando os fenômenos de absorção, como também os dos espalhamentos na produção de materiais tão variados quanto ligas metálicas, cerâmicas ou tecidos. O primeiro equipamento de raios-X foi apresentado por Moseley em 1912 e os primeiros equipamentos comercialmente disponíveis datam do começo da década de 50 (DA SILVA, 2020; CORREIA, 2022).

Segundo Gobbo (2003) e Da Silva (2020), a difração de raios-X é um método de análise quantitativa, que tem como premissa básica o fato de considerarem os efeitos da absorção sobre as intensidades e utilizam as intensidades integradas através das comparações entre picos arbitrariamente. A difração de raios-X é uma técnica amplamente utilizada para estudar a estrutura cristalina dos materiais. Ela é baseada no princípio da interferência construtiva e destrutiva das ondas de raios-X quando elas interagem com os átomos de um cristal.

Quando um feixe de raios-X incide sobre um cristal, ele interage com os elétrons dos átomos presentes na rede cristalina. Essa interação causa a dispersão dos raios-X em várias direções. No entanto, devido à ordem espacial dos átomos no cristal, ocorre uma interferência construtiva entre as ondas dispersas pelos diferentes planos atômicos. A difração ocorre quando as ondas dispersas pelos diferentes átomos de um plano se combinam de forma construtiva em uma direção específica, chamada de ângulo de Bragg. Esse ângulo é determinado pela relação entre o espaçamento entre os planos atômicos do cristal e o comprimento de onda dos raios-X incidentes (TEIXEIRA, 2014; AGUIAR, 2020; ZANDONÁ, 2021).

Ao medir os ângulos de difração dos raios-X dispersos por um cristal e analisar os padrões resultantes, é possível obter informações sobre a estrutura cristalina, como a distância entre os átomos, a orientação dos planos atômicos e a presença de defeitos cristalinos. A difração de raios-X é uma técnica essencial para determinar a estrutura cristalina de compostos químicos, identificar fases cristalinas em amostras desconhecidas e investigar propriedades físicas e químicas dos materiais (JUNIOR, 2017; LOPES, 2022).

A Lei de Bragg (Figura 3) fornece a base teórica do método: $n\lambda = 2d \sin\theta$, em que λ é o comprimento de onda da radiação X (monocromática) e n é um número inteiro (1, 2, 3...) correspondente à ordem de difração dos planos do cristal em questão, e d é a distância interplanar para o conjunto de planos (hkl) e θ é o ângulo de incidência, medido entre o feixe incidente e os planos atômicos. Um conjunto das diversas distâncias interplanares d é típica para cada mineral, tendo em vista que, cada substância cristalina possui suas características e as mesmas estão listadas em várias referências, sendo a mais ampla e utilizada o ICDD (*International Center for Diffraction Data*) (SILVA, 2013; MAGALHÃES, 2014).

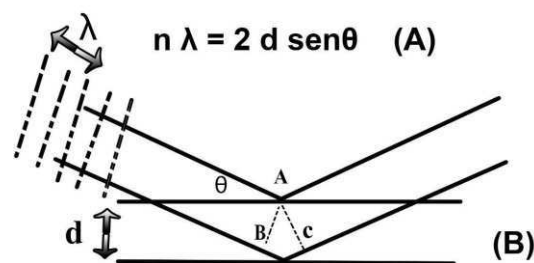


Figura 3 - Esquema ilustrativo da Lei de Bragg. Fonte: Laboratório de Difração de Raios-X, Jataí Física.

O gráfico da intensidade do feixe de raios-X detectado *versus* ângulo de incidência é chamado de difratograma. A partir dos difratogramas obtidos para uma amostra, pode-se concluir que as informações sobre as propriedades dos diferentes compostos cristalinos. Com a

difração de pó, materiais cristalinos podem ser analisados segundo os seguintes métodos: análise qualitativa e quantitativa de fases, determinação de rede cristalina e parâmetros de rede, refinamento estrutural, determinação do tamanho do cristalino, tensão residual, análise de textura e estudo de defeitos cristalinos (AGUIAR, 2020).

O difratômetro possui um detector móvel para amostras em pó, que é capaz de girar em torno do que está sendo analisado, de modo que vários ângulos de reflexão possam ser varridos. Assim, são detectadas as diferenças na intensidade do feixe refletido em função do ângulo de reflexão, que pelas leis da reflexão, é igual ao ângulo de incidência (NEUMANN; SCHENEIDER; NETO, 2014).

A difração de raios-X tem uma ampla gama de aplicações em diferentes áreas. Na química e na biologia estrutural, é usada para determinar a estrutura tridimensional de moléculas e proteínas. Na ciência dos materiais, ajuda a entender as propriedades físicas e químicas dos materiais cristalinos, como metais, cerâmicas e polímeros. Também é aplicada na análise de fases em geologia, na identificação de minerais e na caracterização de amostras arqueológicas (SILVA, 2013).

Durante a análise, a amostra é excitada por raios-X primários, um tipo de radiação eletromagnética de alta energia, de um tubo de raios-X. Durante a excitação, os elétrons em camadas próximas ao núcleo são ionizados. Os átomos excitados são muito instáveis e os elétrons da camada eletrônica mais externa preenchem as lacunas deixadas para trás. Durante este processo, é emitida uma radiação X secundária de energia definida pela diferença de energia entre as posições inicial e final dos elétrons que ocupam as vagas restantes (CONCEIÇÃO, 2017).

Em suma, segundo Zandoná (2021), a difração de raios-X é uma técnica relevante para a investigação da estrutura atômica e molecular dos materiais, fornecendo informações detalhadas sobre a organização dos átomos em uma amostra cristalina. Ela pode ser amplamente aplicada em pesquisas científicas e em diversas áreas da indústria.

3.5.4 Espectroscopia de raios-X por Energia Dispersiva – EDX

A Espectroscopia de raios-X por Energia Dispersiva (EDX, do inglês *Energy Dispersive X-ray Fluorescence*) é uma técnica analítica usada para determinar a composição elementar de uma amostra. Ela se baseia na excitação dos átomos da amostra por meio de raios-X e na detecção das energias dos raios-X fluorescentes emitidos como resultado dessa excitação (SANTOS *et al.*, 2013).

A técnica de EDX requer uma fonte de raios-X, que pode ser um tubo de raios-X ou uma fonte de raio-X sincrotron. A amostra a ser analisada é irradiada com raios-X de alta energia, geralmente na faixa de alguns keV (quilo elétron-volts) a alguns MeV (mega elétron-volts). Quando os raios-X interagem com os átomos da amostra, eles podem causar a remoção de elétrons internos dos átomos (WASTOWSKI *et al.*, 2010; CARVALHO, 2015; JUNIOR, 2016).

A remoção de um elétron de uma camada interna resulta em um "buraco" nessa camada eletrônica. Para preencher esse buraco, um elétron de uma camada externa superior pode cair para a camada vazia. Esse processo é conhecido como emissão de raios-X fluorescentes. Os raios-X emitidos têm energias características específicas para cada elemento, permitindo a identificação dos elementos presentes na amostra (SANTOS *et al.*, 2013).

A EDX é uma técnica simples e econômica, sendo uma técnica qualitativa e quantitativa de composição química de amostras que permite a determinação da composição química de muitos materiais. Com essa técnica é possível detectar átomos que estão na faixa de números atômicos $Z=11$, Sódio, e $Z=92$, Urânio. Para mais, a mesma é capaz de determinar as concentrações dos átomos envolvidos na amostra de um modo muito fácil (ANGULO PAREDES, 2012; CARVALHO, 2015).

A EDX visa impulsionar o processo por meio de análises mais rápidas e de simples realização, e essa técnica é uma alternativa para a identificação mineralógica de solos, rochas, cerâmicas e líquidos, tendo em vista que permite a determinação simultânea ou sequencial da concentração de todos os elementos enquadrados entre o Sódio (Na) e o Urânio (U), sem a necessidade de destruição da amostra, ou seja, de modo instrumental, sem nenhum pré-tratamento químico e podendo atingir limites de detecção da ordem de 1 a 20 ppm, dependendo do equipamento em questão (WASTOWSKI *et al.*, 2010).

Segundo Ângulo Paredes (2012), para a realização de análises quantitativas através dessa técnica são necessários precauções na avaliação do "efeito matriz", já que esse efeito se origina a partir da re-excitação eletrônica de átomos pelos raios-X secundários emitidos pelos átomos vizinhos no interior da amostra. A fluorescência secundária colabora com até 20% da intensidade registrada em um espectro de fluorescência de raios-X e a terciária colabora com até 5%. Assim, apenas 75% da intensidade registrada provêm do processo de excitação primária.

É possível que alguns métodos que possibilitam a determinação de coeficientes específicos para pares de átomos, os quais fornecem valores da intensidade originária de

processos primários com relação aos outros processos. Também em casos nos quais os “efeitos de matriz” não são preponderantes numa amostra, a intensidade dos picos dos elementos químicos presentes pode ser considerada linearmente dependente da sua concentração (CARVALHO, 2015).

De forma sucinta, segundo Junior (2016), a Espectroscopia de raios-X por Energia Dispersiva é uma técnica analítica poderosa e amplamente utilizada para a determinação da composição elementar de uma amostra. Ela é aplicada em diversas áreas, incluindo ciência dos materiais, geologia, arqueologia, indústria de semicondutores, análise ambiental e controle de qualidade. A EDX fornece informações relevantes sobre a presença e a concentração de elementos em uma amostra, auxiliando na caracterização e no estudo de materiais.

3.6. Caracterização dos componentes presentes na Memória RAM

Na literatura não é encontrado o detalhamento dos componentes presentes na Memória RAM, apenas para placas de circuito impresso, tendo em vista que o presente trabalho se baseia em referências gerais sobre as Placas de Circuito Impresso – PCI.

De modo geral, pode-se definir os componentes presentes em equipamentos eletroeletrônicos como um composto de vários metais, acoplados, cobertos e/ou misturados a plásticos e materiais cerâmicos, contudo as quantidades de materiais encontrados no REEE dificultam a generalização da sua composição. Pois, a composição das placas de circuito impresso pode variar dependendo das diferentes aplicações para as mesmas, a origem do material, os métodos analíticos, além do mais, a composição tem variado com o tempo principalmente devido ao avanço tecnológico e as exigências de reciclagem (YAMANE, 2012).

As Placas de Circuito Impresso apresentam uma composição heterogênea, o que dificulta a sua reciclagem, mas, a presença de metais em sua composição o torna uma matéria prima interessante, apresentando um potencial de processos de reciclagem, sendo viável tanto para economia como para o meio ambiente (VIET, 2005).

A composição das Placas de Circuito Impresso torna-se variável de acordo com o ano de sua fabricação, a tecnologia disponível no ano da fabricação e com o tipo de placa em questão, tendo em vista que a indústria eletroeletrônica se utiliza intensamente das placas de circuito impresso para o processamento de dados, estando presente em grande parte desses produtos. As PCI são compostas predominantemente por metais (40%), polímeros (30%) e cerâmicos (30%), e após retirar todos os componentes, observa-se uma predominância da fase não metálica (FNM), sendo responsável por 72%. Em linhas gerais as PCI são compostas de

vários metais e ligas metálicas assim como compostos orgânicos e inorgânicos (VIET, 2005; NICOLAI, 2016).

A fração não metálica (FNM) apresenta em sua composição materiais cerâmicos e plásticos. Os plásticos compostos nas PCI são de modo geral, retardantes de chama, polímeros halogenados, resinas e fibra de vidro. Já os materiais cerâmicos presentes nas PCI são de modo geral, sílica e alumina. A fração metálica (FM) é constituída por metais de base como cobre, ferro, alumínio e estanho; metais raros como tântalo, gálio e metais do grupo da platina (Pt, Pd, Rd, Rh); metais nobres como prata (0,2%), o ouro (0,1%) e o paládio (0,005%), na qual os mesmos estão na forma de finos filmes sob outros metais base (Al, Cu, Fe) e cerâmicos e também encontra-se metais perigosos como crômio, chumbo, berílio, mercúrio, cádmio, zinco e níquel (Tabela 2) (YAMANE, 2012; NICOLAI, 2016).

Tabela 2 – Porcentagem de metal encontrado em média nos minérios e nas placas de circuito impresso.

ELEMENTO	% NO MINÉRIO	% MÉDIO NA PCI
Cobre	0,5–3,0	21,19
Zinco	1,7–6,4	0,17
Estanho	0,2–0,85	3,17
Chumbo	0,3–7,5	1,20
Ferro	30–60	1,31
Níquel	0,7–2,0	0,17
Alumínio	51–64	1,79

Fonte: YAMANE, 2012.

Os metais preciosos, como por exemplo, o grupo da platina, apontam uma elevada estabilidade química e uma boa condutividade elétrica, e conseqüentemente aplicados em aparelhos eletrônicos, as PCI possuem dez vezes maior concentração de metais nobres em relação à concentração nos minerais de onde foram extraídos de fontes primárias (NICOLAI, 2016).

Segundo Yamane (2012), os metais preciosos, em especial o ouro, têm uma vasta aplicação nos processos de fabricação de equipamentos eletroeletrônicos, pois o mesmo é utilizado como material de contato, graças à sua estabilidade química, por apresentar propriedades condutoras e resistentes à corrosão. O seu uso é feito na forma pura, já que na forma de liga metálica as propriedades que o ouro apresenta seriam eliminadas. Os metais preciosos encontram-se concentrados, principalmente, em:

- Conectores elétricos: melhorando a condutividade e reduzindo o desgaste;
- Placas de circuito impresso: utilizando como proteção contra oxidação;
- Transistores: melhorando o desempenho;
- Capacitores: aumentando a eficiência.

Em termos de recuperação dos metais preciosos presentes nas placas de circuito impresso os estudos são concentrados, em sua grande parte, na obtenção destes metais, devido ao maior valor agregado em relação aos demais. Como mostra a Tabela 3, e pode-se observar que o valor referente aos metais preciosos pode chegar a mais de 70% do valor gasto com metais na produção da placa (CALDAS *et al.*, 2016).

Tabela 3 – Composição e os valores dos metais presentes em placas de circuito impresso de um modo genérico.

METAL	% MASSA	VALOR (£/KG)	VALOR %
Ouro	0,025	14200	65,4
Paládio	0,01	6200	11,4
Cobre	16	3,3	9,7
Prata	0,1	250	4,6
Estanho	3	8,1	4,5
Níquel	1	13,2	2,4
Alumínio	5	1,2	1,1
Chumbo	2	1,3	0,5
Zinco	1	1,2	0,2
Ferro	5	0,1	0,1

Fonte: Caldas *et. al*, 2016.

Ainda segundo Caldas *et al.*, 2016, o valor agregado aos metais presentes nas placas de circuito impresso, torna explícito a necessidade da reciclagem. A recuperação destes metais é uma alternativa extremamente viável para obtenção de matéria-prima para indústria eletroeletrônica.

O objetivo de caracterizar a composição, particularmente, da memória RAM, vem principalmente do fato de que existem diversos tipos de placas de circuito impresso, e as memórias RAM são reportadas na literatura de um modo geral. Sem uma descrição detalhada

de sua composição e das concentrações dos materiais envolvidos, especialmente os metais, na qual, torna-se evidente a existência de variações nas concentrações e composições.

3.7. Valoração econômica dos elementos químicos

De acordo com a Forbes (2021), uma pesquisa feita pela FGVcia (Centro de Tecnologia de Informação Aplicada da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas) mostrou que há mais de 200 milhões de computadores instalados no Brasil e a cada ano, segundo a *Green Eletron* (2020), cerca de 7 milhões de toneladas de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos são descartados.

O teor de ouro de um computador é de cerca de 0,0016%, no entanto, 1 tonelada de sucata eletrônica de computador contém mais ouro do que 17 toneladas de minério de ouro. Isso significa que os REEE podem ser considerados minérios de alta qualidade. Muitas pesquisas são feitas sobre as possibilidades e a viabilidade de recuperar metais valiosos de sucatas eletroeletrônicas, especialmente nas PCI (NNOROM; OSIBANJO, 2008).

Uma possível vantagem da reciclagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos é a possibilidade de usar o plástico como combustível na recuperação de energia. A recuperação de energia não apenas ajuda a reduzir o consumo de combustíveis fósseis, mas também fornece uma maneira ecologicamente correta de gerenciar a maioria dos plásticos de *EoL EEE* (sigas utilizadas para descrever um equipamento elétrico e eletrônico que não é mais mantido ou suportado) (GERBASE; OLIVEIRA, 2012).

Por fim, segundo Magalhães (2011), a valoração econômica dos REEE torna-se muito importante pois ajuda a estabelecer o custo de coleta, transporte, tratamento e disposição final dos REEE. Além disso, essa avaliação desempenha um papel crucial na análise do impacto tanto ambiental quanto econômico das políticas de gerenciamento de resíduos, permitindo a identificação de oportunidades para otimizar o retorno financeiro da reciclagem dos REEE e, ao mesmo tempo, minimizar o impacto ambiental associado à gestão dos resíduos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada para a caracterização tecnológica das memórias RAM baseia-se nas seguintes etapas:

- Coleta dos REEE;
- Cominuição das memórias RAM;
- Peneiramento do material cominuído;
- Preparação das Amostras para as análises de MEV-EDS;
- Preparação das Amostras para as análises de DRX;
- Realização das análises de MEV-EDS;
- Realização das análises de DRX;
- Separação Magnética;
- Análises Químicas e
- Análises de EDX após a Separação Magnética.

4.1. Coleta dos REEE

Inicialmente, foi seguido um planejamento que se iniciava na coleta, seguidos pela desmontagem manual, separação, pesagem e quantificação dos REEE.

O trabalho desenvolvido foi executado nas seguintes etapas: Na primeira etapa foi realizada uma inspeção e avaliação das condições de armazenamento dos resíduos eletroeletrônicos da UFCG (Figura 4 e Figura 5).



Figura 4 – Local de armazenamento dos resíduos eletroeletrônicos da UFCG. (Dados da Pesquisa, 2021).



Figura 5 – Computadores obsoletos armazenamento na UFCEG. (Dados da Pesquisa, 2021).

Após a inspeção inicial foram coletados cerca de 281 gabinetes de computadores obsoletos e sem uso, variando de modelos, que alteravam os anos de fabricação entre 1996 até 2012, que se encontravam disponíveis para recolhimento no almoxarifado da Universidade Federal de Campina Grande – UFCEG (Figura 6).



Figura 6 – Gabinetes de computadores recolhidos para desmontagem e pesagem. (Dados da Pesquisa, 2021).

Por sua vez estes gabinetes foram direcionados para o Laboratório Especializado em Caracterização e Tratamento de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (LECTRE³) localizado no bloco BT na Universidade Federal de Campina Grande, para que entrassem em processo de desmontagem para separação e pesagem das suas partes constituintes (invólucros

metálicos e plásticos, fios, placas de circuitos integrados, processadores, dissipadores de calor, etc.) (Figura 7 e Figura 8).

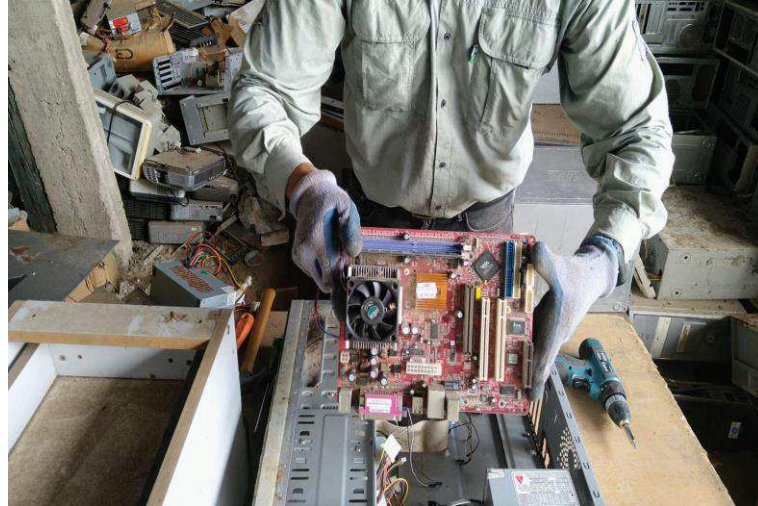


Figura 7 – Desmontagem e separação dos macros componentes. (Dados da Pesquisa, 2021).



Figura 8 – Gabinete desmontado e seus macros componentes separados. (Dados da Pesquisa, 2022).

As técnicas e procedimentos para a desmontagem seguiram as recomendações do Guia de desmontagem para Equipamentos de TI da *Sustainable Recycling Industries* e do Guia de desmontagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (SCHLUEP; SPITZBART; BLASER, 2015, XAVIER *et al.*, 2020).

A princípio esperava-se um tempo de desmontagem variando de 5 a 7 minutos por equipamento, porém na prática este tempo pode ser muito maior dependendo do gabinete, podendo variar entre 15 minutos até no máximo 30 minutos.

A desmontagem dos gabinetes foi realizada manualmente, com chaves do tipo fenda, *Philips*, alicates para corte de fios e cabos, estilete e uma parafusadeira elétrica portátil da marca *Bosch*, na qual foi utilizado diferentes diâmetros de chaves e brocas, conforme o tamanho dos

parafusos nos gabinetes em questão. Cada peça foi separada e pesada individualmente nas balanças, na qual, para peças pequenas foram utilizadas uma balança de cozinha com capacidade de pesagem de até 1 kg e para as demais peças uma balança de mercado com capacidade de até 40 kg (Figura 9).



Figura 9 – Pesagem inicial de um gabinete. (Dados da Pesquisa, 2022).

Em resumo, a etapa de coleta pode ser observada pelo fluxograma (Figura 10), na qual demonstra as etapas seguidas para a execução do trabalho em questão.

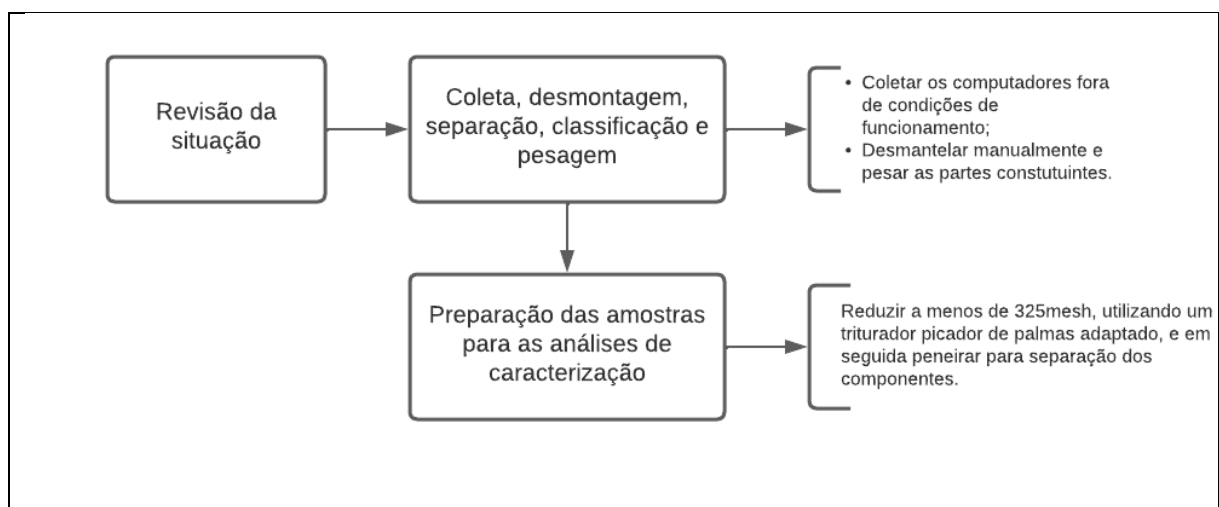


Figura 10 – Fluxograma demonstrando as operações iniciais. (Dados da Pesquisa, 2022).

Finalizando os trabalhos de desmontagem e pesagem dos 281 gabinetes, que pesaram 1849,320 kg, foram iniciados os trabalhos de processamento do material desmontado, análises químicas e avaliação técnica para o aproveitamento dos resíduos eletroeletrônico.

4.2. Cominuição das memórias RAM

Para o processo de trituração e redução a pó (cominuição) foi utilizando um triturador picador forrageiro adaptado (Figura 11), que se encontra alocado no LECTRE³. Ao fim da separação manual dos componentes, tinha-se cerca de 4,783 kg de memória RAM tanto com terminais prateados como dourados, que somavam 283 unidades com um peso médio de 18 g cada unidade.

A ideia inicial era que fosse utilizado cerca de 1 kg de material para a trituração, porém, o equipamento começou a dissipar material, impossibilitando sua continuidade, desse modo, foi utilizado no processo 45 unidades de memória RAM com um peso inicial equivalente a 810 g para a pesquisa, já que as mesmas já haviam sido cominuídas pelo triturador picador forrageiro adaptado que geraram 779 g de material.



Figura 11 - Triturador picador forrageiro adaptado. (Dados da Pesquisa, 2022).

O triturador picador forrageiro utilizado para o processamento foi da marca *Garthen* modelo GTI-2000LD com potência de 2 HP e que possuem 2 facas e 10 martelos móveis, e utilizando-se uma peneira de 2,00 mm. E para que as memórias RAM fossem processadas pelo triturador picador forrageiro, foram feitas adaptações como: lacrar todos os terminais abertos,

utilizando soldas e acrílico, para que se evitasse a propagação do material particulado pelo ambiente, evitando contaminações, e ao fim do processo, o material era depositado em embalagens lacradas. O processo teve uma duração média de 10 minutos para gerar um processado contendo cerca de 779 g de material, na qual, foi observado uma dissipação de cerca de 31 g, equivalente a 1,722 memórias RAM.

4.3. Peneiramento do material cominuído

No Laboratório de Análises Mineraias (LAM), localizado na Universidade Federal de Campina Grande, procedeu-se ao peneiramento do material cominuído. Esse processo foi realizado empregando um conjunto de 13 peneiras e a base do passante, variando de uma abertura de 2,83 mm (7 *mesh*) até um material passante com tamanho inferior a 0,045 mm (325 *mesh*). Um agitador eletromagnético foi empregado para auxiliar o peneiramento, sendo que cada conjunto de peneiras foi agitado por um período de 10 minutos. Vale destacar que o número de peneiras agitadas simultaneamente foi limitado a 6. O processo completo de agitação levou aproximadamente 20 minutos, seguido por cerca de 30 minutos adicionais para acondicionar as amostras (Figura 12).



Figura 12– Conjunto de peneiras e o agitador eletromagnético. (Dados da Pesquisa, 2022).

O agitador de peneiras eletromagnético de bancada ProduTest utilizado no peneiramento do material foi fabricado pela da marca TELASTEM LTDA. e o modelo utilizado foi o AG–2310-L, na qual possui indicação para produtos secos, seu acionamento é por meio manual, possui vibrador eletromagnético com um potenciômetro que aumenta ou diminui a intensidade das vibrações, e possui um tempo máximo de vibração de até 60 minutos.

O conjunto de peneiras utilizado para o peneiramento foi do modelo Granutest, fabricadas pela marca TELASTEM LTDA., variando suas aberturas em: 7 *mesh* (2,83 mm); 16 *mesh* (1,19 mm); 20 *mesh* (0,84 mm); 40 *mesh* (0,42 mm); 45 *mesh* (0,35 mm); 48 *mesh* (0,297 mm); 70 *mesh* (0,210 mm); 80 *mesh* (0,177 mm); 100 *mesh* (0,149 mm); 140 *mesh* (0,106 mm); 170 *mesh* (0,088 mm); 200 *mesh* (0,074 mm), 325 *mesh* (0,045 mm) e o prato base para o passante.

4.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) – MEV-EDS

Após a etapa inicial de peneiramento, uma série de quatorze amostras com diversas granulometrias foi obtida. Dentre essas, quatro amostras (7 *mesh*, 48 *mesh*, 325 *mesh* e material abaixo de 325 *mesh*) foram escolhidas com base em suas granulometrias e quantidades de material retido nas peneiras, tendo em vista que haveria mais análises utilizando tais materiais. Estas quatro amostras foram submetidas a análises no CERTBIO, situado na Universidade Federal de Campina Grande. A primeira abordagem foi a utilização da Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia de Energia Dispersiva (MEV-EDS) para avaliar suas composições potenciais e estruturas.

Foi utilizado para a análise foi um equipamento MEV-EDS de bancada fabricado pela *Hitachi*, modelo TM-1000, magnificação de 20~10.000x (2x, zoom digital 4x), profundidade de foco de 1 mm, resoluções de 1 a 100 nm, 15 KV, baixo vácuo e pressão variada (1 a 270 Pa), sem recobrimento metálico, mesmo em amostras não condutoras (Figura 13). Foram utilizadas fitas de carbono para fixar os materiais no porta amostras.



Figura 13 - Equipamento de MEV-EDS modelo TM-1000. (Dados da Pesquisa, 2022).

4.5. Difração de Raios-X – DRX

Iniciou-se a análise das quatro amostras selecionadas para Difração de Raios-X (DRX), essas amostras apresentavam tamanhos de partícula correspondentes a *7 mesh*, *48 mesh*, *325 mesh* e partículas abaixo de *325 mesh*. No entanto, antes de serem submetidas à DRX, essas amostras já haviam sido analisadas pela Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia de Energia Dispersiva (MEV-EDS). Os resultados obtidos através dessa análise MEV-EDS desempenharam uma função crucial ao fornecer suporte direto para a interpretação dos dados subsequentes obtidos por DRX.

Para tal análise foi utilizado um difratômetro de raios-X da marca *Shimadzu*, modelo XRD-7000, com fonte de radiação $\text{CuK}\alpha$. As análises foram feitas com ângulo 2θ variando de 5 a 70° . O comprimento de onda utilizado foi de $\lambda=1,54060 \text{ \AA}$, voltagem de 40,0 kV e corrente de 30,0 mA (Figura 14).



Figura 14 - Difratômetro de raios-X. (Dados da Pesquisa, 2022).

4.6. Separação Magnética

Para realizar o processo de Separação Magnética, o primeiro passo consistiu em reunir todo o material que havia sido previamente submetido ao peneiramento. Esse material reunido foi submetido à Separação Magnética utilizando um Separador Magnético de Tambor de operação a seco, da marca INBRAS Equipamentos Magnéticos e Vibratórios (Figura 15). Esse equipamento apresentava uma faixa magnética configurada para partículas com tamanho acima de *+150 mesh* (-6 mm).



Figura 15 - Separador Magnético de Tambor. (Dados da Pesquisa, 2022).

O objetivo principal desse procedimento era separar as partículas magnéticas das não-magnéticas. A expectativa inicial era obter pelo menos dois tipos de materiais distintos para análise. No entanto, durante o processo, foi obtido um terceiro material, ao qual, necessitava de reprocessamento, pois o mesmo possuía uma faixa granulométrica superior a 20 *mesh*.

A separação magnética pode ser classificada em quatro categorias, sendo elas: a separação magnética, a seco, de baixa e alta intensidade e, a úmido, de alta e baixa intensidade. Para o presente estudo foi utilizado o separador magnético a seco de baixa intensidade, já que o equipamento utilizado, o Separador Magnético de Tambor via seca da marca INBRAS Equipamentos Magnéticos e Vibratórios, encontra-se alocado no Instituto Federal da Paraíba – IFPB, campus Campina Grande e compõe uma planta piloto de beneficiamento (FRANÇA; LUZ, 2007).

4.7. Análises químicas após a Separação Magnética

Foram realizadas uma sequência de análises químicas no CERTBIO - UFCG, a fim de verificar a solubilização da fibra de vidro e da resina *epóxi* com Hidróxido de Sódio (NaOH) em porcentagens de 5%, 10% e 20% (Figura 16), com um tempo de espera de 24hrs e 48hrs mergulhados em solução, após findar o tempo limite, as amostras seguiam para uma neutralização com ácido láctico (pH próximo a 3,86) para evitar agressão ao meio ambiente. E logo em seguida, eram lavados e passavam 24hrs na estufa a 40°C para a sua secagem.



Figura 16 - Amostras solubilizadas em Hidróxido de Sódio (NaOH) em porcentagens de 5%, 10% e 20%. (Dados da Pesquisa, 2023).

Porém, não se obteve resultados viáveis para a continuação dessas análises, tendo em vista que, o material obtido se tornou muito básico (pH próximo a 13) dificultando sua neutralização, além de não ter solubilizado toda a fibra de vidro e a resina *epóxi*, observados após sua secagem. Conseqüentemente, essas análises químicas foram descontinuadas da pesquisa em questão.

4.8. Espectroscopia de raios-X por Energia Dispersiva – EDX

Após a conclusão do processo de separação magnética, foram obtidos três tipos distintos de materiais. O primeiro material, designado como Material A, correspondia ao material passante que demandaria reprocessamento. No entanto, para os propósitos desta pesquisa, o Material A foi excluído.

O segundo material, denominado como Material B, era composto pelas partículas magnéticas. O terceiro material, conhecido como Material C, consistia nas partículas não-magnéticas. Após essa separação, os Materiais B e C foram subdivididos em três amostras distintas, com tamanho de partículas retidas em peneiras de 100 *mesh* e 325 *mesh*. Essas amostras foram rotuladas como Amostra 1, Amostra 2 e Amostra 3, a fim de serem devidamente analisadas.

A amostra 1 contendo o material não-magnético com o retido a 325 *mesh*, a amostra 2 seria a mistura do material magnético e não-magnético retido a 100 *mesh* e por fim, a amostra 3 que seria o material magnético retido na peneira de 325 *mesh* (Figura 17).



Figura 17 - Amostra 1: Material não-magnético com o retido a 325 *mesh*; Amostra 2: Mistura do material magnético e não-magnético retido a 100 *mesh*; Amostra 3: Material magnético retido na peneira de 325 *mesh*. (Dados da pesquisa, 2023).

As amostras em questão foram submetidas a análise no Centro de Referência em Tecnologia Mineral do Instituto Federal do Rio Grande do Norte – IFRN, localizado no campus de Currais Novos. As mesmas se encontravam na forma de pó solto e para a análise de Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X (FRX) foi utilizado um Espectrômetro de Bancada de Energia Dispersiva (EDX), da Marca *Thermo Fisher Scientific*, Modelo ARL QUANT’X., utilizando o método a ar.

5 RESULTADOS

A operação de cominuição das placas de memória RAM foi realizada empregando o picador triturador forrageiro adaptado, e como resultado, foram gerados 779 g de material triturado. As placas de memória foram retiradas dos computadores e pesadas individualmente antes de serem submetidas à cominuição. A massa inicial total das placas foi de 810 g, equivalente a 45 unidades.

Entretanto, a operação de cominuição foi limitada a apenas 45 unidades devido a um problema técnico ocorrido com o equipamento durante o processo. Isso levou à inviabilidade de prosseguir com o processo de cominuição. Após a conclusão da cominuição, foram registrados os pesos de cada grupo de material resultante, juntamente com suas respectivas porcentagens. Esses materiais foram separados em três grupos distintos, que estão sendo apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Balanço de massa das memórias RAM após cominuição.

AMOSTRAS	PESO (G)	PORCENTAGEM (%)	PERDAS (%)
GRUPO 1 (até 100 <i>mesh</i>)	668,3 g	82,506%	3,284%
GRUPO 2 (de 100 <i>mesh</i> até o passante de 325 <i>mesh</i>)	110,7 g	13,66%	0,55%
TOTAL	779,0 g	96,166%	3,834%

Fonte: Dados da Pesquisa, 2022.

Foi constatado que a perda de massa total alcançou um valor de 3,834%, correspondendo a cerca de 31,0 g de material que se dissipou ao longo do processo de cominuição. No estudo conduzido por Yamane (2012) sobre as amostras de PCI, uma perda de aproximadamente 29% foi obtida, empregando um moinho de martelo com uma grelha de 2,00 mm. Nesse estudo, o material foi alcançado com uma granulometria em torno de 140 *mesh* (~0,106 mm).

Apesar da presença de partículas finas nos resultados provenientes do triturador picador forrageiro adaptado, é possível sugerir que o processo de cominuição empregado neste trabalho demonstra uma eficiência superior. Isso é evidenciado pela obtenção de uma granulometria ainda menor para o material, reduzindo-o para um tamanho inferior a 325 *mesh* (~0,040 mm). Essa abordagem facilita a liberação dos componentes presentes nas placas de memória RAM devido à baixa ligação interfacial entre os materiais utilizados na fabricação dos dispositivos

eletrônicos. Geralmente, esses materiais são unidos por métodos como fixação, inserção, soldagem e empacotamento (VEIT, 2005; YAMANE, 2012).

Conseqüentemente, a energia necessária para separar os materiais, como cerâmicas, vidros e metais, que possuem propriedades mecânicas distintas e moderadas a suaves, é consideravelmente reduzida. Para alcançar uma liberação completa, especialmente no caso do cobre, é essencial atingir frações menores do que 2,00 mm (VEIT, 2005).

Pode-se observar por meio do fluxograma, um breve resumo de todo o trabalho, a demonstração do processo para que haja a caracterização dos componentes presentes nas memórias RAM, que se iniciou na trituração até a separação dos componentes magnéticos e não-magnéticos e suas respectivas análises de MEV-EDS, DRX e EDX (Figura 18).

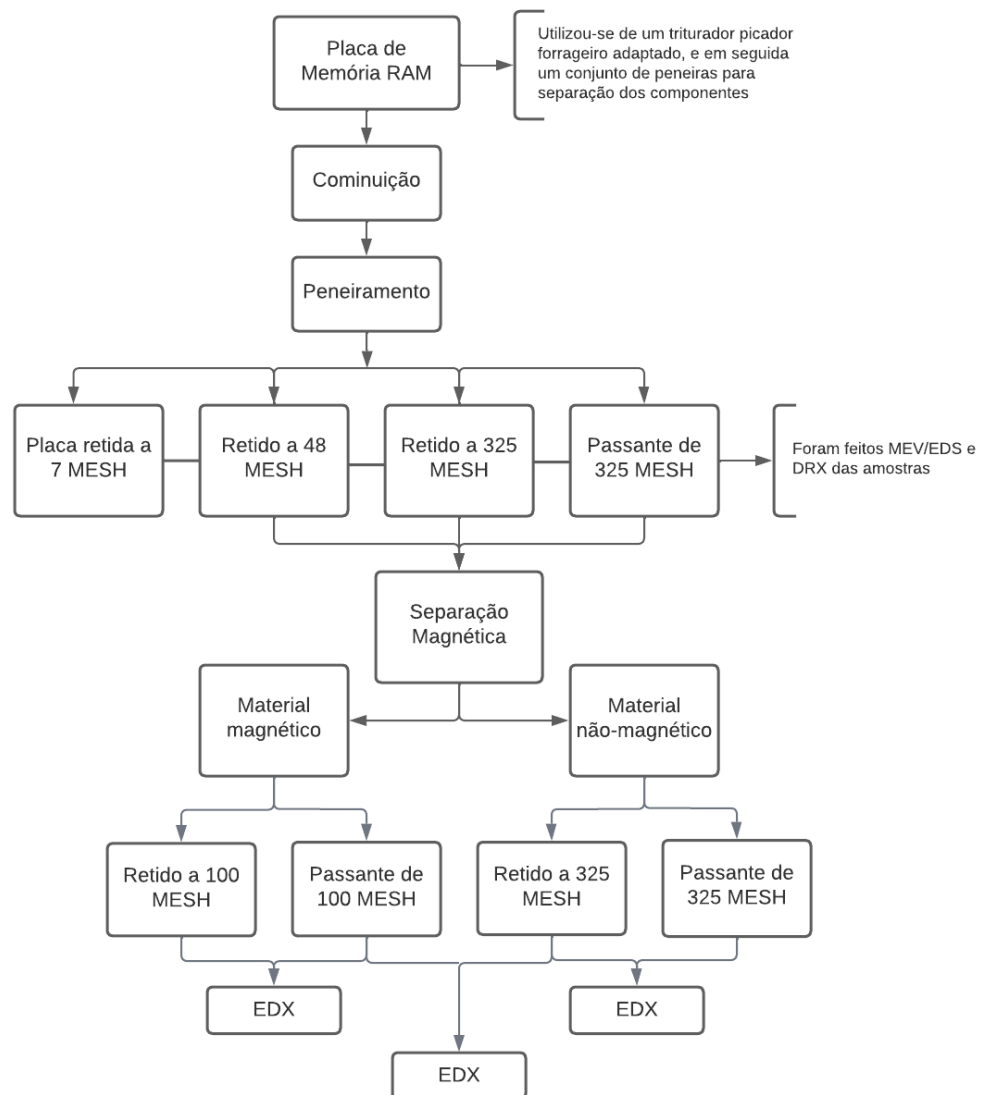


Figura 18 – Fluxograma da Memória RAM. (Dados da Pesquisa, 2023).

5.1. Desmontagem dos Gabinetes

No processo de desmontagem dos 281 gabinetes obsoletos provenientes do almoxarifado da Universidade Federal de Campina Grande – PB (*Campus Sede – Campina Grande*), foi instituído um sistema de banco de dados para catalogar cada gabinete e os componentes que o constituíam. Inicialmente, os gabinetes foram submetidos a pesagem, e posteriormente, foram desmontados. Durante o processo de desmontagem, cada item componente dos gabinetes foi individualmente pesado e devidamente separado para análise.

Os resultados obtidos ao final da desmontagem (Tabela 5 e Figura 19), apresentam de modo resumido, os pesos de ferro, plástico, leitor de CD/DVD, leitor de disquete, HD, fonte de energia, placa mãe, placas com ferro, memória RAM, alumínio, fios, ventoinhas e processadores, as quais foram obtidos com a desmontagem de 281 gabinetes obsoletos.

Tabela 5 – Quantificação de peso total e em porcentagem dos computadores inoperantes da UFCG.

COMPONENTES	PESO (KG)	PORCENTAGEM
Ferro	951,464	51,45%
Plástico	101,547	5,49%
Leitor CD/DVD	176,770	9,56%
Disquete	73,905	4%
Disco Rígido HD	78,106	4,22%
Fonte energia	191,640	10,36%
Placa mãe	133,481	7,22%
Placa com ferro	25,965	1,40%
Memória RAM	4,783	0,26%
Alumínio	51,790	2,80%
Fios	43,607	2,36%
Ventoinhas	22,498	1,22%
Processador	5,966	0,32%
TOTAL	1849,320	100%

Fonte: Dados da Pesquisa, 2022.

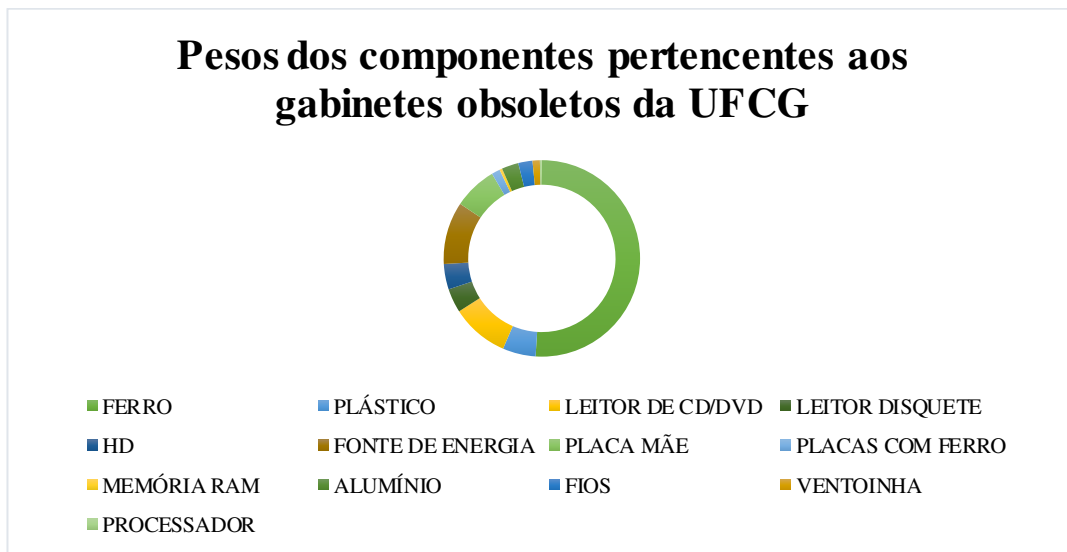


Figura 19 – Pesaagem dos componentes dos gabinetes obsoletos. (Dados da pesquisa, 2022).

5.2. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A partir do material que passou pelo processo de peneiramento, foram escolhidas quatro amostras, conforme ilustrado na Figura 20. Essas amostras foram designadas da seguinte forma: Amostra 1, correspondente à granulometria de 7 *mesh*; Amostra 2, correspondente à granulometria de 48 *mesh*; Amostra 3, correspondente à granulometria de 325 *mesh*; e Amostra 4, representando o material que passou pelas peneiras e possui uma granulometria inferior a 325 *mesh*. As amostras foram escolhidas com base em suas granulometrias e quantidades de material retido nas peneiras.



Figura 20 - Material utilizado - Amostra 1: 7 *mesh*; Amostra 2: 48 *mesh*; Amostra 3: 325 *mesh*; Amostra 4: Passante 325 *mesh*. (Dados da pesquisa, 2022).

Todas essas amostras foram submetidas a análises químicas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia de Energia Dispersiva (MEV-EDS) no CERTBIO (Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste) localizado na Universidade Federal de Campina Grande campus Campina Grande – PB. O objetivo dessas análises foi identificar, de forma semiquantitativa, os elementos presentes nas amostras analisadas (Figura 21). No CERTBIO – UFCG utiliza-se fitas de carbono, na qual, o material é fixado no porta amostras, possibilitando assim a condução da corrente elétrica.

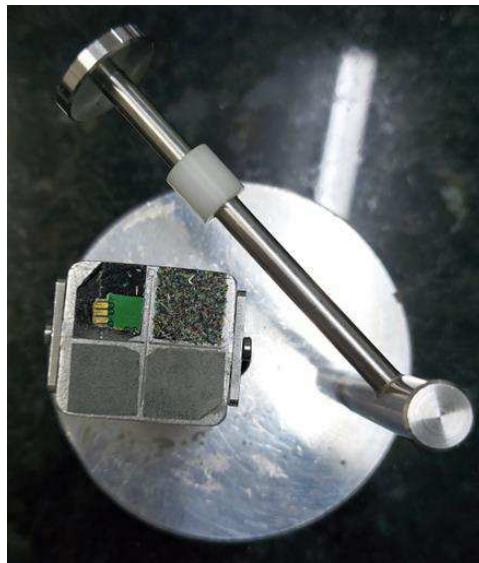


Figura 21 - Amostras analisadas no CERTBIO - UFCG. (Dados da pesquisa, 2022).

No caso das amostras em análise, o MEV-EDS foi empregado com ampliações de até 4.000 vezes, visando capturar detalhes das possíveis composições dos materiais, assim como suas respectivas morfologias, que variam para cada tipo de amostra. Além disso, a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizada para examinar os elementos presentes nas memórias RAM processadas. Nesse contexto, uma abordagem qualitativa foi adotada com o intuito de identificar os componentes por meio de imagens capturadas, bem como por meio das informações gerais e pontuais obtidas por EDS.

Foram feitas análises utilizando a microscopia eletrônica de varredura (MEV) das quatro amostras, descritas na Tabela 6 e observadas nas figuras abaixo. A placa bruta, encontra-se referenciada como A1 (Amostra 1 – Figura 22) com magnificações de 40 vezes, 1000 vezes, 2000 vezes e 4000 vezes, na qual pode-se perceber, visualmente, pontos de solda nas imagens, formatos irregulares e variações de tons de cinza. O retido de 48 *mesh* encontra-se referenciada como A2 (Amostra 2 – Figura 23) com magnificações de 100 vezes, 1000 vezes e 2000 vezes,

na qual pode-se perceber, visualmente, algo semelhante a fios e é perceptível formatos irregulares. O retido de 325 *mesh* encontra-se referenciada como A3 (Amostra 3 – Figura 24) com magnificações de 100 vezes, 1000 vezes, 2000 vezes e 4000 vezes, na qual pode-se perceber, visualmente, formatos semelhantes a filetes e grãos, é perceptível variações de tamanho e espessura. E o passante de 325 *mesh* encontra-se referenciada como A4 (Amostra 4 – Figura 25) com magnificações de 100 vezes, 1000 vezes e 2000 vezes, na qual pode-se perceber, visualmente, a presença de formatos semelhantes a filetes, esferas e formatos irregulares que possuem colorações mais claras à mais escuras.

Tabela 6 – Descrição das amostras referentes a memória RAM triturada.

AMOSTRAS	GRANULOMETRIA #	DESCRIÇÃO
Amostra 1	Retido a 7 <i>mesh</i>	A amostra 1 é uma parte da memória RAM que não foi totalmente triturada, na qual, ficou retida na peneira referente a 7 <i>mesh</i> (~2,83 mm de abertura).
Amostra 2	Retido a 48 <i>mesh</i>	A amostra 2 é uma parte da memória RAM que foi triturada, na qual, ficou retida na peneira referente a 48 <i>mesh</i> (~0,297 mm de abertura).
Amostra 3	Retido a 325 <i>mesh</i>	A amostra 3 é um pó fino da memória RAM que foi totalmente triturada, na qual, ficou retida na peneira referente a 325 <i>mesh</i> (~0,044 mm de abertura).
Amostra 4	Passante 325 <i>mesh</i>	A amostra 4 é o pó mais fino obtido na trituração da memória RAM, na qual, é o passante da peneira referente a 325 <i>mesh</i> (<0,044 mm de abertura), que ficou retido no prato.

Fonte: Dados da Pesquisa, 2022.

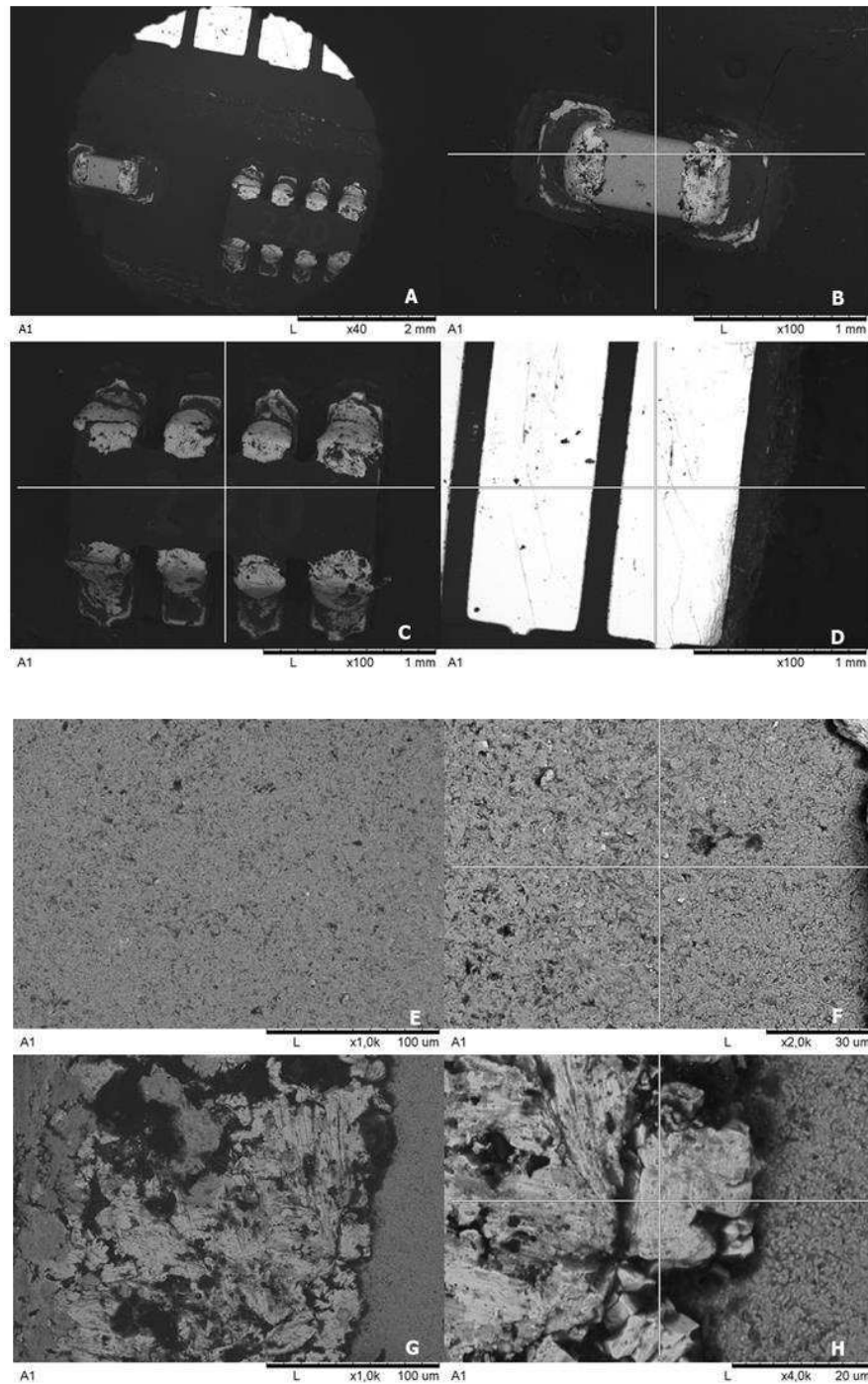


Figura 22 – Imagens de MEV referentes a Amostra 1, onde: A – magnificação de 40x; B – magnificação de 100x; C – magnificação de 100x; D – magnificação de 100x; E – magnificação de 1000x; F – magnificação de 2000x; G – magnificação de 1000x; H – magnificação de 4000x da memória RAM triturada (retida a 7 mesh). (Dados da Pesquisa, 2022)

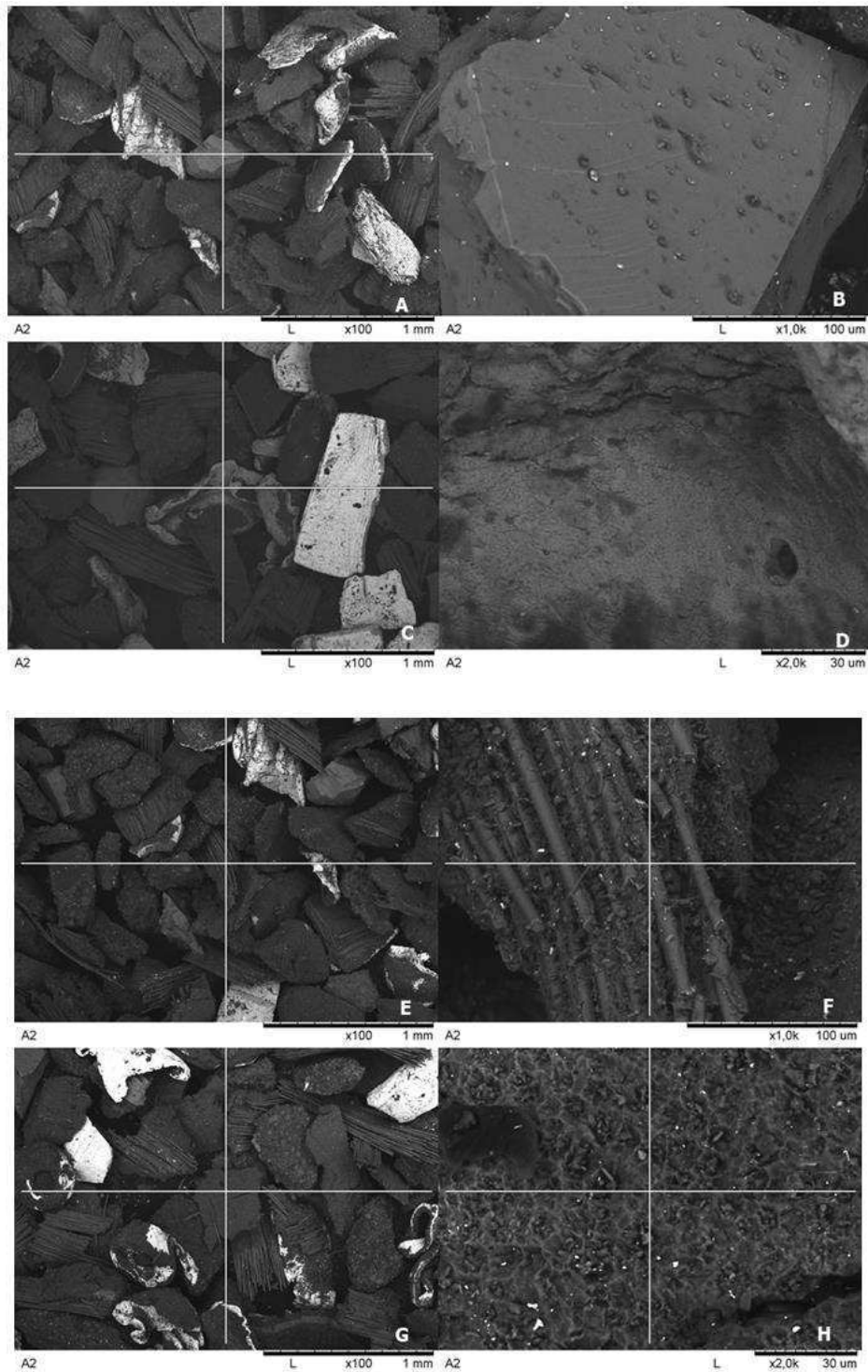


Figura 23 – Imagens de MEV referentes a Amostra 2, onde: A – magnificação de 100x; B – magnificação de 1000x; C – magnificação de 100x; D – magnificação de 2000x; E – magnificação de 100x; F – magnificação de 1000x; G – magnificação de 100x; H – magnificação de 2000x da memória RAM triturada (retida a 48 *mesh*). (Dados da Pesquisa, 2022).

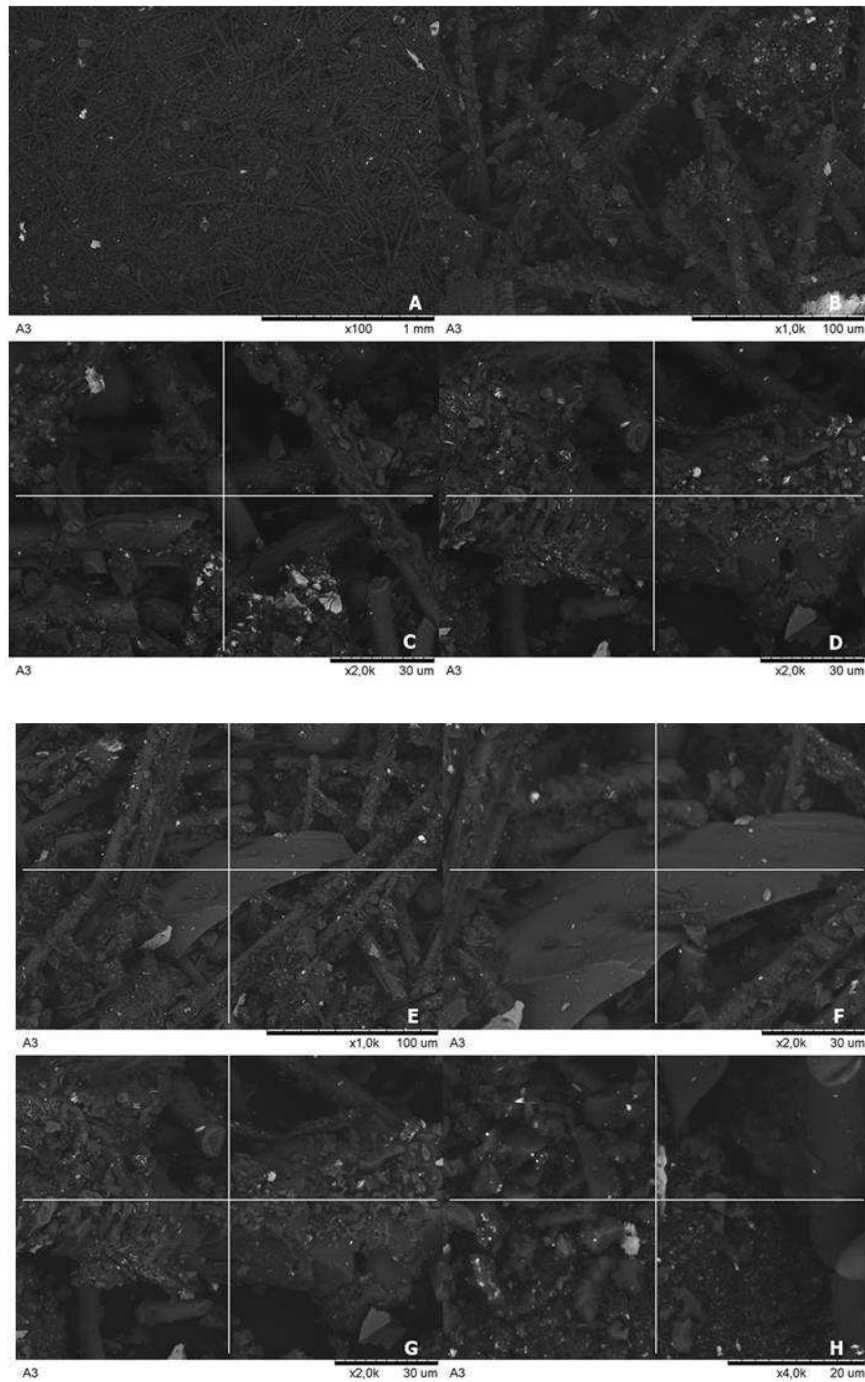


Figura 24 – Imagens de MEV referentes a Amostra 3, onde: A – magnificação de 100x; B – magnificação de 1000x; C – magnificação de 2000x; D – magnificação de 2000x; E – magnificação de 1000x; F – magnificação de 2000x; G – magnificação de 2000x; H – magnificação de 4000x da memória RAM triturada (retida a 325 *mesh*). (Dados da Pesquisa, 2022).

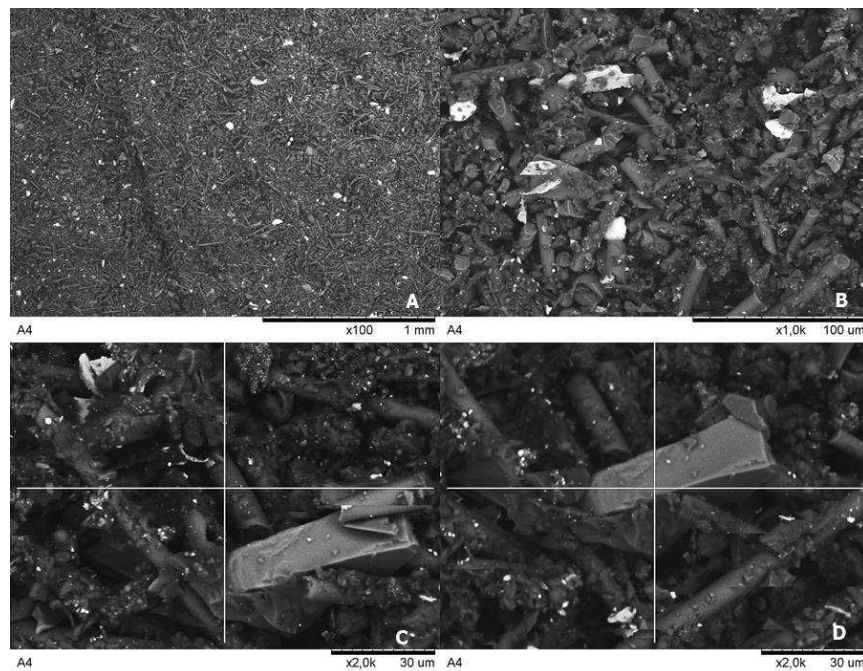


Figura 25 – Imagens de MEV referentes a Amostra 4, onde: A – magnificação de 100x; B – magnificação de 1000x; C – magnificação de 2000x; D – magnificação de 2000x da memória RAM triturada (passante de 325 *mesh*). (Dados da Pesquisa, 2022).

5.3. Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X – EDS

As imagens abaixo são referentes ao espectro de EDS geral com magnificação de 1000x das amostras 1, 2, 3 e 4. Pelo espectro de EDS da A1 GERAL 1000x (Amostra 1) pode-se observar que nessa amostra a placa de memória RAM tem em sua composição estanho, apresentando, 12,0% que provavelmente refere-se a alguma solda, seguida por carbono e oxigênio, que apresentam respectivamente, 59,6% e 22,8%, foi observado também a presença de cobre (2,9%), silício (2,2%) e alumínio (0,4%) (Figura 26), no espectro de EDS da A2 GERAL 1000x (Amostra 2) pode-se observar a presença de ouro (10,8%), cobre (22,0%), oxigênio (57,9%), referente a oxidação e 9,8% de silício que condiz, pela composição química, possivelmente com a fibra de vidro (Figura 27).

No espectro de EDS da A3 GERAL 1000x (Amostra 3) a presença de pode-se verificar, novamente, a fibra de vidro encontrada na placa de memória RAM, que a mesma é composta por silício (9,0%) e cálcio (2,5%) e que entre as camadas de fibra de vidro existe uma resina composta de alumínio (3,5%) e carbono (50,9%), e pela oxidação, também se encontra a presença de oxigênio (34,1%) (Figura 28). E por fim, o espectro de EDS da A4 GERAL 1000x (Amostra 4) apresentou em sua composição carbono (68,1%), oxigênio (20,4%), níquel (4,7%), silício (5,4%) e alumínio (1,3%) (Figura 29).

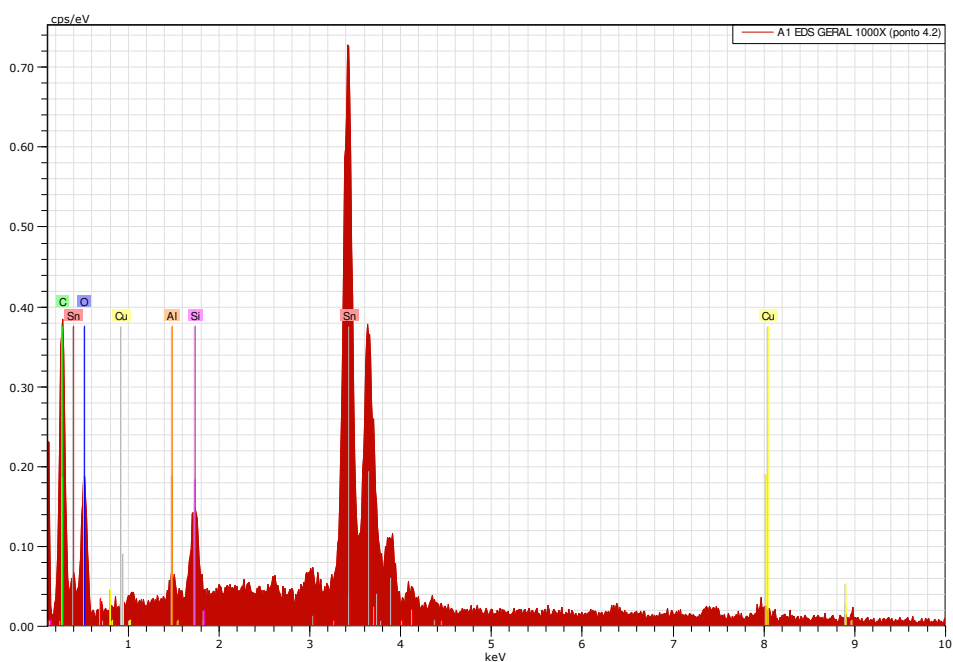


Figura 26– EDS geral referente a Amostra 1 com magnificação de 1000x. (Dados da Pesquisa, 2022).

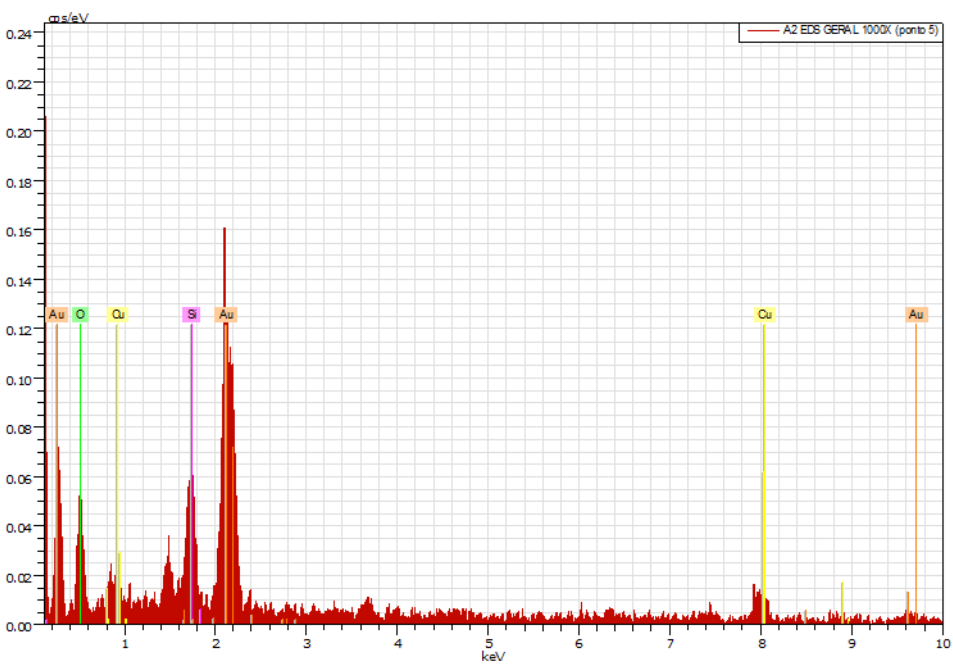


Figura 27– EDS geral referente a Amostra 2 com magnificação de 1000x. (Dados da Pesquisa, 2022).

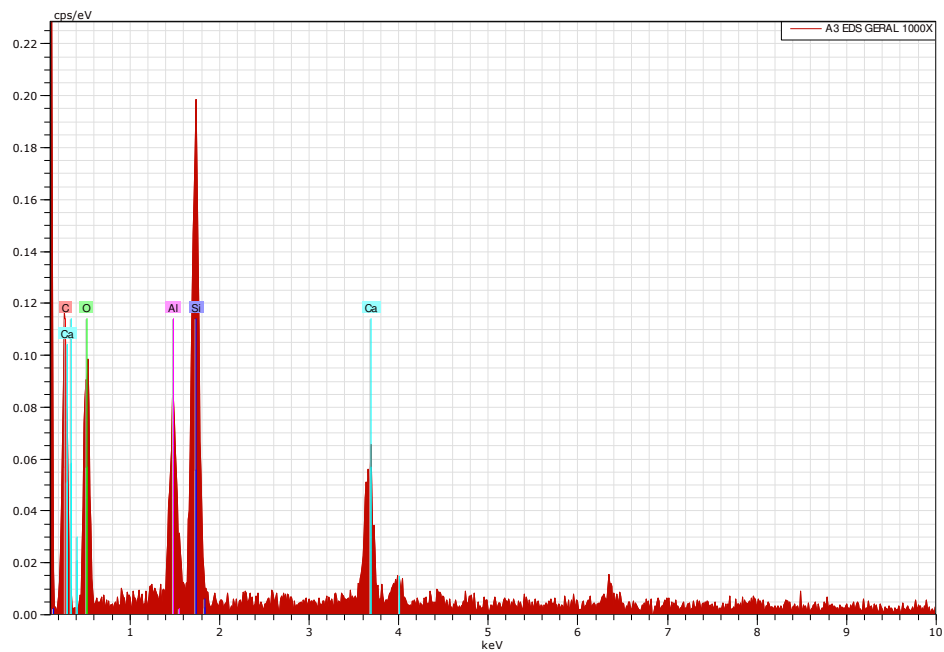


Figura 28 – EDS geral referente a Amostra 3 com magnificação de 1000x. (Dados da Pesquisa, 2022).

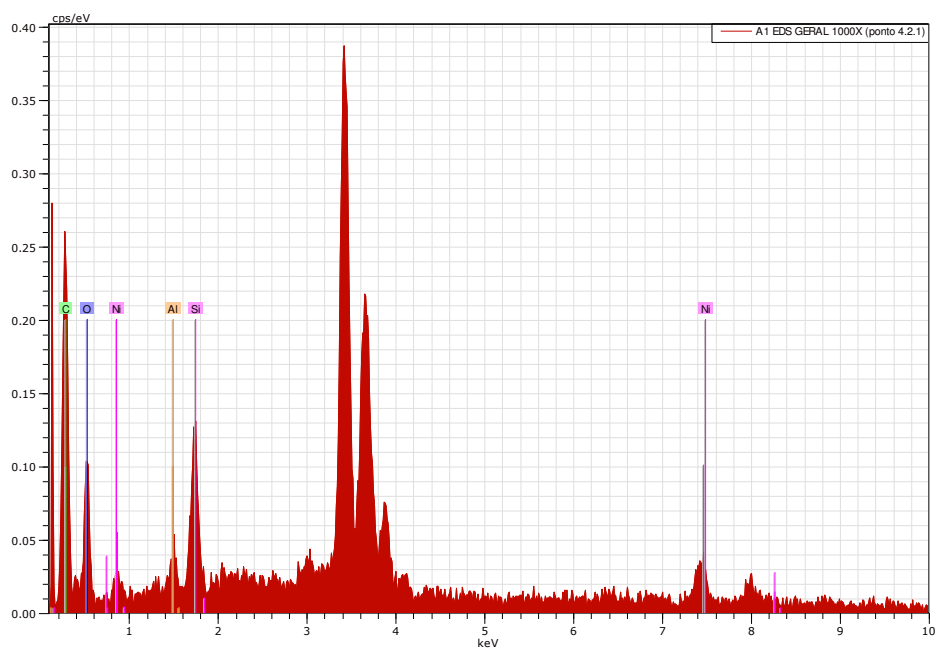


Figura 29 – EDS geral referente a Amostra 4 com magnificação de 1000x. (Dados da Pesquisa, 2022).

O objetivo primordial dessas análises consistiu em investigar a composição abrangente das placas de memória RAM, abordando tanto a porção magnética quanto a não-magnética. É relevante ressaltar que essas análises foram conduzidas antes da etapa de separação magnética, permitindo assim a comparação dos dados com outros métodos.

Ao final das análises realizadas por MEV-EDS nas quatro amostras com distintas granulometrias, foi observada a presença de oxigênio e silício em todas elas. No entanto, suas

concentrações apresentaram variações. Além disso, notou-se que os elementos identificados estavam mais concentrados nas amostras de granulometria mais grosseira, como exemplificado pela Amostra 2 (retida em 48 *mesh*). Também se evidenciou que o carbono prevalece na maioria das amostras, seguido de alumínio e cobre. Elementos como estanho, cálcio, ouro e níquel apareceram apenas em um único EDS geral, capturado em 1000 vezes a ampliação das amostras em análise.

Seguindo as observações de Veit (2005), uma parcela significativa do alumínio presente parece estar na forma de alumina, um composto cerâmico mais frágil e, por conseguinte, mais susceptível a trituração, concentrando-se em frações mais finas. Em relação ao estanho, sua presença se relaciona primordialmente com a solda empregada, sendo que a liberação desses metais deveria ser menos significativa, sendo mais propensos a se associar a elementos de frações mais finas.

5.4. Difração de Raios X – DRX

Para o ensaio de difração de raios-X foi analisado as mesmas amostras analisadas no MEV-EDS, sendo elas, três na forma de pó e uma parte da memória RAM retida na peneira a 7 *mesh*, a fim de analisar quantitativamente as amostras em questão.

Foi obtido após o DRX arquivos contendo os valores referentes ao 2Theta (2θ), a Intensidade (u.a) e a porcentagem de cristalografia de cada amostra. Inicialmente, esses dados foram inseridos no *software Origin 2023*, que geraram os gráficos referentes as amostras: 1 (Figura 30), 2 (Figura 33), 3 (Figura 35) e por fim, 4 (Figura 38). Os difratogramas foram plotados sem qualquer outro tratamento para sua normalização.

Analisando os difratogramas gerados pelo *software Origin 2023* foi perceptível que em todos os difratogramas apresentaram estados semelhantes a semicristalinos, já que todos eles possuem uma quantidade amorfa em sua estrutura. A cristalização de polímeros controla a estrutura macroscópica que podem apresentar regiões tanto amorfas como cristalinas, apresentando cadeias de forma ordenada e que possuem moléculas com estruturas química e geometricamente regulares, de acordo com Magalhães (2017). Também foi perceptível uma baixa intensidade, em todos os difratogramas, aproximadamente entre os ângulos 2θ de 15 e 30°, que não apresentaram picos.

No difratograma 1 (Figura 30), foi observado quatro picos bem evidenciados, e os resultados obtidos no MEV-EDS restringiram a busca na amostra 1 em dez elementos químicos, sendo eles: Ouro (Au), Alumínio (Al), Carbono (C), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Oxigênio (O),

Estanho (Sn), Silício (Si), Magnésio (Mg) e Manganês (Mn). Fazendo uma medição prévia foi obtido os valores de $2\theta_1 = 26,60^\circ$, seguido pelo valor de $2\theta_2 = 38,18^\circ$, $2\theta_3 = 43,29^\circ$ e por fim, $2\theta_4 = 50,43^\circ$. Esses valores ajudaram na identificação dos elementos químicos presentes nas memórias RAM, tendo em vista que, os mesmos foram confirmados, em partes, com os ensaios da espectroscopia de raios-X por dispersão em energia – EDX. Vale ressaltar que as intensidades variam de 200 até 307,14 u.a, que as mesmas indicam o grau de cristalização dos elementos presentes, e que segundo o cálculo de cristalinidade, calculado pelo próprio difratômetro de raios-X, a amostra 1 possui 60,2174% de cristalinidade.

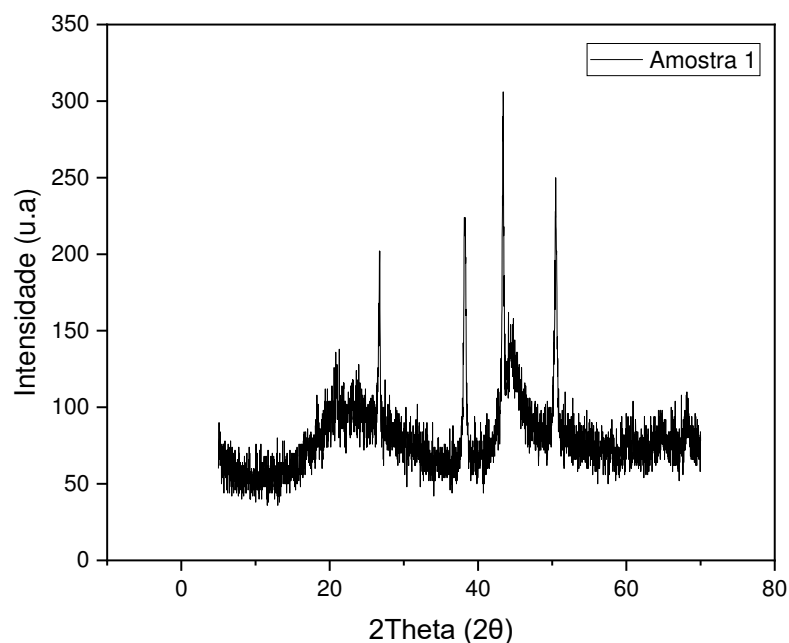
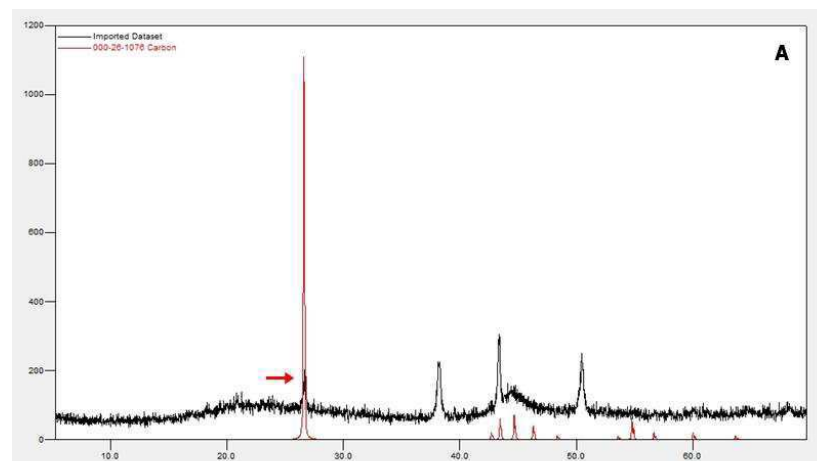


Figura 30 – Difratograma referente ao DRX da amostra 1. (Dados da Pesquisa, 2022).

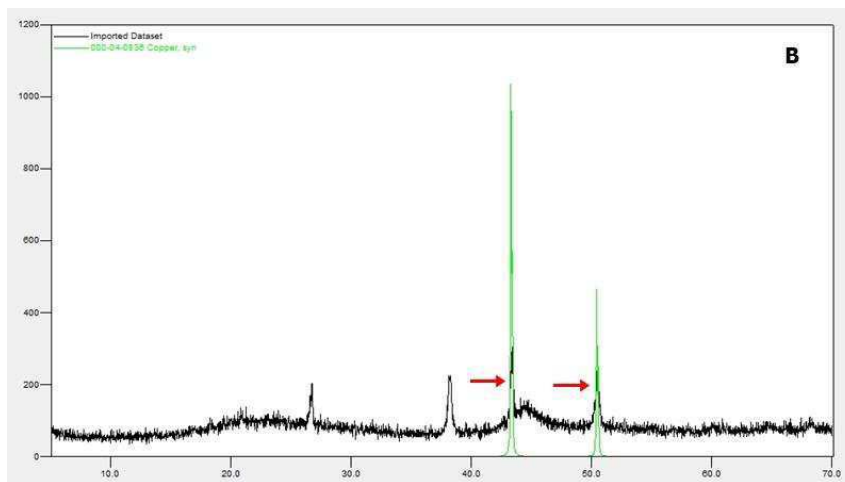
As análises de DRX foram feitas pelo *software Crystallographica Search–Match* que é um programa de pesquisa, na qual possuem um banco de dados PDF–2 do *International Center for Diffraction Data*, que é um algoritmo de pesquisa para identificação multifásica, pesquisa usando dados brutos, dados de pico ou uma combinação dos dois, e foi a ferramenta utilizada para identificar os picos presentes em cada amostra em questão (J. APPL. CRISTAL, 1997).

Foram identificados três elementos químicos na amostra 1 com 6 picos, na qual, visualmente foram identificados 4 picos (Figura 31), e por meio das análises feitas pelo *software Crystallographica Search–Match*, que geraram os seguintes resultados: inicialmente, foi encontrado o elemento químico Carbono (C), que apresentou um pico em 2θ no valor de

26,6026° e d no valor de 3,3480 identificado por (A), e os demais picos do Carbono (C) apresentados são mais discretos. Já (B) apresenta o elemento Cobre (Cu), que foi observado em 2 picos, sendo eles 2θ nos valores de 43,2966° e 50,4330° e d , respectivamente, nos valores de 2,0880 u.a e 1,8080 u.a., e por fim, (C) apresenta o elemento Ouro (Au), observado em 3 picos, sendo eles, 2θ nos valores de 38,1836°, 44,3917° e 64,5759° e d , respectivamente, nos valores de 2,3550 u.a, 2,0390 u.a e 1,4420 u.a.

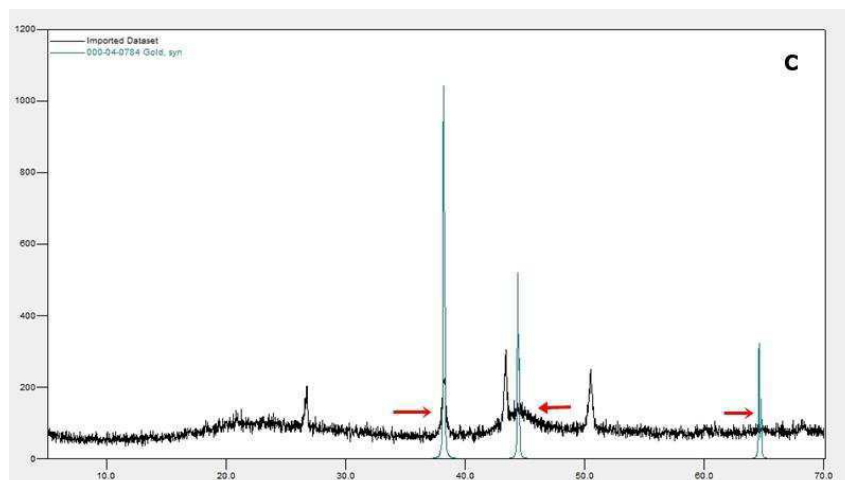


PeakList					
h	k	l	d	2theta	I
0	0	6	3.3480	26.6026	100
1	0	1	2.1150	42.7165	2
1	0	2	2.0810	43.4496	6
1	0	3	2.0270	44.6686	7
1	0	4	1.9590	46.3076	4
1	0	5	1.8800	48.3749	1
1	0	7	1.7090	53.5797	1
0	0	12	1.6740	54.7927	6
1	0	8	1.6230	56.6670	2
1	0	9	1.5400	60.0241	2
1	0	10	1.4600	63.6854	1
1	1	0	1.2280	77.6971	4
1	1	6	1.1530	83.8359	6
0	0	18	1.1160	87.2943	1
1	1	12	0.9902	102.1380	4
0	0	24	0.8370	133.9361	1
1	1	18	0.8259	137.7052	4
2	1	3	0.7982	149.6021	1



PeakList

h	k	l	d	2theta	I
1	1	1	2.0880	→ 43.2966	100
2	0	0	1.8080	→ 50.4330	46
2	2	0	1.2780	74.1303	20
3	1	1	1.0900	89.9307	17
2	2	2	1.0436	95.1394	5
4	0	0	0.9038	116.9185	3
3	3	1	0.8293	136.5068	9
4	2	0	0.8083	144.7138	8



PeakList

h	k	l	d	2theta	I
1	1	1	2.3550	→ 38.1836	100
2	0	0	2.0390	→ 44.3917	52
2	2	0	1.4420	→ 64.5759	32
3	1	1	1.2300	77.5471	36
2	2	2	1.1774	81.7212	12
4	0	0	1.0196	98.1334	6
3	3	1	0.9358	110.7976	23
4	2	0	0.9120	115.2593	22
4	2	2	0.8325	135.4156	23

Figura 31 – Resultados obtidos através das análises de DRX no *software Crystallographica Search-Match* para a amostra 1. Dados de (A) apresentam o elemento Carbono (C); Dados de (B) apresentam o elemento Cobre (Cu); Dados de (C) apresentam o elemento Ouro (Au). (Dados da Pesquisa, 2022).

O difratograma referente a amostra 1 (Figura 32 – retido a 7 *mesh*) revelou que a posição angular dos picos depende das fases cristalinas da amostra, as intensidades dos picos estão relacionadas com a abundância de cada fase presente na amostra, assim como as larguras dos picos estão relacionadas com os tamanhos dos cristalinos, como pode-se observar na figura. A relação entre a estrutura cristalina e o difratograma é direta, tendo em vista que, graças a MEV-EDS tinha-se um campo de busca direcionado a 10 elementos químicos, permitindo assim, uma busca mais ágil.

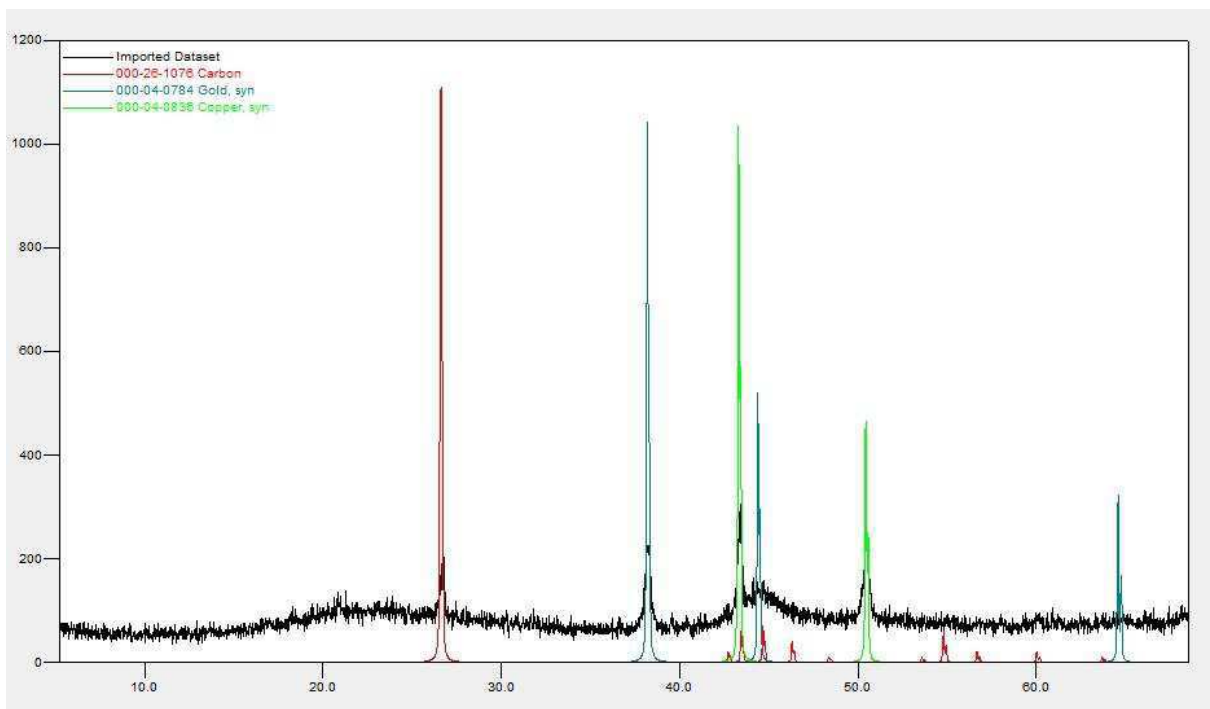


Figura 32 – Difratograma representando os principais picos e seus respectivos elementos químicos da amostra 1. (Dados da Pesquisa, 2022)

No difratograma 2 (Figura 33), foi observado dois picos bem evidenciados, e os resultados obtidos no MEV-EDS restringiram a busca na amostra 2 em oito elementos químicos, sendo eles: Ouro (Au), Alumínio (Al), Carbono (C), Cálcio (Ca), Cobre (Cu), Oxigênio (O), Silício (Si) e Magnésio (Mg). Fazendo uma medição prévia foi obtido os valores de $2\theta_1 = 43,32^\circ$ e $2\theta_2 = 50,45^\circ$. Esses valores ajudaram na identificação dos elementos químicos presentes nas memórias RAM, tendo em vista que, os mesmos foram confirmados, em partes, com os ensaios de EDX. Vale ressaltar que as intensidades variam de 267,86 até 496,43 u.a, que as mesmas indicam o grau de cristalização dos elementos presentes, e que segundo o cálculo de cristalinidade, calculado pelo próprio difratômetro de raios-X, a amostra 2 possui 48,2232% de cristalinidade.

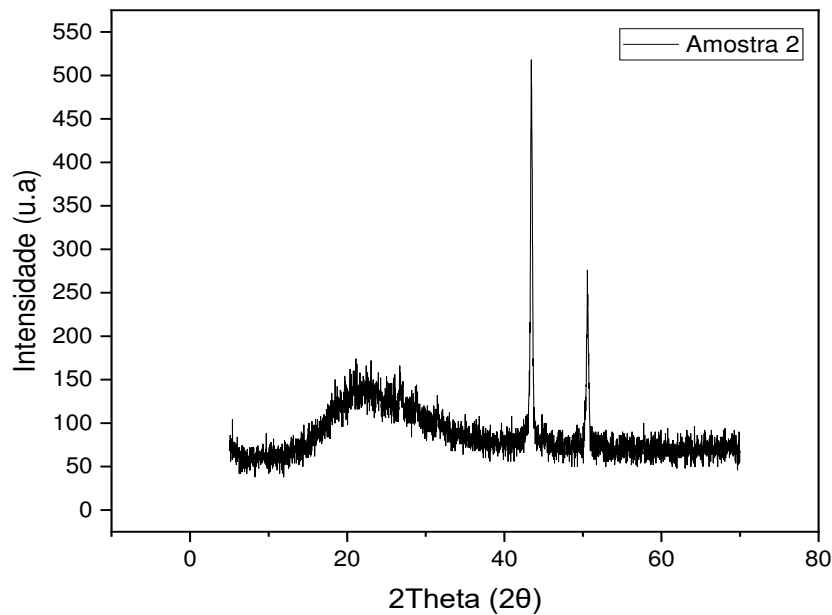
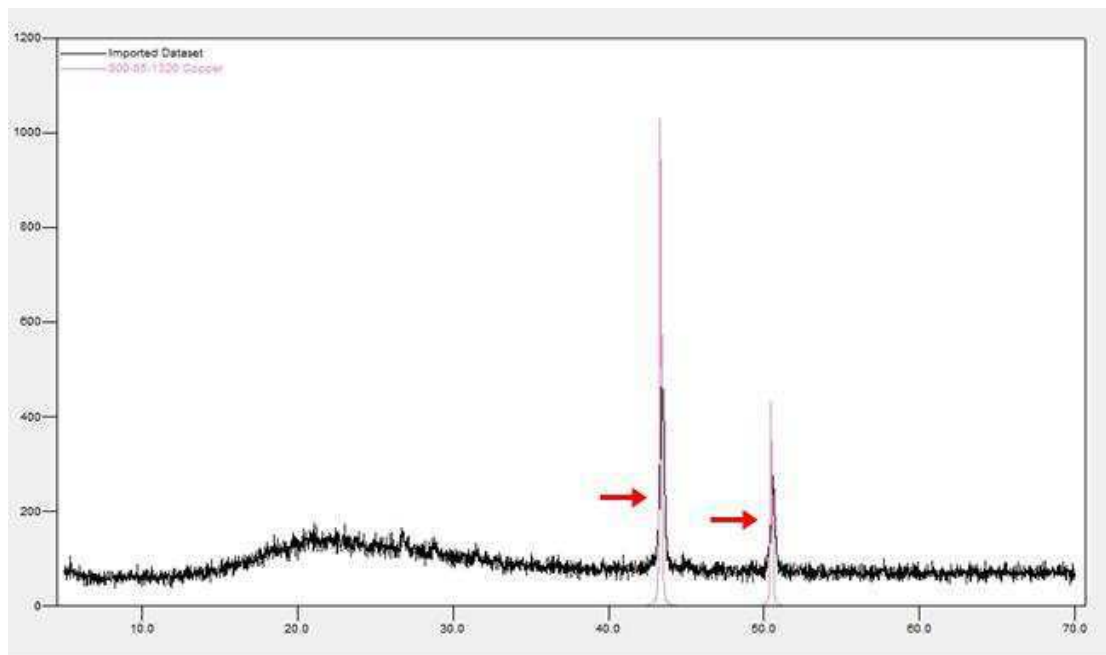


Figura 33 – Difratograma referente ao DRX da Amostra 2. (Dados da Pesquisa, 2022).

Foi identificado apenas um elemento químico em destaque na amostra 2 com 2 picos principais condizentes com os picos observados visualmente (Figura 34), por meio das análises feitas pelo *software Crystallographica Search-Match*, que apresentou o elemento Cobre (Cu) em 2 picos bem distintos, sendo eles 2θ nos valores de $43,3158^\circ$ e $50,4479^\circ$ e d , respectivamente, nos valores de 2,0871 u.a e 1,8075 u.a.

O difratograma referente a amostra 2 (Figura 34 – retido a 48 *mesh*) de pó revelou que a posição angular dos picos depende das fases cristalinas da amostra, as intensidades dos picos estão relacionadas com a abundância de cada fase presente na amostra, assim como as larguras dos picos estão relacionadas com os tamanhos dos cristalinos, como pode-se observar na figura. E a relação entre a estrutura cristalina e o difratograma é direta, tendo em vista que, graças a MEV-EDS tinha-se um campo de busca direcionado a 8 elementos químicos, permitindo assim, uma busca mais ágil.



PeakList						
h	k	l	d	2theta	I	
1	1	1	2.0871	→ 43.3158	999	
2	0	0	1.8075	→ 50.4479	427	
2	2	0	1.2781	74.1236	171	
3	1	1	1.0900	89.9349	156	

Figura 34 – Resultados obtidos através das análises de DRX no *software Crystallographica Search-Match* para a amostra 2. Dados apresentam o elemento Cobre (Cu). (Dados da Pesquisa, 2022).

No difratograma 3 (Figura 35), foi observado um pico bem evidenciado, e os resultados obtidos no MEV-EDS restringiram a busca na amostra 3 em oito elementos químicos, sendo eles: Alumínio (Al), Bário (Ba), Carbono (C), Cálcio (Ca), Oxigênio (O), Silício (Si), Magnésio (Mg) e Nióbio (Nb). Fazendo uma medição prévia foi obtido o valor de $2\theta_1 = 56,118^\circ$. Esses valores ajudaram na identificação dos elementos químicos presentes nas memórias RAM, tendo em vista que, os mesmos foram confirmados, em partes, com os ensaios de EDX. Vale ressaltar que a intensidade foi no valor de 1021,43 u.a, que a mesma indica o grau de cristalização do elemento presente, e que segundo o cálculo de cristalinidade, calculado pelo próprio difratômetro de raios-X, a amostra 3 possui 48,0437% de cristalinidade.

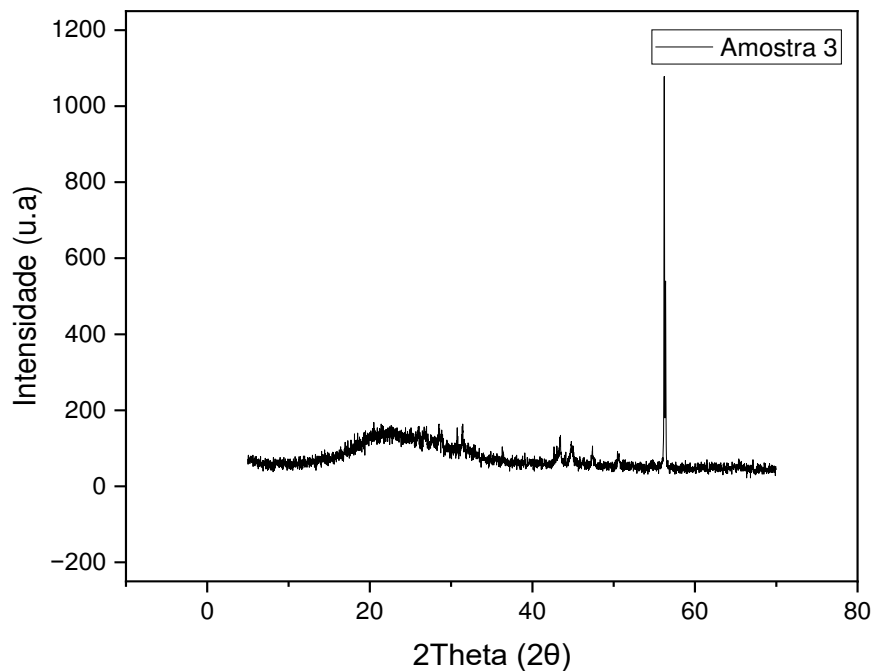
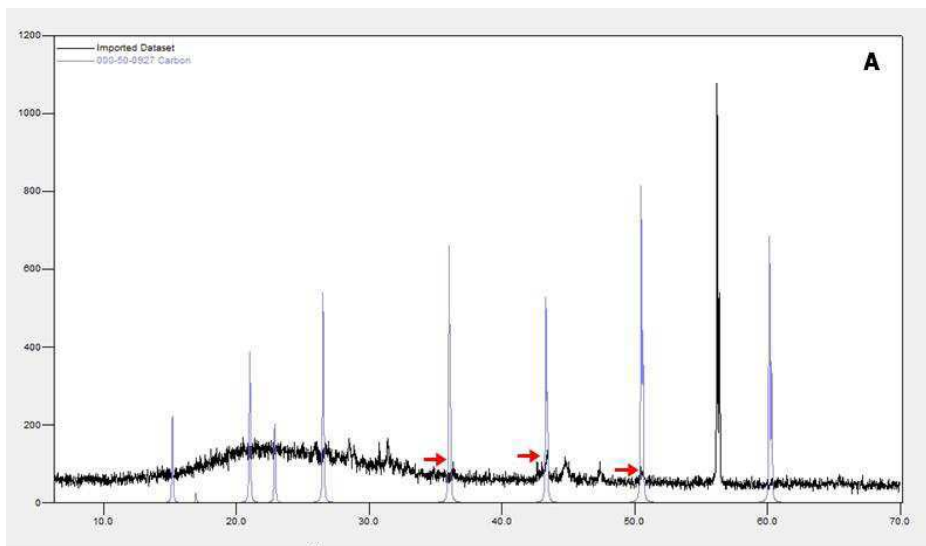


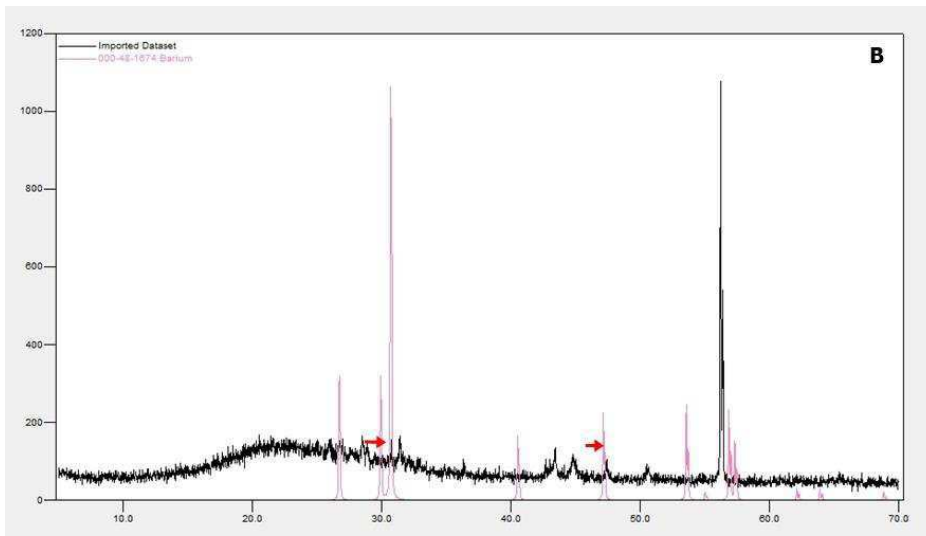
Figura 35 – Difratograma referente ao DRX da Amostra 3. (Dados da Pesquisa, 2022).

Foram identificados quatro elementos químicos com 9 picos na amostra 3, porém apenas 1 pico foi possível identificar visualmente (Figura 36), por meio das análises feitas pelo *software Crystallographica Search-Match*, que geraram os seguintes resultados: inicialmente, foi encontrado o elemento químico Carbono (C), que apresentou três picos em 2θ nos valores respectivos de $36,0251^\circ$, $43,3184^\circ$ e $50,4928^\circ$ e d nos valores de 2,4910 u.a, 2,0870 u.a e 1,8060 u.a, identificados por (A), e os demais picos do Carbono (C) apresentados são mais discretos. Já (B) apresenta o elemento Bário (Ba), que foi observado em 2 picos, sendo eles 2θ nos valores de $30,6887^\circ$ e $47,1460^\circ$ e d , respectivamente, nos valores de 2,9109 u.a e 1,9261 u.a, (C) representa o elemento Alumínio (Al), que apresentou um pico em 2θ no valor de $44,7384^\circ$ e d no valor de 2,0240 u.a, e por fim, (D) apresenta o elemento Sílicio (Si), observado em 3 picos, sendo eles, 2θ nos valores de $28,4422^\circ$, $47,3023^\circ$ e $56,1205^\circ$ e d , respectivamente, nos valores de 3,1355 u.a, 1,9201 u.a e 1,6375 u.a.



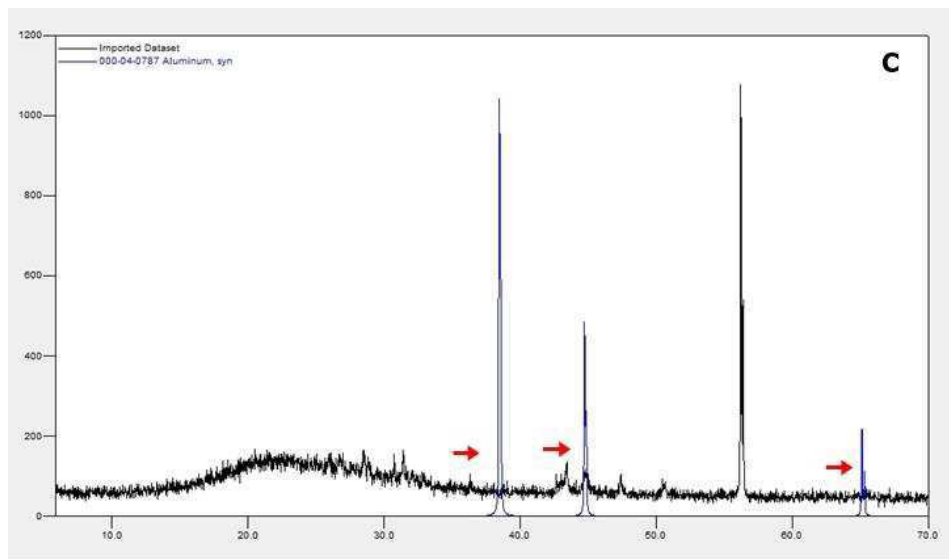
PeakList

h	k	l	d	2theta	I
1	1	0	5.8310	15.1820	17
0	0	3	5.2260	16.9518	2
2	0	2	4.2260	21.0042	32
1	1	3	3.8820	22.8896	17
3	0	0	3.3580	26.5219	48
4	0	1	2.4910	36.0251	63
3	1	5	2.0870	43.3184	51
5	1	1	1.8060	50.4928	81
1	6	1	1.5370	60.1533	68
4	5	2	1.2770	74.1981	100



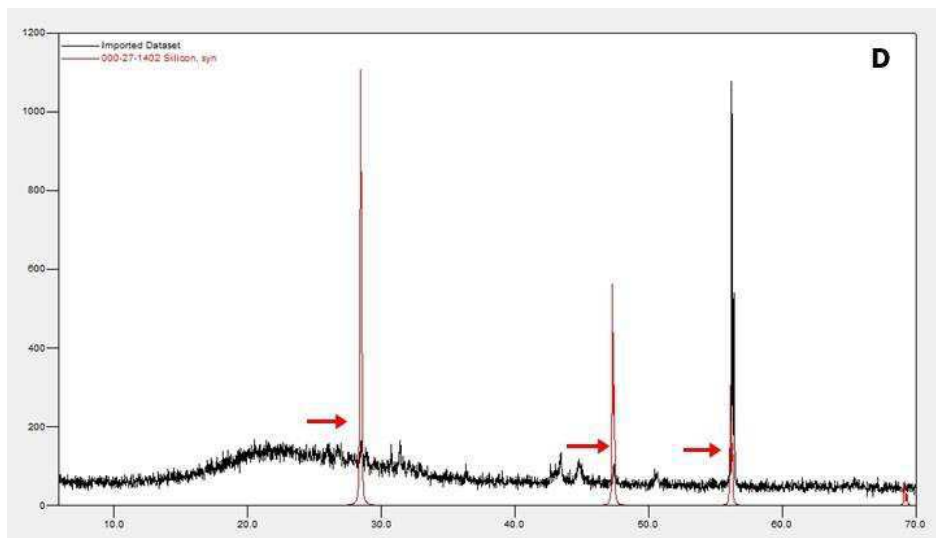
PeakList

h	k	l	d	2theta	I
1	0	0	3.3345	26.7123	28
0	0	2	2.9851	29.9078	29
1	0	1	2.9109	30.6887	100
1	0	2	2.2244	40.5207	16
1	1	0	1.9261	47.1460	22
1	0	3	1.7096	53.5594	24
2	0	0	1.6677	55.0172	2
1	1	2	1.6183	56.8465	23
2	0	1	1.6064	57.3064	15
0	0	4	1.4932	62.1097	3
2	0	2	1.4559	63.8859	3
1	0	4	1.3629	68.8292	2
2	0	3	1.2785	74.0965	2
2	1	0	1.2604	75.3439	1
2	1	1	1.2336	77.2787	3



PeakList

h	k	l	d	2theta	I
1	1	1	2.3380	→ 38.4721	100
2	0	0	2.0240	→ 44.7384	47
2	2	0	1.4310	→ 65.1334	22
3	1	1	1.2210	78.2272	24
2	2	2	1.1690	82.4354	7
4	0	0	1.0124	99.0776	2
3	3	1	0.9289	112.0413	8
4	2	0	0.9055	116.5688	8
4	2	2	0.8266	137.4550	8



PeakList

h	k	l	d	2theta	I
1	1	1	3.1355	→ 28.4422	100
2	2	0	1.9201	→ 47.3023	55
3	1	1	1.6375	→ 56.1205	30
4	0	0	1.3577	69.1301	6
3	3	1	1.2459	76.3772	11
4	2	2	1.1086	88.0261	12
5	1	1	1.0452	94.9477	6
4	4	0	0.9600	106.7150	3
5	3	1	0.9180	114.0872	7
6	2	0	0.8587	127.5409	8
5	3	3	0.8282	136.8900	3

Figura 36 – Resultados obtidos através das análises de DRX no *software Crystallographica Search-Match* para a amostra 3. Dados de (A) apresentam o elemento Carbono (C); Dados de (B) apresentam o elemento Bário (Ba); Dados de (C) apresentam o elemento Alumínio (Al) e Dados de (D) apresentam o elemento Sílicio (Si). (Dados da Pesquisa, 2022).

O difratograma referente a amostra 3 (Figura 37 – retido a 325 *mesh*) revelou que a posição angular dos picos depende das fases cristalinas da amostra, as intensidades dos picos estão relacionadas com a abundância de cada fase presente na amostra, assim como as larguras dos picos estão relacionadas com os tamanhos dos cristalinos, como pode-se observar na figura. A relação entre a estrutura cristalina e o difratograma é direta, tendo em vista que, graças a MEV-EDS tinha-se um campo de busca direcionado a 8 elementos químicos, permitindo assim, uma busca mais ágil.

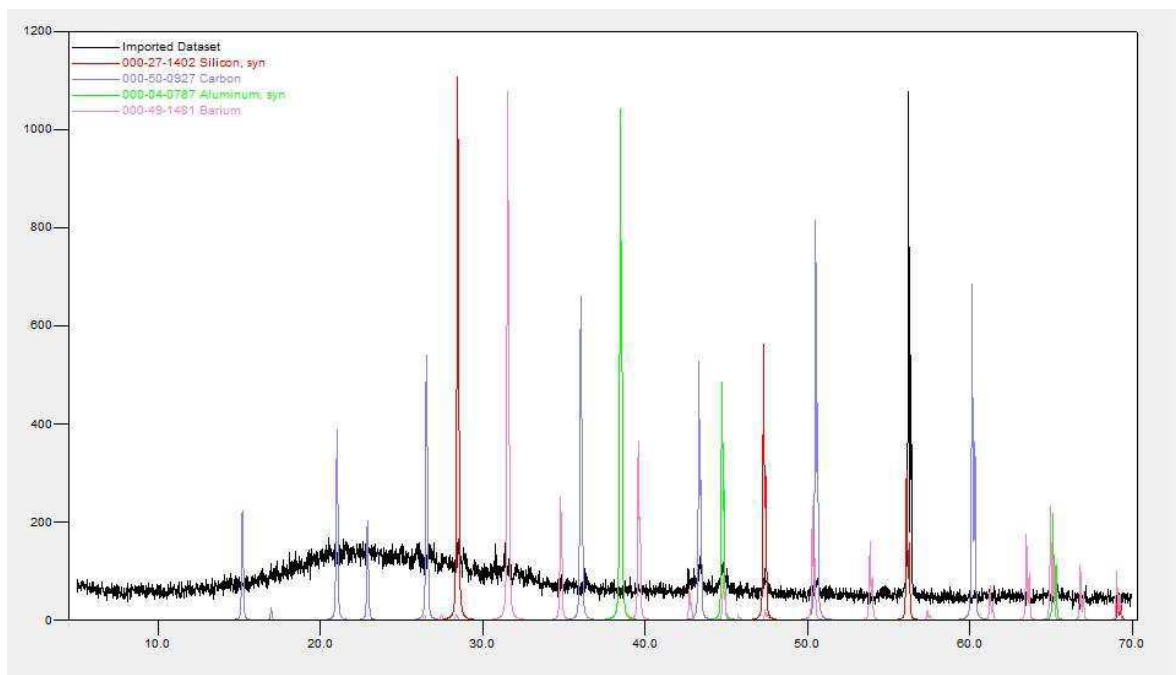


Figura 37 – Difratograma representando os principais picos e seus respectivos elementos químicos da amostra 3. (Dados da Pesquisa, 2022)

No difratograma 4 (Figura 38), foi observado 7 picos evidenciados, e os resultados obtidos no MEV-EDS restringiram a busca na amostra 4 em nove elementos químicos, sendo eles: Alumínio (Al), Carbono (C), Cálcio (Ca), Cromo (Cr), Oxigênio (O), Estanho (Sn), Silício (Si), Magnésio (Mg) e Níquel (Ni). Fazendo uma medição prévia foi obtido os valores de $2\theta_1 = 28,45^\circ$, seguido pelos valores de $2\theta_2 = 31,41^\circ$, $2\theta_3 = 43,46^\circ$, $2\theta_4 = 43,51^\circ$, $2\theta_5 = 44,75^\circ$, $2\theta_6 = 47,35^\circ$, e por fim, $2\theta_7 = 56,18^\circ$. Esses valores ajudaram na identificação dos elementos químicos presentes nas memórias RAM, tendo em vista que, os mesmos foram confirmados, em partes, com os ensaios de EDX. Vale ressaltar que as intensidades variam de 135,71 até 371,43 u.a, que as mesmas indicam o grau de cristalização dos elementos presentes, e que segundo o cálculo de cristalinidade, calculado pelo próprio difratômetro de raios-X, a amostra 1 possui 44,2958% de cristalinidade.

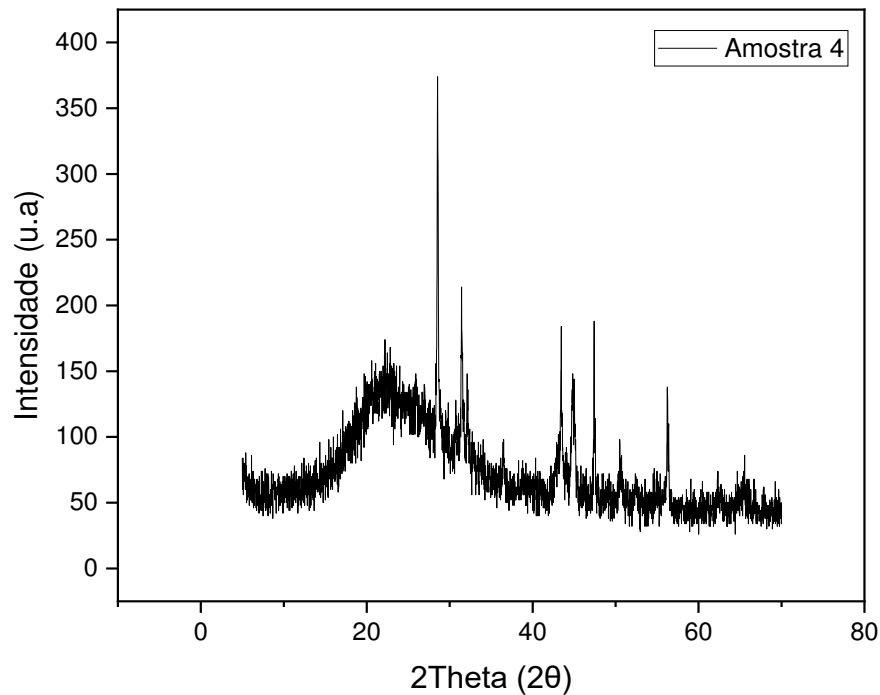
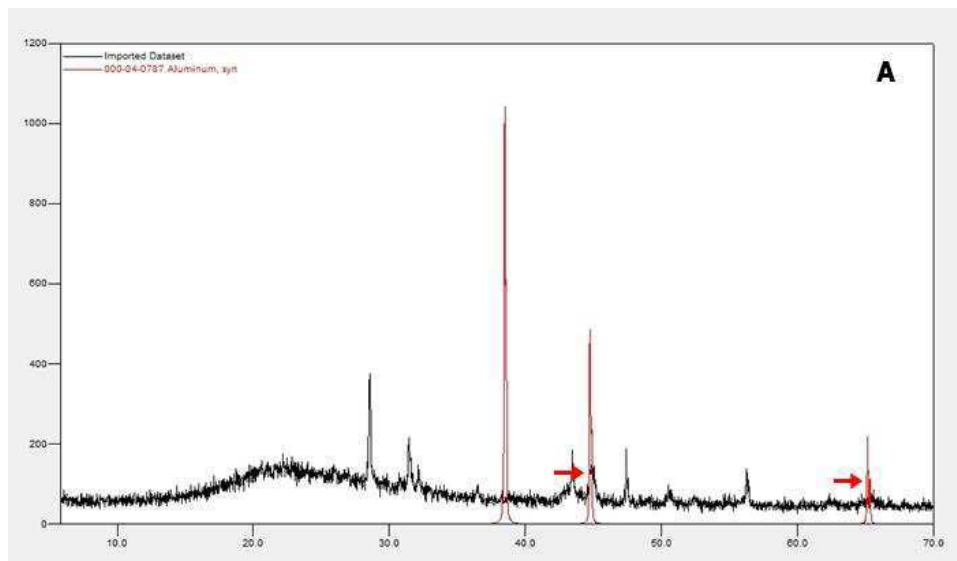


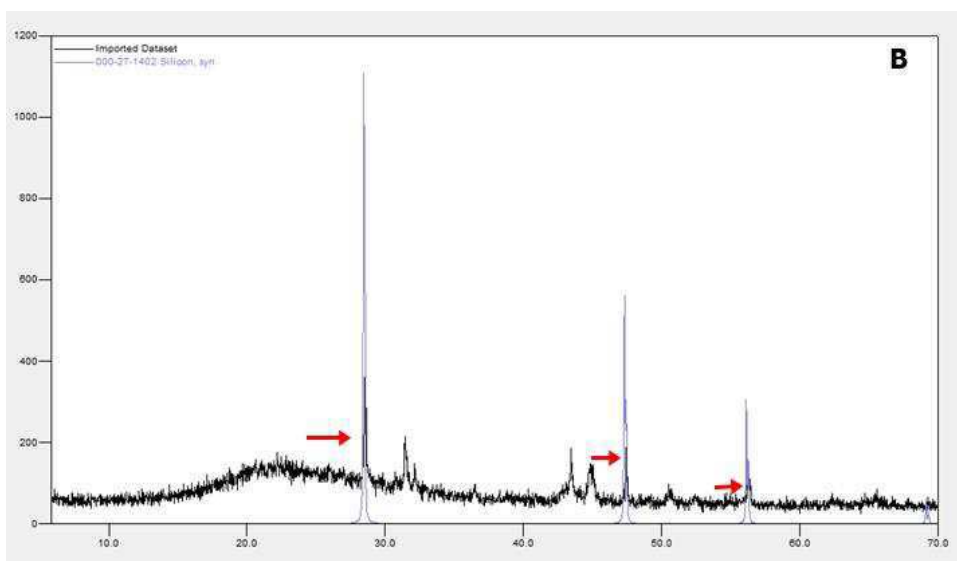
Figura 38 – Difratograma referente ao DRX da Amostra 4. (Dados da Pesquisa, 2022).

Foram identificados três elementos químicos na amostra 4 (Figura 39) por meio das análises feitas pelo *software Crystallographica Search–Match*, que geraram os seguintes resultados: inicialmente, foi encontrado o elemento químico Alumínio (Al), que apresentou dois picos em 2θ nos valores de $44,7384^\circ$ e $65,1334^\circ$ e d nos valores de 2,0240 u.a e 1,4310 u.a identificados por (A). Já (B) apresenta o elemento Silício (Si), que foi observado em 3 picos, sendo eles 2θ nos valores de $28,4422^\circ$, $47,3023^\circ$ e $56,1205^\circ$ e d , respectivamente, nos valores de 3,1355 u.a, 1,9201 u.a e 1,6375 u.a., e por fim, (C) apresenta o elemento Estanho (Sn), observado em 1 pico, sendo ele, 2θ no valor de $44,9021^\circ$ e d no valor de 2,0170 u.a. Na amostra em questão, 2 picos não foram possíveis de serem identificados, os mesmos apresentam 2θ nos valores de $31,420^\circ$ e $43,490^\circ$ e d nos valores de 2,8430 u.a e 2,0792 u.a.



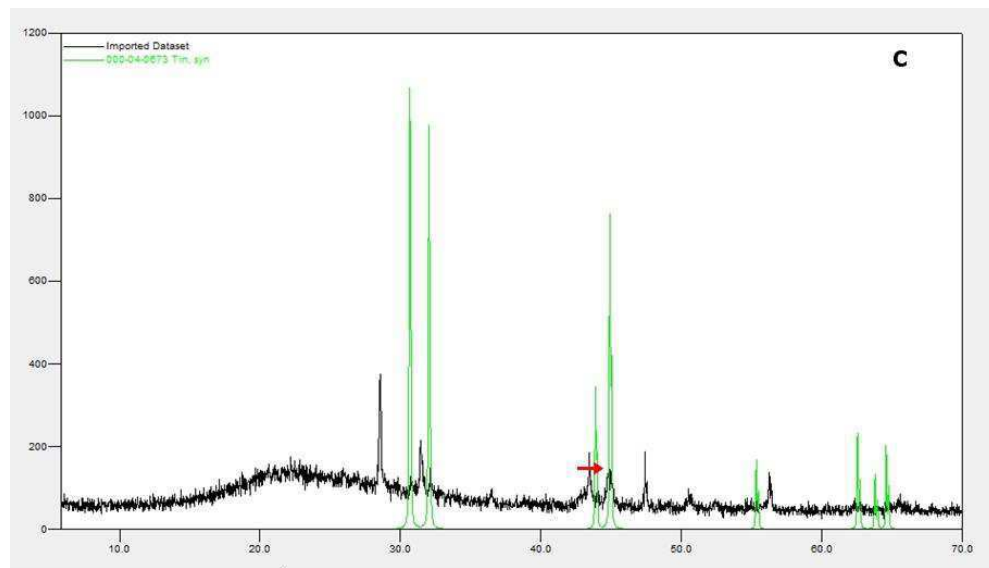
PeakList

h	k	l	d	2theta	I
1	1	1	2.3380	38.4721	100
2	0	0	2.0240	→ 44.7384	47
2	2	0	1.4310	→ 65.1334	22
3	1	1	1.2210	78.2272	24
2	2	2	1.1690	82.4354	7
4	0	0	1.0124	99.0776	2
3	3	1	0.9289	112.0413	8
4	2	0	0.9055	116.5688	8
4	2	2	0.8266	137.4550	8



PeakList

h	k	l	d	2theta	I
1	1	1	3.1355	→ 28.4422	100
2	2	0	1.9201	→ 47.3023	55
3	1	1	1.6375	→ 56.1205	30
4	0	0	1.3577	69.1301	6
3	3	1	1.2459	76.3772	11
4	2	2	1.1086	88.0261	12
5	1	1	1.0452	94.9477	6
4	4	0	0.9600	106.7150	3
5	3	1	0.9180	114.0872	7
6	2	0	0.8587	127.5409	8
5	3	3	0.8282	136.8900	3



h	k	l	d	2theta	I
2	0	0	2.9150	30.6444	100
1	0	1	2.7930	32.0181	90
2	2	0	2.0620	43.8706	34
2	1	1	2.0170	44.9021	74
3	0	1	1.6590	55.3303	17
1	1	2	1.4840	62.5350	23
4	0	0	1.4580	63.7831	13
3	2	1	1.4420	64.5759	20
4	2	0	1.3040	72.4142	15
4	1	1	1.2920	73.1953	15
3	1	2	1.2050	79.4698	20
4	3	1	1.0950	89.4092	13
1	0	3	1.0434	95.1635	3
3	3	2	1.0401	95.5621	5
4	4	0	1.0309	96.6954	2
5	2	1	1.0252	97.4142	5
2	1	3	0.9824	103.2713	5
6	0	0	0.9718	104.8644	2
3	0	3	0.9310	111.6587	3
5	1	2	0.9286	112.0962	13
6	2	0	0.9219	113.3432	5
6	1	1	0.9178	114.1258	5
3	2	3	0.8868	120.5942	4
5	4	1	0.8755	123.2406	2
4	1	3	0.8485	130.4099	4
5	3	2	0.8466	130.9696	10
6	3	1	0.8386	133.4245	4
6	4	0	0.8086	144.5804	6
7	0	1	0.8058	145.8494	3

Figura 39 – Resultados obtidos através das análises de DRX no *software Crystallographica Search-Match* para a amostra 4. Dados de (A) apresentam o elemento Alumínio (Al); Dados de (B) apresentam o elemento Silício (Si); Dados de (C) apresentam o elemento Estanho (Sn). (Dados da Pesquisa, 2022).

O difratograma referente a amostra 4 (Figura 40 – passante de 325 *mesh*) revelou que por ser a amostra com menor granulometria, apresentou uma maior quantidade de picos, sendo 6 picos identificados, e a posição angular dos picos depende das fases cristalinas da amostra, as intensidades dos picos estão relacionadas com a abundância de cada fase presente na amostra, assim como as larguras dos picos estão relacionadas com os tamanhos dos cristalinos, como pode-se observar na figura. A relação entre a estrutura cristalina e o difratograma é direta, tendo em vista que, graças a MEV-EDS tinha-se um campo de busca direcionado a 8 elementos químicos, permitindo assim, uma busca mais ágil, porém, nessa amostra em questão, 2 picos não foram possíveis de identificar, não encontrando os elementos correspondentes, e os mesmos se encontram demarcados na figura.

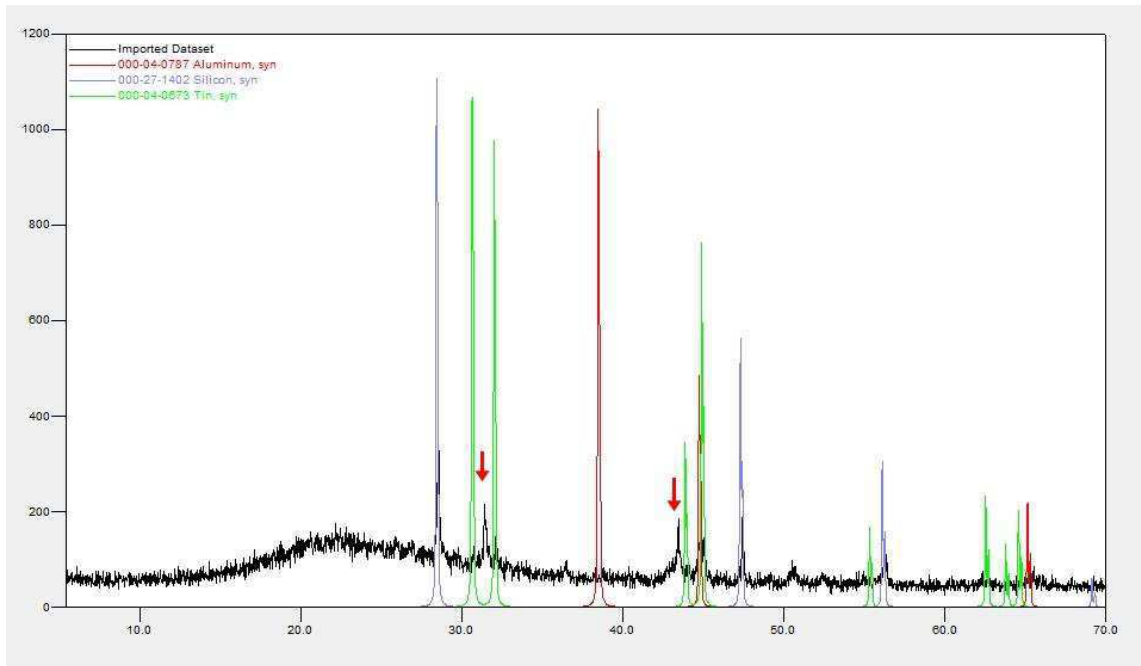


Figura 40 – Difratoograma representando os principais picos e seus respectivos elementos químicos da amostra 4. (Dados da Pesquisa, 2022).

5.5. Separação Magnética

Foi obtido ao fim da separação magnética sete materiais (Tabela 7), tendo em vista que foi necessário um novo peneiramento com um conjunto de 2 peneiras e o prato (abertura de 100 *mesh*, abertura de 325 *mesh* e o prato) vibrando por aproximadamente 10 minutos cada material (magnético e não-magnético), que após os processos resultaram em:

- O material magnético com uma malha de 100 *mesh*, pesando 57,6 g;
- O material magnético com uma malha de 325 *mesh*, pesando 15,7 g;
- O passante do material magnético (passante da malha 325 *mesh*), pesando 15,3 g;
- O material não-magnético com uma malha de 100 *mesh*, pesando 342,1 g;
- O material não-magnético com uma malha de 325 *mesh*, pesando 41,4 g;
- O passante do material não-magnético (passante da malha 325 *mesh*), pesando 17,1 g;
- Material a ser reprocessado (que se apresentou com uma granulometria inapropriada para a separação magnética), pesando 258,6 g.

Tabela 7 – Pesagem após a Separação Magnética.

MATERIAL	PESO (G)	PORCENTAGEM (%)	PERDA (%)
Não-magnético – 100 <i>mesh</i>	342,1 g	43,92%	1,83%
Não-magnético – 325 <i>mesh</i>	41,4 g	5,315%	0,182%
Não-magnético – passante 325 <i>mesh</i>	17,1 g	2,2%	0,091%
Magnético – 100 <i>mesh</i>	57,6 g	7,39%	0,31%
Magnético – 325 <i>mesh</i>	15,7 g	2,015%	0,084%
Magnético – passante 325 <i>mesh</i>	15,3 g	2,0%	0,082%
Retido para reprocessamento	258,6 g	33,196%	1,385%
TOTAL	747,8 g	96,036%	3,964%

Fonte: Dados da Pesquisa, 2022.

Após a conclusão da etapa de separação magnética, verificou-se que houve uma dispersão de aproximadamente 30,88 g de material, equivalente a 3,964%. É importante notar que esse processo foi conduzido em um circuito aberto para a separação magnética e que o material passou por quatro reprocessamentos a fim de obter esses resultados. Durante esses reprocessamentos, a frequência do tambor foi mantida em torno de 55 RPM.

Evidencia-se uma diminuição na porcentagem da fração magnética em comparação com as granulometrias maiores. Contudo, em todas as faixas granulométricas, a fração não-magnética é superior à magnética. Essas observações estão alinhadas com as conclusões de Medeiros (2015), onde os materiais metálicos, suscetíveis a campos magnéticos, tendem a se concentrar em frações mais grossas. Apesar das memórias RAM apresentarem composições bastante heterogêneas, a maioria dos componentes não é influenciada pelo magnetismo. As frações não-magnéticas, em termos de porcentagem, são consideráveis, representando cerca de 51,435%. Em contraste, as frações magnéticas, de maneira geral, totalizam cerca de 11,405%, estabelecendo uma diferença significativa de cerca de 40,03%, que equivale a 311,834 g. Quanto à perda de massa durante o processo de separação magnética, esta foi de 3,964%. Ao considerar apenas os materiais magnéticos e não-magnéticos, a perda é de 2,579% (Tabela 8Tabela 8). Comparativamente, no estudo de Medeiros (2015), uma perda de 5,59% de material foi observada após a separação magnética.

Tabela 8 – Resumo das pesagens dos materiais magnético e não-magnético após a separação magnética.

MATERIAL	PESO (g)	PORCENTAGEM (%)	PERDA (%)
Não-magnético	400,6 g	51,435%	2,103%
Magnético	88,6 g	11,405%	0,476%
TOTAL	489,2 g	62,84%	2,579%

Fonte: Dados da Pesquisa, 2022.

5.6. Espectroscopia de raios-X por Energia Dispersiva – EDX

Para a Espectroscopia de raios-X por Energia Dispersiva (EDX) foram selecionadas duas amostras provenientes da Separação Magnética, que são referentes ao material magnético, não magnético e uma amostra do material sem separação magnética, apenas cominuído e peneirado, gerando um total de três amostras (Tabela 9). Para a execução dessa análise do material magnético e não-magnético que são provenientes da Separação Magnética (executada em circuito aberto), foram utilizadas amostras peneiradas com o retido a 100 *mesh* e 325 *mesh*, respectivamente, com peso médio de 5 g cada.

Tabela 9 - Descrição das amostras analisadas referentes a memória RAM.

AMOSTRAS	GRANULOMETRIA #	DESCRIÇÃO
Amostra 1 – Não Magnética	Retido a 325 <i>mesh</i>	A amostra 1 é caracterizada como o material não-magnético da memória RAM, na qual, ficou retida na peneira referente a 325 <i>mesh</i> (~0,044 mm de abertura).
Amostra 2 – Magnética e Não- Magnética	Retido a 325 <i>mesh</i>	A amostra 2 é caracterizada como a memória RAM que foi apenas triturada, na qual, ficou retida na peneira referente a 325 <i>mesh</i> (~0,044 mm de abertura).
Amostra 3 – Magnética	Retido a 100 <i>mesh</i>	A amostra 3 é caracterizada como o material magnético da memória RAM que foi totalmente separada pela Separação Magnética, e a mesma ficou retida na peneira referente a 100 <i>mesh</i> (~0,149 mm de abertura).

Fonte: Dados da Pesquisa, 2023.

Os resultados provenientes das análises de EDX das amostras 1, 2 e 3 são descritos na tabela fornecida (Tabela 10). Essas amostras, nomeadamente a Amostra 1 (Material Não-Magnético retido a 325 *mesh*), a Amostra 2 (Material Misto, contendo tanto material magnético quanto não-magnético, retido a 325 *mesh*), e a Amostra 3 (Material Magnético retido a 100 *mesh*), foram analisadas e seus resultados são detalhados.

Ao analisar os dados, é perceptível a presença de 28 elementos químicos nas três amostras examinadas. Essas amostras são rotuladas como segue: Amostra 1 - Material Não-Magnético, Amostra 2 - Material Magnético e Não-Magnético, e Amostra 3 - Material Magnético. Cada uma delas continha uma quantidade de 5 gramas para análise.

Tabela 10 - Elementos Químicos presentes nas Memórias RAM.

ELEMENTO QUÍMICO	CARACTERÍSTICA	AMOSTRA 1 (%)	AMOSTRA 2 (%)	AMOSTRA 3 (%)
Silício (Si)	Semimetal	14,770	13,010	0,529
Bromo (Br)	Não Metal Diatômico	16,720	19,200	1,980
Cálcio (Ca)	Metal Alcalinoterroso	11,500	13,510	1,800
Bário (Ba)	Metal Alcalinoterroso	10,230	8,640	6,520
Estanho (Sn)	Metal Pós-Transição	7,050	4,970	7,780
Arsênio (As)	Semimetal	3,480	3,670	-
Cobre (Cu)	Metal de Transição	2,950	3,210	18,350
Chumbo (Pb)	Metal Pós-Transição	1,630	1,140	2,290
Antimônio (Sb)	Semimetal	1,170	1,250	-
Ferro (Fe)	Metal de Transição	0,979	2,480	15,420
Zircônio (Zr)	Metal de Transição	0,384	0,337	0,875
Prata (Ag)	Metal de Transição	0,397	0,444	1,710
Estrôncio (Sr)	Metal Alcalinoterroso	0,296	0,402	0,074
Fósforo (P)	Não Metal Poliatômico	0,114	0,200	-
Nióbio (Nb)	Metal de Transição	0,105	0,063	0,006
Manganês (Mn)	Metal de Transição	0,116	0,085	0,149
Níquel (Ni)	Metal de Transição	0,097	0,445	15,960
Cloro (Cl)	Não Metal Diatômico	0,110	0,059	-
Zinco (Zn)	Metal de Transição	0,077	0,084	0,101
Paládio (Pd)	Metal de Transição	0,062	0,030	-
Ouro (Au)	Metal de Transição	0,050	0,035	0,360
Índio (In)	Metal Pós-Transição	0,039	0,036	-
Molibdênio (Mo)	Metal de Transição	0,012	0,012	0,006
Cromo (Cr)	Metal de Transição	0,012	0,014	0,021
Cobalto (Co)	Metal de Transição	0,006	0,019	0,245
Bismuto (Bi)	Metal Pós-Transição	-	0,021	-
Titânio (Ti)	Metal de Transição	-	-	2,450
Tório (Th)	Actinídeo	-	-	0,144

Fonte: Dados da Pesquisa, 2023.

É perceptível uma semelhança em grande parte dos elementos químicos presentes na composição da amostra 1 na e amostra 2. Existe uma discreta variação entre elas, ao passo que na amostra 2 é observada a presença do Bismuto (Bi), ausente na amostra 1. Suas similaridades podem-se citar como exemplo: o Bromo (Br), o Silício (Si), o Cálcio (Ca), entre outros, alterando apenas suas porcentagens. Na qual, divergem da amostra 3, que é a amostra identificada como magnética, que não apresenta alguns elementos químicos, como por exemplo: o Fósforo (P), Carbono (C), Paládio (Pd), etc. Além das concentrações que são divergentes em alguns casos, como pode-se observar no exemplo do Cobre (Cu), na amostra 3 apresenta-se com uma concentração de 18,350% enquanto na amostra 2 observa-se 3,210% e na amostra 1, apenas, 2,950%. Também pode-se mencionar o Silício (Si), cuja proporção na amostra 1 é de 14,770%, equivalente a cerca de 0,74 gramas da amostra, enquanto na amostra 3 é observada uma proporção de apenas 0,529%, correspondente a cerca de 0,03 gramas da amostra.

Isso evidencia a eficácia da Separação Magnética em circuito aberto. No entanto, para alcançar resultados mais otimizados, seria recomendável adotar o processo em Circuito Fechado. Isso permitiria o reprocessamento sem perda de material, especialmente considerando que o material analisado é um pó fino com granulometrias que chegam a passar por uma malha de 325 *mesh*.

Dentre os elementos presentes pode-se observar a presença de semimetais, metais alcalinoterrosos, metais diatômicos, metais de transição, metais pós-transição, metal poliatômico e actínídeo. Dentre esses, alguns são classificados como metais pesados e se apresentaram em porcentagens diversas.

5.7. Dados Compilados

Após as análises, foram geradas tabelas que estabelecem correlações entre o peso inicial e a proporção de cada constituinte no material fragmentado. Essas tabelas serviram para determinar a quantidade de cada elemento químico presente nas 45 unidades de memória RAM. A princípio, essas memórias RAM tinham um peso de 810 g, porém, após o processo de fragmentação, seu peso diminuiu para 779 g, resultando em uma perda de 31 g.

Durante o procedimento de Separação Magnética, ocorreu uma dissipação de 30,88 g do material. Inicialmente, havia 747,8 g de material, e após a separação restaram 258,6 g que devem ser submetidos a um reprocessamento, deixando um remanescente de 489,2 g. A perda total é calculada como 320,8 g, correspondendo a 39,60% do peso original.

Nesse cenário, foi possível identificar os dez principais elementos químicos presentes na memória RAM. Isso foi realizado por meio de análises conduzidas utilizando técnicas como Microscopia Eletrônica de Varredura com Detecção de Energia Dispersiva (MEV-EDS), Difração de Raios-X (DRX) e Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDX). Os resultados dessas análises foram compilados na tabela subsequente, a qual oferece detalhes acerca das quantidades dos elementos químicos tanto nas amostras magnéticas quanto nas não-magnéticas, e a análise abrange a totalidade da amostra (Tabela 11).

Tabela 11 - Os dez principais elementos químicos presentes na memória RAM.

ELEMENTO QUÍMICO	NÃO-MAGNÉTICA (g)	MAGNÉTICA (g)	TOTAL (g)
Bromo (Br)	66,980	1,754	68,734
Silício (Si)	59,170	0,468	59,638
Cálcio (Ca)	46,069	1,595	47,664
Bário (Ba)	40,981	5,776	46,757
Estanho (Sn)	28,242	6,893	35,135
Cobre (Cu)	11,818	16,258	28,076
Ferro (Fe)	3,922	13,662	17,584
Níquel (Ni)	0,390	14,140	14,530
Arsênio (As)	13,941	-	13,941
Chumbo (Pb)	6,530	2,029	8,559
TOTAL	278,043	62,575	340,618

Fonte: Dados da Pesquisa, 2023.

Nota-se que dentro dos 489,2 g de material, é possível obter 68,734 g do elemento Bromo (Br), o qual se destaca como o elemento químico mais prevalente. Na sequência, encontra-se o Silício (Si) com uma quantidade de 59,638 g, seguido pelo Cálcio (Ca) com 47,664 g, Bário (Ba) com 46,757 g, Estanho (Sn) com 35,135 g, Cobre (Cu) com 28,076 g, Ferro (Fe) com 17,584 g, Níquel (Ni) com 14,530 g, Arsênio (As) com 13,941 g e Chumbo (Pb) com 8,559 g.

É digno de nota que os dez principais elementos químicos mencionados anteriormente abrangem 69,63% do material total, totalizando 340,618 g. Tendo em vista as análises realizadas por meio de Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDX), é possível

determinar os cinco principais metais presentes na memória RAM, com o intuito de viabilizar futuras atividades de comercialização (Tabela 12).

Tabela 12 - Os principais metais presentes na memória RAM

ELEMENTO QUÍMICO	NÃO MAGNÉTICA (g)	MAGNÉTICA (g)	TOTAL (g)
Cobre (Cu)	11,818	16,258	28,076
Ferro (Fe)	3,922	13,662	17,584
Prata (Ag)	1,590	1,515	3,105
Ouro (Au)	1,002	0,319	1,321
Paládio (Pd)	0,248	-	0,248
TOTAL	18,580	31,754	50,334

Fonte: Dados da Pesquisa, 2023.

Dessa forma, é possível inferir que após o processamento e a separação da memória RAM, aproximadamente 50,334 g dos principais metais que constituem essa memória podem ser recuperados de um total de 489,2 g. Essa abordagem mitigaria preocupações de natureza ambiental e social, uma vez que as memórias RAM contêm em sua estrutura os elementos químicos essenciais para a indústria eletroeletrônica, sem a necessidade de recorrer à exploração dos recursos naturais.

6 CONCLUSÕES

Ao fim das análises em questão foi perceptível que os objetivos foram atingidos, tendo em vista que os elementos encontrados no MEV-EDS responderam aos elementos químicos encontrados no DRX, e os elementos encontrados no EDX estavam em grande maioria contidos nas análises realizadas a priori.

Os resultados do MEV-EDS da memória RAM triturada sem tratamento prévio foi a presença de quatorze elementos químicos, sendo eles: Alumínio (Al), Bário (Ba), Cálcio (Ca), Carbono (C), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Estanho (Sn), Magnésio (Mg), Manganês (Mn), Nióbio (Nb), Níquel (Ni), Ouro (Au), Oxigênio (O) e Silício (Si) em concentrações diversas.

Os resultados obtidos após confrontar os dados obtidos pelo MEV-EDS e os dados obtidos pela análise dos difratogramas de DRX, foram que, apesar da memória RAM triturada não ter sofrido um tratamento prévio, foram encontrados oito elementos químicos com picos significativos, sendo eles: Alumínio (Al), Carbono (C), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Estanho (Sn), Ouro (Au), Oxigênio (O) e Silício (Si) em concentrações diversas.

Os resultados do EDX mostraram um conjunto de vinte e oito elementos químicos presentes nas memórias RAM em concentrações diversas e as amostras analisadas não sofreram um tratamento químico prévio. Os elementos químicos presentes encontrados, foram: Silício (Si), Estanho (Sn), Antimônio (Sb), Bromo (Br), Arsênio (As), Ferro (Fe), Cálcio (Ca), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Zircônio (Zr), Bário (Ba), Chumbo (Pb), Prata (Ag), Estrôncio (Sr), Fósforo (P), Nióbio (Nb), Manganês (Mn), Níquel (Ni), Zinco (Zn), Paládio (Pd), Ouro (Au), Índio (In), Molibdênio (Mo), Cromo (Cr), Cobalto (Co), Bismuto (Bi), Tório (Th) e Titânio (Ti).

Observou-se que entre os quatorze elementos químicos observados no MEV-EDS, tinha-se dez elementos que coincidiram, confirmando a eficiência da análise, dentre eles o Bário (Ba), Cálcio (Ca), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Estanho (Sn), Manganês (Mn), Nióbio (Nb), Níquel (Ni), Ouro (Au) e Silício (Si). E quanto ao DRX, obteve-se oito elementos nas análises e cinco elementos coincidiram na análise de EDX, que foram o Cobre (Cu), Cromo (Cr), Estanho (Sn), Ouro (Au) e Silício (Si), também confirmando a eficiência do método para a pesquisa.

Foram encontrados elementos químicos como: Chumbo (Pb), Estanho (Sn), Antimônio (Sb), Arsênio (As), Níquel (Ni), Paládio (Pd), Índio (In), Molibdênio (Mo), Cromo (Cr) e Bismuto (Bi) em suas composições, que são classificados como metais pesados, e os mesmos se apresentaram em diversas porcentagens ao longo das amostras.

A perda observada durante o processo de cominuição utilizando um triturador picador forrageiro adaptado foi de 3,834% e após a separação magnética utilizando um separador

magnético de tambor foi observado uma perda de 3,964%, gerando ao total uma perda de 7,798%, equivalente a 61,88 g de material, cerca de 3,44 memórias RAM, podendo ser considerado um resultado positivo e atingindo de forma plena os objetivos propostos pela dissertação em questão, já que foi possível quantificar e identificar os elementos químicos presentes na memória RAM de um modo geral.

Com base nas análises de MEV-EDS, DRX e EDX, foram identificados os dez principais elementos químicos presentes na memória RAM, listados em ordem decrescente de concentração: Bromo (Br) com 19,200%, Cálcio (Ca) com 13,510%, Silício (Si) com 13,010%, Bário (Ba) com 8,640%, Estanho (Sn) com 4,970%, Arsênio (As) com 3,670%, Cobre (Cu) com 3,210%, Ferro (Fe) com 2,480%, Chumbo (Pb) com 1,140% e o Níquel (Ni) com 0,445%.

Concluiu-se, com base nas análises de EDX, as concentrações médias dos principais metais presentes na memória RAM para fins de comercialização. O Ouro (Au) apresentou uma concentração média de 0,035%, a Prata (Ag) 0,444%, o Cobre (Cu) 3,210%, o Paládio (Pd) com 0,030% e o Ferro (Fe) com 2,480%.

Essas informações proporcionam uma visão detalhada da composição química das memórias RAM, destacando os principais elementos e suas concentrações médias. Essa estratégia teria um impacto positivo tanto em termos ambientais quanto sociais. A razão para isso reside no fato de que as memórias RAM possuem uma composição rica em elementos químicos de grande relevância para a indústria eletroeletrônica.

Do ponto de vista ambiental, essa abordagem reduziria a necessidade de mineração e extração de matérias-primas, minimizando assim o impacto ambiental associado a essas atividades. A extração de recursos naturais frequentemente leva a problemas como a degradação do solo, a contaminação da água e a destruição de habitats naturais. Ao aproveitar os metais já presentes nas memórias RAM descartadas, seria possível diminuir a pressão sobre os ecossistemas naturais.

Além disso, sob a perspectiva social, essa abordagem contribuiria para a redução da dependência de fontes de mineração, muitas vezes associadas a condições de trabalho precárias e a conflitos por recursos. A recuperação de metais a partir de produtos eletrônicos descartados também pode criar oportunidades de emprego na indústria de reciclagem e reutilização, promovendo uma economia mais circular e sustentável.

Portanto, ao aproveitar os elementos químicos presentes nas memórias RAM descartadas, essa abordagem não apenas impulsionaria a eficiência na utilização de recursos, mas também contribuiria para a preservação do meio ambiente e para o bem-estar social.

Por fim, pode-se concluir que a pesquisa obteve sucesso em identificar e quantificar os elementos químicos presentes nas memórias RAM, demonstrando sua viabilidade. Sendo possível reduzir as memórias RAM com êxito, que resultou na obtenção de amostras tanto magnéticas quanto não-magnéticas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análises comparativas com tratamentos químicos prévios, encontrando concentrações de bases e ácidos que gerem resultados positivos e que sejam adequados para o material em questão.
- Para uma melhor metodologia de separação magnética, é indicado um sistema fechado para que se evite perdas de material por dissipação, por exemplo.
- E para a separação dos elementos químicos presentes, pode-se utilizar uma planta de Separação por Meio Denso, Biolixiviação ou por um processo de Flocculação, por exemplo. E com esses processos, os elementos químicos estarão disponíveis para a indústria novamente, tornando viável a logística reversa.

8 BIBLIOGRAFIA

- ABRAMOVAY, R.; SPERANZA, J. S.; PETITGAND, C., **Lixo zero: gestão de resíduos sólidos para uma sociedade mais próspera**. São Paulo: Planeta sustentável: Instituto Ethos, 2013. 77 p.
- AFONSO, J. C., **Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos: O Antropoceno Bate à Nossa Porta**. Revista Virtual de Química. ISSN 1984–6835. Volume 10, Número 6, novembro-dezembro 2018. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Química, Departamento de Química.
- AGUIAR, A. S., **Síntese de nanopartículas magnéticas em dispersões de Laponita: Um estudo da hidrofilicidade**. TESE DE DOUTORADO. Universidade de Brasília – UnB. Programa de Pós-Graduação em Física Instituto de Física – IF. Brasília – DF, 2020. 159p.
- ALECRIM, E., **Memórias RAM e ROM**. 2011. Disponível em: <https://www.infowester.com/memoria.php>. Acesso em 01 de setembro de 2022.
- ANGULO PAREDES, Y. D. R., **Desenvolvimento e caracterização de dispositivos fosforescentes baseados em compostos orgânicos de baixo peso molecular**. 2012. 211 f.; Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Física, 2012.
- BALZUWEIT, K., **Microscopia: muito mais que uma grande lupa Departamento de Física**. Instituto de Ciências Exatas e Centro de Microscopia da UFMG. ANAIS DA 68ª REUNIÃO ANUAL DA SBPC - PORTO SEGURO - BA - JULHO/2016. Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.
- BANDEIRA, R., **Trabalhando com Testes Mobile – Uma análise empírica sobre testes em aplicações móveis**. 2022. Disponível em: <https://medium.com/revista-tspi/testes-de-software-em-smartphones-32d6d201fd70>. Acesso em: 14 de ago. de 2022.
- BARBOSA, C. S., **Sistemas Operacionais**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018. 200 p.
- B. GHOSH, M. K., *et al.*, **Waste Printed Circuit Boards recycling: an extensive assessment of current status**, *Journal of Cleaner Production*, Volume 94, 2015, Pages 5–19, ISSN 0959–6526.
- BALDÉ *et al.* **The Global E-waste Monitor**, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna, 2017.

BARRETO, F. E., BARATA, A. J. S. S., **RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS: Uma análise do descarte nas organizações privadas do Município de São Gabriel, Rio Grande do Sul.** Revista Educação em Ação, edição nº 62. Publicado em: 26 de janeiro de 2018.

BITENCOURT, C. S.; PANDOLFELLI, V. C., **Refratários contendo carbono: propriedades, características e variáveis em sua composição.** Cerâmica, 59(349), 84–114p, 2013.

BONOTTO, E. L., **Desenvolvimento de algoritmos e ferramentas computacionais para suporte na caracterização microestrutural de materiais através de imagens de microscopia eletrônica.** João Pessoa - PB, 2021. Tese (Doutorado) - UFPB/CT. 98p.

BORGES, J. P., **CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO MINÉRIO DE FOSFATO ULTRAFINO DE CATALÃO.** CATALÃO-GO, MAIO/2014. Monografia apresentada ao curso de pós-graduação em Tratamento de Minérios da Universidade Federal de Goiás – UFG, Especialização em Tratamento de Minérios. 37p.

BOSQUESI, R. M.; FERREIRA, R. L., **Lixo eletrônico e seus impactos aos recursos hídricos.** Caderno Meio Ambiente e Sustentabilidade – v.13 n.7 – 2018.

BRASIL, 2010, **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Disponível em: https://www.paranaambiental.com.br/arquivos/files/5_residuos_leifederal.pdf. Acesso em: 05 de outubro de 2021.

BRASIL, 2020, **Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020.** Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.240-de-12-de-fevereiro-de-2020-243058096>. Acesso em: 05 de outubro de 2021.

BRASIL, 2020 - (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA). **Descarte de eletroeletrônicos.** Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/epanb/item/15710-descarte-de-eletroeletr%C3%B4nicos.html>. Acesso em: 20 de maio de 2022.

BRASIL, 2022, **Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022.** LINK: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D10936.htm. Acesso em: 02 fev. 2023.

BURGESS, S; LI, X; HOLLAND, J. *High spatial resolution energy dispersive X-ray spectrometry in the SEM and the detection of light elements including lithium. Microscopy and Analysis*, v. 6, p. S8-S13, 2013.

CADENELLI et al., **Considerations in using OpenCL on GPUs and FPGAs for throughput-oriented genomics workloads.** Future Generation Computer Systems, Volume 94, 2019, 148–159p., ISSN 0167–739X.

CALDAS *et al.*, **Caracterização de placas de circuito impresso por microscopia eletrônica de varredura visando recuperação de metais**, p. 996–1006. In: 71th ABM Annual Congress, Rio de Janeiro, 2016.

CALDAS *et al.*, **PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO: CARACTERIZAÇÃO E VALOR AGREGADO (PRINTED CIRCUIT BOARDS: CHARACTERIZATION AND ADDED VALUE)**. Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, TMM., vol.16, n2, 203-211p., 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20191722>. Acesso em: 01 de fev. 2023.

CAMPOS *et al.*, **Multiversos: linguagens: natureza em pauta: ensino médio**. LIVRO, 1. ed. – São Paulo: FTD, 2020.

CASTRO *et al.*, **O descarte do Lixo Eletrônico e seus impactos ambientais**. Revista Acadêmica, Ano 7, n.27, julho-setembro de 2020. Faculdade de Tecnologia Oswaldo Cruz, 2020. ISSN 2357-8173.

CARMO, S. S., **Avaliação de procedimentos de preparação de amostras e rotinas de análises de imagem automatizada por microscopia eletrônica de varredura**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. DOI:10.11606/D.3.2016.tde-07032016-113950.

CARVALHO *et al.*, **Caracterização de catalisadores de Co–Mo/Al₂O₃ para a produção de SWNT's a partir da deposição química a vapor do CH₄**. Niterói – RJ, 2015. 77 f.

CONCEIÇÃO, A. U. S. DA., **Utilização do Protocolo TRS 398 da IAEA para Controle de Qualidade de feixe de raios X em Acelerador Linear de 6 MeV**. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ, CENTRO DE CIENCIAS EXATAS DEPARTAMENTO DE FÍSICA. MARINGÁ – PARANÁ. JANEIRO 2017, 46p.

CORREIA, O. **Radiação e suas Aplicações o Cotidiano**. TCC em Licenciatura Plena em Física - Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC - GOIÁS), Escola de Formação de Professores e Humanidades, 2022. 55p.

CUNHA, B. P., AUGUSTIN, S., **Sustentabilidade ambiental [recurso eletrônico]: estudos jurídicos e sociais**. Dados Eletrônicos Caxias do Sul, RS: EducS, 2014. EDUCS – Editora da Universidade de Caxias do Sul, 2014.

CUNHA, N. F., BOZELLI, R. L., LEAL, G. F. **Análise da aplicabilidade da lei 12.305/2010 na gestão dos resíduos sólidos urbanos no município de Rio das Ostras, RJ–Brasil**. Universidade Federal do Rio de Janeiro; Instituto de Biologia – Ilha do Fundão (Brasil), 2015.

DACOREGIO, M. A., **GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS: UMA SOLUÇÃO AMBIENTAL E SOCIAL**. UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA

CATARINA, Tubarão - 2018. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Química Licenciatura da Universidade do Sul de Santa Catarina, 2018. 81f.

D'ALFONSO *et al.*, *Atomic-resolution chemical mapping using energy-dispersive x-ray spectroscopy*. Physical Review B, v. 81, n. 10, p. 100101, 2010.

DA SILVA, R. F., **A Difração de Raios-X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais**. Revista Processos Químicos, 14(27), 73-82p, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.19142/rpq.v14i27.577>. Acesso em: 22 de abr. de 2023.

DEDAVID, B. A., GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores [recurso eletrônico]**. Porto Alegre, EDIPUCRS, 2007. 60 f.

DEMAJOROVIC, J.; AUGUSTO, E. E. F.; SOUZA, M. T. S. D., **REVERSE LOGISTICS OF E-WASTE IN DEVELOPING COUNTRIES: CHALLENGES AND PROSPECTS FOR THE BRAZILIAN MODEL**. Ambiente & Sociedade, 19 (Ambient. soc., 2016 19(2)), 117–136p.

EL-DEIR, S. G., **Resíduos sólidos: perspectivas e desafios para a gestão integrada**. LIVRO, 1. ed. — Recife: EDUFRPE, 2014. 267 p. ISBN: 978-85-746-195-8.

FERREIRA, M. M. **Decreto 10.240**. LINK: <http://plone.ufpb.br/tree/contents/noticias/decreto-10.240>, 2020, João Pessoa - Universidade Federal de João Pessoa. Acesso em: 16 nov. 2022.

FERRARI *et al.*, **Microscopia eletrônica aplicada em nanomateriais: catalisador sol-gel CUO/ZNO/AL2O3 (Electronic microscopy applied to nanomaterials: sol-gel catalyst CUO/ZNO/AL2O3)**. Brazilian Applied Science Review, 3(6), 2718–2738. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.34115/basrv3n6-036>. Acesso em: 20 de mar. de 2023.

FORBES, 2021, **Brasil terá 216 milhões de computadores até 2023, Sem Parar, Housi & Muito Mais**. Disponível em: <https://forbes.com.br/forbes-tech/2021/05/brasil-tera-216-milhoes-de-computadores-ate-2023-sem-parar-housi-muito-mais/>. Acesso em 20 de setembro de 2022.

FRANCISCO JR. *et al.*, **Cidades inteligentes [recurso eletrônico]: uma abordagem humana e sustentável**. 1. ed. – Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2021. – (Série estudos estratégicos; n. 12) Versão E-book. ISBN 978-65-87317-32-8.

FRANÇA, S. C. A.; LUZ, A. B. **Ensaios de Separação Magnética e Eletrostática**. Tratamento de Minérios Práticas Laboratoriais. 01ed. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2007, v. 01, p. 321–350.

GERBASE, A. E.; OLIVEIRA, C. R. DE., **Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química.** Química Nova, v. 35, n. 7, 1486–1492 p., 2012.

GOBBO, L. A. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld.** 2003. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

GOMES *et al.* **POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS: perspectivas de cumprimento da Lei 12.305/2010 nos municípios brasileiros, municípios paulistas e municípios da região do ABC.** Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria, vol. 7, novembro de 2014, pp. 93- 109. Universidade Federal de Santa Maria Santa Maria, Brasil, 2014.

GREEN ELETRON, 2020 – **Comprou um computador novo? Saiba onde descartar o antigo.** Disponível em: <https://greeneletron.org.br/blog/saiba-onde-descartar-notebooks/#:~:text=Segundo%20dados%20do%20The%20Global,o%20montante%20gerado%20neste%20per%C3%ADodo>. Acesso em 20 de setembro de 2022.

GREEN EELECTRON, 2021 - **RESÍDUOS ELETRÔNICOS NO BRASIL – 2021.** Disponível em: https://greeneletron.org.br/download/RELATORIO_DE_DADOS.pdf. Acesso em 25 de março de 2023.

HAYNE, L. A.; WYSE, A. T. de S., **Análise da evolução da tecnologia: uma contribuição para o ensino da ciência e tecnologia.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. R. bras. Ens. Ci. Tecnol., Ponta Grossa, v. 11, n. 3, p. 37–64, 2018. ISBN: 0000–0003–2671–1348.

HODOROABA, V. D., **Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS).** In: Characterization of Nanoparticles. Elsevier, 2020. p. 397-417.

J. APPL. CRISTAL., *Crystallographica* – um kit de ferramentas de software para **crystalografia** – 1997. 30, 418–419.

JOANITTI, G. A.; MORAIS, P. C.; AZEVEDO, R. B., **Nanotecnologia: considerações em materiais, saúde e meio ambiente.** Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2022. 517 p.

JUNIOR, D. M., **AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE CIMENTOS TIPO PORTLAND PRODUZIDOS NO BRASIL, ATRAVÉS DA TÉCNICA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X E RESISTÊNCIA MECÂNICA.** UNIVERSIDADE DE SOROCABA. PRÓ-REITORIA ACADÊMICA. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROCESSOS TECNOLÓGICOS E AMBIENTAIS – NÍVEL MESTRADO. Sorocaba/SP, 2016. 138p.

JUNIOR, G. R. S., **Mapas do espaço recíproco de camadas epitaxiais de CdTe.** Viçosa, MG, 2017. xi, 91p.

LABORATÓRIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X – JATAÍ FÍSICA, **Esquema ilustrativo da Lei de Bragg**. Disponível em: <https://fisica.jatai.ufg.br/p/19216-laboratorio-de-difracao-de-raios-x>. Acesso em: 04 de ago. 2023.

LOPES, L. D., **SÍNTESE DE NOVOS CRISTAIS LÍQUIDOS COM O NÚCLEO 3,5-DIFENILISOXAZOL E ANÁLISE DA RELAÇÃO ESTRUTURA-PROPRIEDADE**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. INSTITUTO DE QUÍMICA. TESE DE DOUTORADO. Porto Alegre, 2022. 240p.

LOURENÇO, B. B. M. **Fundamentos do direito positivo a gestão de resíduos eletroeletrônicos e o consumo consciente como mecanismos para a sustentabilidade**. Universidade Do Vale Do Itajaí – UNIVALI, Pós-Graduação E Inovação - Programa De Pós-Graduação Stricto Sensu em Ciência Jurídica – PPCJ. Mestrado Em Ciência Jurídica – CMCJ. Itajaí-SC, 2019.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M., **Tratamento de Minérios – 2010**. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932p. ISBN: 978-85-61121-62-4.

MACEDO *et al.*, **Redes de computadores [recurso eletrônico]**. 1. ed. – Santa Maria, RS: UFSM, NTE, 2018. *e-book*. Este caderno foi elaborado pelo Núcleo de Tecnologia Educacional da Universidade Federal de Santa Maria para os cursos da UAB - Licenciatura em computação. ISBN: 978–85–8341–225–0.

MAGALHÃES, B. H. F., **Comparação entre as técnicas difração de raios-x e DSC na obtenção do grau de cristalinidade do PP e do PEAD**. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Departamento de Engenharia de Materiais. Belo Horizonte, 2017. 59f.

MAGALHÃES, D. C. S., **Panorama dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE): O Lixo Eletroeletrônico - E-lixo**. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2011. 241p.

MAGALHÃES, L. A., **Desenvolvimento de Metodologia para Determinação de Sílica Cristalina Respirável para Particulado de Minério Brasileiro por Difração de Raios X**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Química, 2014. 105f.

MAIELLO, A.; BRITTO, A. L. N. P.; VALLE, T. F., **Implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Revista de Administração Pública, v. 52, n. 1, p. 24-51, jan. 2018.

MEDEIROS, N. M. **Caracterização e separação física de placas de circuito impresso de computadores obsoletos**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química – Natal, 2015. 80f.

MOREIRA, *et al.*, **CAPÍTULO 5 -MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.** XX Simpósio de Manejo de Doenças de Plantas - Proteção de Cultivo, 2023. 94-108p. SN: 978-65-00-59327-3.

MUELLER, C. F. **Logística Reversa Meio Ambiente e Produtividade.** Grupo de Estudos Logísticos–UFSC, Florianópolis, 2005. Disponível em: http://limpezapublica.com.br/textos/artigo01_1.pdf. Acesso em: 21 de janeiro de 2022.

NASCIMENTO, *et al.*, **Logística reversa dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos de pós-consumo na cidade de Teresina**, *Sistemas & Gestão*, Vol. 13, No. 4, p. 519-531, 2018. LINK: <http://www.revistasg.uff.br/index.php/sg/article/view/1443>. Acesso em: 12 mar. 2023.

NERY, G. P., **Caracterização tecnológica de minérios auríferos por análise automatizada de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura.** Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, 2016. 115p.

NEUMANN, R., SCHENEIDER, C. L., NETO, A. A. **CETEM – CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINÉRIOS, Capítulo 3 – Comunicação Técnica elaborada para a 4ª Edição do Livro de Tratamento de Minérios.** P. 55 a 109. Rio de Janeiro, dezembro – 2014.

NEWBURY, D. E.; RITCHIE, N. W. M., *Is scanning electron microscopy/energy dispersive X-ray spectrometry (SEM/EDS) quantitative Scanning*, v. 35, n. 3, p. 141-168, 2013.

NEWBURY, D. E.; RITCHIE, N. W. M., *Elemental mapping of microstructures by scanning electron microscopy-energy dispersive X-ray spectrometry (SEM-EDS): extraordinary advances with the silicon drift detector (SDD).* *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, v. 28, n. 7, p. 973-988, 2013.

NEWBURY, D. E.; RITCHIE, N. W. M. *Performing elemental microanalysis with high accuracy and high precision by scanning electron microscopy/silicon drift detector energy-dispersive X-ray spectrometry (SEM/SDD-EDS).* *Journal of materials science*, v. 50, p. 493-518, 2015.

NICOLAI, F. N. P. **Mineração urbana: avaliação da economicidade da recuperação de componentes ricos em Au a partir de resíduo eletrônico (e-waste).** 2016. 242 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

NNOROM, I.; OSIBANJO, O., *Electronic Waste (E-waste): Material Flows and Management Practices in Nigeria.* *Waste management (New York, N.Y.)*, 28. 1472-9. 2008.

OLIVEIRA, J. S., **Proposta de um novo programa de Atomística para o ensino médio, com a inserção de conceitos de Química Quântica**. Curso de Licenciatura em Química do Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 144p. RIO DE JANEIRO, 2016.

PEREIRA, R. S. C., **Logística Reversa de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos: Proposta de Indicadores de Monitoramento para Órgãos Ambientais**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, 2018. 163p.

PGE-MS, 2022, **Decreto nº 10.936 regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos. O que precisamos saber? Projeto Resíduos Sólidos – Disposição Legal” realizado pelo MPMS por meio do CAOMA/Núcleo Ambiental, TCE-MS, Semagro e UEMS**. LINK: <https://www.mpms.mp.br/noticias/2022/06/decreto-n-10936-regulamenta-a-politica-nacional-de-residuos-solidos-o-que-precisamos-sabera#>. Publicado em: 06/06/2022. Acesso em: 02 fev. 2023.

PRENCIPE *et al.*, **Energy dispersive x-ray spectroscopy for nanostructured thin film density evaluation**. Science and technology of advanced materials, 2015. 16:2, DOI: 10.1088/1468-6996/16/2/025007.

QUIZUNDA A. C., **Desenvolvimento de metodologia para caracterização de hidroxiapatita pelas técnicas de MEV, MET e DRX**. Dissertação (Mestrado em Fenômenos de transporte; Mecânica dos Sólidos) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. 71 f.

RAJOVIC, K. C. S. **Diretrizes para o gerenciamento de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. Estudo de caso: Uberaba, MG**. São Carlos: UFSCar, 2016. 150p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, 2016.

RAMOS, T. M., **Potencialidades da microscopia eletrônica (transmissão e varredura) e microscopia confocal como ferramentas para análises de amostras biológicas**. Trabalho de conclusão em Ciências Biológicas: Bacharelado (graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Biociências. Porto Alegre - RS, 2013. 49p.

RECICLA SAMPA, 2022. **Brasil já conta com 3,4 mil pontos de coleta de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos**. Disponível em: [https://www.reciclasampa.com.br/artigo/brasil-ja-conta-com-34-mil-pontos-de-coleta-de-lixo-eletronico#:~:text=O%20Brasil%20j%C3%A1%20conta%20com,Eletroeletr%C3%B4nicos%20e%20Eletrodom%C3%A9sticos%20\(Abree\),2022](https://www.reciclasampa.com.br/artigo/brasil-ja-conta-com-34-mil-pontos-de-coleta-de-lixo-eletronico#:~:text=O%20Brasil%20j%C3%A1%20conta%20com,Eletroeletr%C3%B4nicos%20e%20Eletrodom%C3%A9sticos%20(Abree),2022). Acesso em: 01 out. 2022.

SALUSSOGLIA, A. I. P.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L., **Desempenho de Filtração e Determinação do Diâmetro das Nanofibras: Influência do Método de Medição e Microscópio Eletrônico de Varredura**. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 4, p. 36952-36969, 2021.

SANTANA, G.; MARQUES, P. R. B. O. **Resíduo eletrônico e suas implicações ambientais: diagnóstico sobre o tema em uma instituição de ensino tecnológico.** Ensino e Multidisciplinaridade. V-3, n. 2, p.75-92, 2017.

SANTANA, R. F.; JÚNIOR, W. R. A.; EL-DEIR, S. G., **Resíduos sólidos: desenvolvimento e sustentabilidade.** 1. ed. – Recife: EDUFRPE: Gampe, 2020. Livro digital - 479 p. ISBN 978-85-7946-358-7.

SANTOS, A. L. A., **Caracterização mineralógica e tecnológica de minério.** Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018. 232 p.

SANTOS, M. C. M. **O tratamento dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos na política nacional de resíduos sólidos.** REDES – REVISTA ELETRÔNICA DIREITO E SOCIEDADE, Canoas, vol.4, n. 2, p. 257–276, 2016.

SANTOS, R. L. C. **Tópicos sobre a reciclagem de metais e sustentabilidade.** Série Estudos e Documentos, 83. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. 50f.

SANTOS *et al.*, **ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X NA DETERMINAÇÃO DE ESPÉCIES QUÍMICAS.** ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.9, n.17; p. 3413, 2013.

SCHLUEP, M., SPITZBART, M., BLASER, F. **Dismantling Guide for IT – Equipment.** Junho, 2015. Disponível em: https://www.sustainable-recycling.org/wp-content/uploads/2020/09/2015_Schluep_et_al_SRI_DismGuide_IT_Equipment.pdf. Acesso em: 10 de outubro de 2021.

SILVA, A. L., **Caracterização mineralógica por difração de raios-X e determinação de terras raras por ICP-MS de rochas da região sul da Bahia.** Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2013. 100 p.

SILVA, V.; CAPANEMA, L. X. L., **POLÍTICAS PÚBLICAS NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS: EXPERIÊNCIAS COMPARADAS E DESAFIOS PARA O BRASIL.** BNDES Set., Rio de Janeiro, v. 25, n. 50, n153-200p., 2019.

SILVA, Y. C. **Análise de nanofios heteroestruturados via microscopia eletrônica de transmissão.** 2013. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Física) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

SIQUEIRA *et al.*, **Livro de Minicursos - SBRC 2016.** XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - Salvador, BA. Porto Alegre: SBC, 2016. 315 p. ISSN: 2177-4978.

STALLINGS, W., **Arquitetura e organização de computadores** (*Computer organization and architecture*). Vários tradutores - 10. ed. São Paulo: Pearson, 2017. ISBN 978–85–7605–564–8.

SOLIANI, R. D.; KUMSCHLIES, M. C. G.; SCHALCH, V., **A gestão de resíduos sólidos urbanos como estratégia de sustentabilidade** (*The management of solid urban waste as a sustainability strategy*). Revista ESPACIOS, Vol. 40 (Nº 3), 2019. 9p. ISSN: 0798 1015.

SOUSA, A. F., **Caracterização por microscopia eletrônica de (nano)compósitos envolvendo dióxido de titânio e carvão hidrotérmico**. Trabalho de Conclusão de Curso (especialização) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Especialização em Ensino de Física, Fortaleza, 2019. 50 p.

SOUZA, J. S., **Montagem e manutenção de computadores**. Manaus: Centro de Educação Tecnológica do Amazonas, 2011. 114p. ISBN: 20120828.

SZIGETHY, L., ANTENOR, S. **Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos**. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>. Publicado em: 09/07/2020. Acesso em: 27 de novembro de 2022.

TEIXEIRA, C. E., **A teoria da difração de raios-X em estruturas tridimensionais**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Dissertação de Mestrado, 2014. 145p.

TEIXEIRA, M., **Estudo de caracterização e desenvolvimento tecnológico dos materiais duros cimentados da mina de fosfato da Copebrás, GO**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Dissertação de Mestrado, 2019. 162p.

VERDÉLIO, A. **Governo Federal defende prorrogação do prazo da lei que acaba com os lixões**. LINK: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-02/governo-federal-espera-pela-prorroacao-do-prazoda-lei-que-acaba-com-os>. Publicado em 27/02/2016 - Brasília. Acesso em: 19 out. 2022.

VEIT, H. M. **Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso**. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 115f.

VIEIRA *et al.*, **Espectroscopia dispersiva de energia de raios-X (EDS) acoplada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV): fundamentos e aplicações em produtos lácteos**. Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento, [S. l.], v. 10, n. 10, pág. e262101018622, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i10.18622. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/18622>. Acesso em: 20 de outubro de 2022.

VILELA, P. R. **Decreto obriga empresas a recolherem lixo eletrônico.** LINK: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/politica/noticia/2020-02/decreto-obriga-empresas-recolherem-lixoeletronico>. Publicado em 12/02/2020, Brasília. Acesso em: 20 out. 2022.

XAVIER, *et al.* **Guia de desmontagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2020. 42p.

XAVIER *et al.* **Mineração urbana: conceitos e análise do potencial dos resíduos eletroeletrônicos.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2021. 198 p. ISBN: 978-65-5919-059-1.

XAVIER *et al.* **Diagnóstico da mineração urbana dos resíduos eletroeletrônicos no Brasil: Projeto MINARE: relatório final.** – Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2023. 38 p. ISBN: 978-65-5919-042-3.

WASTOWSKI *et al.*, 2010. **Caracterização dos níveis de elementos químicos em solo, submetido a diferentes sistemas de uso e manejo, utilizando espectrometria de fluorescência de raios-x por energia dispersiva (EDXRF).** Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v33n7/a05v33n7.pdf>. Acesso em: 01 de outubro de 2022.

WEISS, T. G. S.; PRASAD, Y. Y., **Desenvolvimento e estudo das propriedades mecânicas e características microestruturais do compósito cerâmico baseado em Alumina Zircônia aplicado em revestimento e proteção de tanques de petróleo cru.** 2011. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011. 86p.

YAMANE, L. H. **Recuperação de metais de placas de circuito impresso de computadores obsoletos através de processo biohidrometalúrgico.** 2012. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-07062013-154359/pt-br.php>. Acesso em: 05 de setembro de 2022.

ZANDONÁ, T. G., **Difração de raios X – Uma revisão bibliográfica acerca das aplicações desta técnica na medicina.** Trabalho de Conclusão de Curso II. UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. INSTITUTO DE FÍSICA. GRUPO DE ESPECTROSCOPIA DE MATERIAIS (GEM). Uberlândia, 2021.