

RAFAEL ROSANO SILVA

**MINERAÇÃO URBANA – AS RIQUEZAS MINERAIS NOS
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

São Paulo

2021

RAFAEL ROSANO SILVA

**MINERAÇÃO URBANA – AS RIQUEZAS MINERAIS NOS
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

Trabalho de Formatura em
Engenharia de Minas do curso de
graduação do Departamento de
Engenharia de Minas e de Petróleo
da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.

Orientadora: Profa. Dra. Carina Ulsen

São Paulo

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catlogação-na-publicação

Silva, Rafael
MINERAÇÃO URBANA – AS RIQUEZAS MINERAIS NOS RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS / R. Silva -- São Paulo, 2021.
50 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1. Mineração Urbana 2. Resíduos 3. Eletroeletrônicos 4. Caracterização
tecnológica I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.

AGRADECIMENTOS

O primeiro agradecimento vai para minha mãe e meu pai, por terem me fornecido as ferramentas para chegar até o presente momento. Eles que tiveram papel importante na minha educação e me ajudaram em diversas decisões e momentos importantes da minha vida. Agradeço também as minhas irmãs, a toda a minha família e a Jú por serem minha base de apoio ao longo desse trajeto. Aqui também vale um agradecimento a minhas estrelinhas e a Deus que me ajudam lá de cima.

Aos grandes amigos da Sala 7 que foram fundamentais ao longo das diversas matérias e obstáculos que a faculdade ofereceu. Agradeço por ajudarem a tornar os intervalos de aula um espetáculo à parte, sempre com suas personalidades ímpares e que muito me divertiram e ensinaram.

Um agradecimento também aos amigos dos grupos de extensão que me propiciaram experiências únicas e inesquecíveis. O USP Mining Team agradeço por me abrir os horizontes do mundo e da mineração. A Poli Social agradeço por abrir os horizontes da empatia e do impacto social.

O Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo merece destaque por ter sido quase uma segunda casa ao longo desses anos. Os professores do PMI, as bibliotecárias e todos os funcionários foram de grande importância para o meu aprendizado. Em especial, agradeço a professora Carina pela orientação com a construção deste trabalho

Estudar na Universidade de São Paulo sempre foi meu sonho, desde que tive o discernimento para sonhar. Queria fazer parte dessa universidade, antes mesmo de definir minha graduação. Este trabalho simboliza a realização desse sonho pessoal. Cada espaço da Cidade Universitária, cada aventura, aprendizado e descoberta ficaram sempre marcados em minha memória. Tenho certeza de que estes momentos serão sempre fonte de sorrisos ao longo dos anos. A Escola Politécnica que tanto me ensinou, me cobrou e me transformou, todo o carinho do mundo.

RESUMO

A geração de resíduos é inerente ao desenvolvimento e atividade humana. Com o aumento populacional e maior disseminação de tecnologia, cada vez mais temos maior geração de resíduos e maior potencial econômico no que é descartado. O presente trabalho tem como objetivo discutir os conceitos de mineração urbana, para entender a viabilidade dessa técnica, discutir a composição dos resíduos urbanos, avaliar a caracterização tecnológica desse material e possíveis rotas de reaproveitamento. Por meio de uma revisão bibliográfica, será fornecido um panorama da geração de resíduos no Brasil, com um maior enfoque em materiais considerados de interesse (metais, resíduos de construção e demolição e resíduos eletroeletrônicos), por apresentarem maior valor econômico agregado. Em um segundo momento, uma revisão bibliométrica de literatura foi utilizada para caracterizar os artigos e publicações relacionadas ao tema e sua relevância no setor acadêmico. Por fim, buscou-se estudar a caracterização desses resíduos e entender suas características particulares. Essa avaliação permitiu compreender o real potencial econômico da mineração urbana e como essa técnica deve ganhar cada vez mais adeptos, de modo a aproveitar minerais e riquezas nos resíduos sólidos urbanos.

PALAVRAS-CHAVE: *Resíduos, mineração urbana, eletroeletrônicos, caracterização tecnológica*

ABSTRACT

Waste generation is inherent to human development and activity. With the increase in population and greater dissemination of technology, we increasingly have greater generation of waste and greater economic potential in what is discarded. This work aims to discuss the concepts of urban mining, to understand the feasibility of this technique, discuss the composition of urban waste, understand the technological characterization of this material and possible reuse routes. Through a literature review, an overview of waste generation in Brazil will be provided, with a greater focus on materials considered of interest (metals, construction and demolition waste and electronic waste), as they present greater added economic value. In a second moment, a bibliometric literature review was used to characterize the articles and publications related to the topic and its relevance in the academic sector. Finally, we sought to understand the characterization of these residues and understand their particular characteristics. This assessment allowed us to understand the real economic potential of urban mining and how this technique should gain more and more followers, in order to take advantage of minerals and wealth in urban solid waste.

KEY WORDS: *Waste, urban mining, e-waste, technological characterization*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	3
2.2	MINERAÇÃO URBANA.....	6
2.3	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)	7
2.4	RESÍDUOS METÁLICOS	11
2.4.1	<i>Os resíduos do aço</i>	<i>11</i>
2.4.2	<i>Os resíduos do cobre</i>	<i>12</i>
2.4.3	<i>Os resíduos do alumínio.....</i>	<i>13</i>
2.5	RESÍDUOS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS (REEE)	14
2.5.1	<i>Alternativas Para Recuperação Metálica Nos REEE.....</i>	<i>19</i>
3	METODOLOGIA.....	23
3.1	REVISÃO DE LITERATURA	23
3.2	COLETA DE DADOS	24
3.2.1	<i>Estudos sobre RCD.....</i>	<i>24</i>
3.2.2	<i>Estudos sobre REEE.....</i>	<i>25</i>
3.2.3	<i>Estudos sobre Resíduos metálicos</i>	<i>27</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1	CARACTERIZAÇÃO COMPOSICIONAL DOS REEE.....	28
4.1.1	<i>Composição Pontual por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....</i>	<i>28</i>
4.1.2	<i>Caracterização por Difratomia de Raios-X.....</i>	<i>30</i>
4.1.3	<i>Composição química por Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma (ICP).....</i>	<i>31</i>
5	CONCLUSÃO.....	34

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Cobertura de coleta de RSU por região do Brasil (Fonte: Abrelpe, 2020)	4
Figura 2 – Destinação dos RSU no Brasil (Fonte: Abrelpe, 2020).	5
Figura 3 – Composição dos RSU no Brasil (Fonte: Abrelpe, 2020).	6
Figura 4 - Coleta total e per capita de RSU no Brasil por região (Fonte: Abrelpe, 2020).	8
Figura 5 - Quantidade de usina de reciclagem de RCD no Brasil (Fonte: Miranda et al, 2009).	9
Figura 6 – Enquete realizada com construtoras do Estado de São Paulo (Fonte: Secretaria do Meio Ambiente, 2012).	10
Figura 7 - Taxa de reutilização de resíduos em obras de São Paulo (Fonte: Secretaria do Meio Ambiente, 2012).	11
Figura 8 - Geração de resíduos pela indústria do aço (Fonte: Instituto do aço, 2020).	12
Figura 9 - Reutilização média da produção de alumínio por país (Adaptado de Abal, 2011).	14
Figura 10 - Composição dos REEE no mundo em 2019 (Adaptado Global E-Waste, 2020).	15
Figura 11 - Vida útil de equipamentos eletroeletrônicos (Fonte: Forti, 2020).	16
Figura 12 - Composição do EEE em São Paulo (Fonte: Rodrigues et al, 2019).	17
Figura 13 - Composição média de um notebook (Fonte: Xavier et al, 2012).	18
Figura 14 - Comparação entre as rotas de beneficiamento de REEE. (Adaptado: CUI et al, 2008).	19
Figura 15 - Demonstração do método de Kaldo. (Fonte: DUTTA et al., 2020)	21
Figura 16 - Exemplar de <i>Leptospirillum</i> sp. (Fonte: ROJAS-CHAPANA; TRIBUTSCH, 2004).	21
Figura 17 - Documentos sobre "Construction waste and recycling" ao longo dos anos. (Fonte: Scopus, 2021)	25
Figura 18 - Publicações por país. (Fonte: Scopus, 2021).	25

Figura 19 - Documentos sobre "E-waste and recycling" ao longo dos anos. (Fonte: Scopus, 2021).	26
Figura 20 - Publicações por país. (Fonte: Scopus, 2021).	26
Figura 21 - Publicações por ano sobre "Metal and Recycling". (Fonte: Scopus, 2021).	27
Figura 22 - Publicações por país. (Fonte: Scopus, 2021).	27
Figura 23 - Ensaio MEV em placas de circuito interno. (Fonte: PRIYA; HAIT, 2017).	30
Figura 24 - Padrões de difração de REEE em ensaio de DRX. (Fonte: LÓPEZ et al, 2016).	31
Figura 25 - Distribuição de tamanho de partículas pós cominuição. (Fonte: ANDRADE et al, 2019).	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição de RCD em duas obras distintas (Fonte: Miranda et al, 2009).	9
Tabela 2 - Porcentagem de residências com equipamentos eletroeletrônicos no Brasil (Fonte: IBGE, 2001, 2008, 2015).	16
Tabela 3 - Composição de REEE por tipo de equipamento (Fonte: Adaptado, Harl, 2019).	18
Tabela 4 - Composição média de um desktop (Fonte: Xavier et al, 2012).	18
Tabela 5 - Composição metálica média por tipo de REEE. (Fonte: CHU, 2008).	28
Tabela 6 - Resultados análise MEV. (Fonte: LÓPEZ et al., 2016).	29
Tabela 7 - Concentração mássica por amostra. (Fonte: ANDRADE et al, 2019).	32
Tabela 8 - Recuperação de metais por lixiviação. (Fonte: ANDRADE et al, 2019).	33

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A geração de resíduos sólidos urbanos, resíduos de atividade comercial e industrial e de construção e demolição, em nível global é da ordem de 7 a 10 bilhões de toneladas anuais, segundo levantamento da ONU de 2015. Em 2010, segundo levantamento do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 34% dessa geração era concentrada nos países mais ricos que compunham 16% da população mundial. Fato que deve mudar com o desenvolvimento econômico da Ásia e África. Cerca de 4% desse volume é composto por metais de grande potencial econômico.

Segundo o Global E-Waste Monitor, em 2019, foram geradas 53,6 milhões de toneladas de resíduos elétricos e eletroeletrônicos (REEE), dos quais 82,6% tiveram destinação não adequada. Apenas nesse tipo de resíduos o potencial econômico anual é de US\$ 57 bilhões de dólares. Com o aumento dessa geração (aproximadamente 40% até 2030), as riquezas ocultas nos REEE tornam-se cada vez mais evidentes.

No Brasil, com a geração anual de 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, das quais 2,3% é composta por metais e 0,2% por resíduos elétricos e eletroeletrônicos, o potencial é igualmente atrativo. De acordo com a consultoria especializada em metais, Metal Focus, as concentrações médias de minas de ouro são da ordem de 1,4 grama por tonelada. Uma tonelada de celulares antigos possui 340 gramas desse metal.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar a geração de resíduos no ambiente urbano com potencial econômico e discutir os conceitos de mineração urbana. Por meio de revisão bibliográfica de artigos acadêmicos, relatórios técnicos de entidades do setor e publicações de organizações internacionais e governamentais, buscou-se traçar um panorama da geração de resíduos, sua composição e possíveis alternativas para exploração econômica desse material.

Em um segundo momento, foi realizada uma análise bibliométrica para mapear e entender a importância e o volume de publicações relacionadas a

reciclagem de resíduos de construção civil, resíduos metálicos e resíduos eletroeletrônicos.

Por fim, foram abordados os estudos de caracterização de resíduos eletroeletrônicos para avaliar o conteúdo de elementos de interesse e o potencial de recuperação destes, a fim de entender a viabilidade da mineração urbana nesse tipo de material.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi instituída em 12 de fevereiro de 1998 e define os resíduos sólidos como “todo material, substância, objeto ou bem descartado resultado de atividades humanas em sociedade”. Segundo a lei, os resíduos sólidos urbanos (RSU) são aqueles que tem origem em domicílios, através das atividades em residências urbanas, e por limpeza urbana, englobando os que tem origem em varrição, limpeza de vias públicas e demais serviços de limpeza urbana.

Dentro dos RSU, alguns parâmetros devem ser destacados e serão discutidos a seguir, sendo:

- Geração dos RSU
- Composição
- Coleta e destinação

Geração

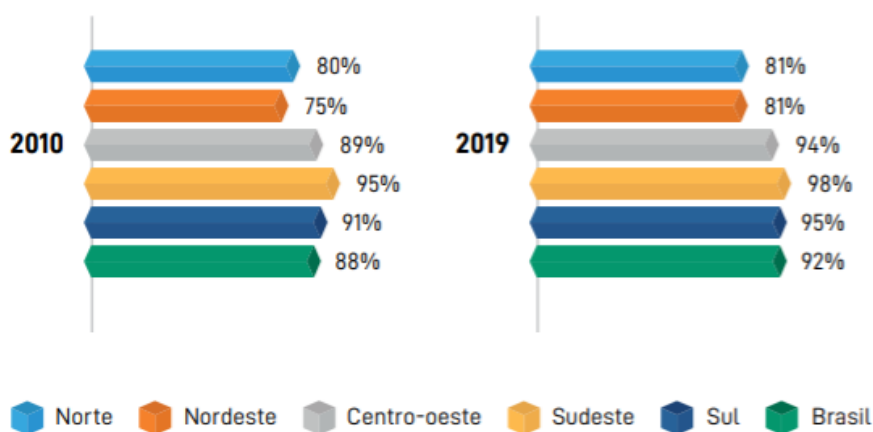
O Brasil teve um crescimento de 18% na geração de resíduos ao longo da última década, passando de 67 milhões de toneladas ao ano para 79 milhões de toneladas ao ano. Considerando o crescimento populacional, a geração per capita anual teve incremento de 8,8% saindo de 348,3 quilogramas por habitante para os atuais 379,2 quilogramas por habitante (ABRELPE, 2020).

A concentração de população na região sudeste, também reflete maior geração de resíduos (39 milhões de toneladas, quase 50% do volume do país) e a maior taxa de produção per capita anual (449,7 quilogramas por habitante). No outro extremo, temos a região centro-oeste com menor volume total (geração de 5 milhões de toneladas), mas com a segunda maior proporção per capita (361,4 kg/hab/ano; ABRELPE, 2020)

Coleta

A cobertura de coleta dos resíduos em ambiente nacional cresceu de 88% em 2010 para os atuais 92%, com a distribuição por regional indicada na Figura 1.

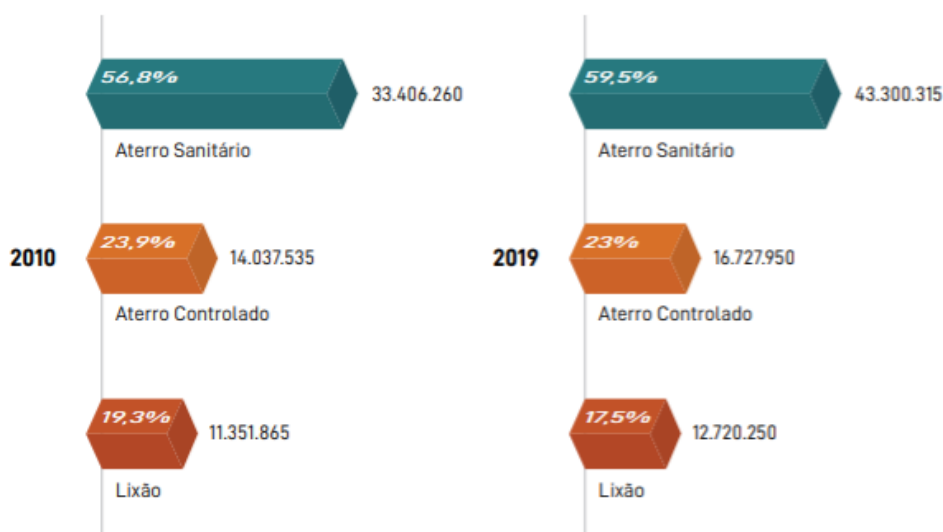
Figura 1 - Cobertura de coleta de RSU por região do Brasil (Fonte: Abrelpe, 2020)



Cerca de 73,1% dos municípios brasileiros possuem alguma iniciativa de coleta seletiva. Valor que encontra sua maior proporção no Sul (90,9%) e seu menor número no Centro-oeste (48,6; ABRELPE, 2020).

Sancionada em 02 de agosto de 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (lei Nº12.305) estabeleceu metas para a destinação dos resíduos gerados no Brasil, dentre as quais a eliminação da disposição em lixões até o ano de 2030. No ano de sua publicação, o país possuía 56,8% de seus resíduos com destinação adequada. No ano de 2019, essa taxa cresceu para 59,5%. Se mantiver esse ritmo de crescimento, ainda levará cerca de 55 anos para que tenhamos o fim da disposição inadequada (Figura 2; ABRELPE, 2020).

Figura 2 – Destinação dos RSU no Brasil (Fonte: Abrelpe, 2020).



A manutenção e cuidado com os resíduos consomem anualmente por habitante R\$ 121,80 dos cofres públicos (aumento de R\$ 29,92 desde 2010). Anualmente, o setor consome 25 milhões de reais em tarefas como varrição, limpeza de córregos e parques, gerando mais de 332.142 empregos diretos, em sua maioria nas regiões Sudeste e Nordeste (ABRELPE, 2020).

Disposição

Os resíduos sólidos urbanos têm como principal destino a incineração ou a disposição em aterros sanitários e lixões. Em termos de capacidade instalada o país conseguiria incinerar aproximadamente 263 milhões de toneladas/ano, realizar técnicas de autoclave em mais 197 milhões de toneladas/ano e utilizar processo de microondas em 20 milhões de toneladas/ano (ABRELPE, 2020).

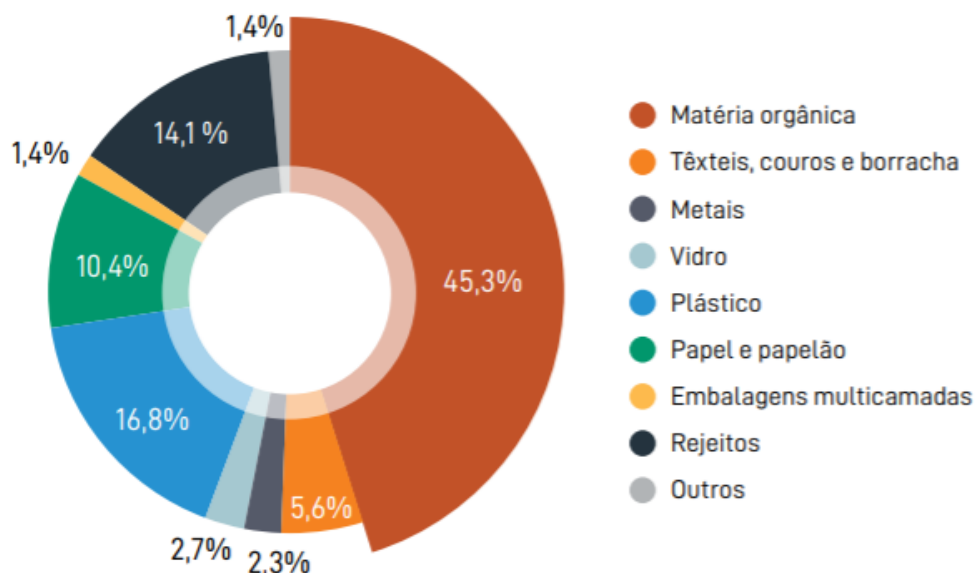
A PNRS institui processos de logística reversa como parte da responsabilidade pelo ciclo de vida dos produtos. Essa iniciativa ajudou a melhorar a taxa de reaproveitamento em diversos setores, como o de embalagens, baterias, lâmpadas e pneus, uma vez que as empresas geradoras passaram a ter responsabilidade pelo pós-consumo de seus produtos (ABRELPE, 2020).

Composição

A produção no país concentra-se principalmente em matéria orgânica (45,3 %), plástico (16,8%) e rejeitos (14,1%) como resíduos sanitários, materiais

não identificáveis e recicláveis contaminados, conforme Figura 3. Parcelas menores, mas de grande interesse econômico como os resíduos eletroeletrônicos correspondem a menos de 1,4% (mas ainda 1.106.000 toneladas ao ano; ABRELPE, 2020).

Figura 3 – Composição dos RSU no Brasil (Fonte: Abrelpe, 2020).



Projeta-se que, até 2050, o volume dos RSU cresça em 50%, frente ao crescimento populacional de 12%, muito explicado pelo aumento do poder aquisitivo dos cidadãos e o crescimento do PIB, estressando ainda mais o setor de coleta de resíduos (ABRELPE, 2020).

2.2 MINERAÇÃO URBANA

A mineração urbana é um conceito desenvolvido para classificar a mineração praticada em minas criadas a partir dos resíduos da atividade humana, ou seja, em aterros sanitários ou nas cidades. A técnica engloba um conjunto de atividades como recuperação, análises, processamento e reciclagem que visam a recuperação de materiais nos resíduos sólidos urbanos, os reinserindo na cadeia produtiva (ARORA *et al*, 2017; BILLARD, 2019; OTTONI, 2020; SHARMA *et al*, 2021).

Além do potencial econômico desses materiais recuperados, a mineração urbana auxilia no reaproveitamento de compostos finitos que seriam

descartados, diminuindo o volume final de RSU e auxiliando na prática de economia circular para esses insumos (OTTONI, 2020; SHARMA *et al*, 2021)

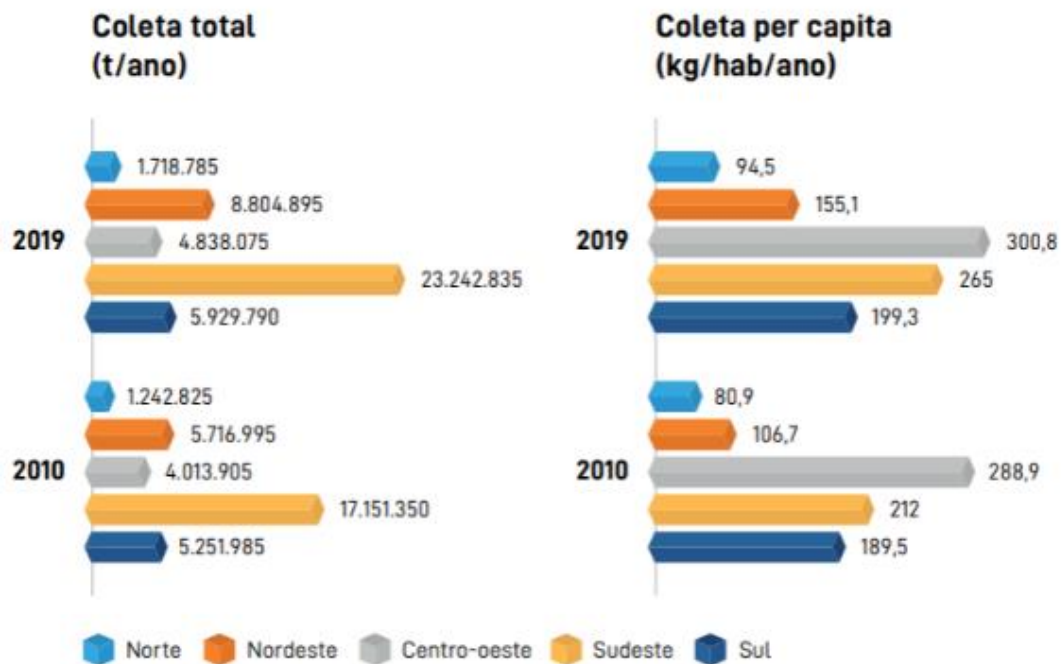
2.3 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

Além dos resíduos metálicos, os RCD também foram considerados de interesse nessa pesquisa. Apesar do menor valor agregado, representam em massa cerca de 50% dos RSU, tanto que atualmente constituem uma categoria própria (ABRELPE, 2020).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, os resíduos de construção e demolição são aqueles que “são gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluindo os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis”. No município de São Paulo, por exemplo, estes resíduos representam 65% da geração da cidade (SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, 2012).

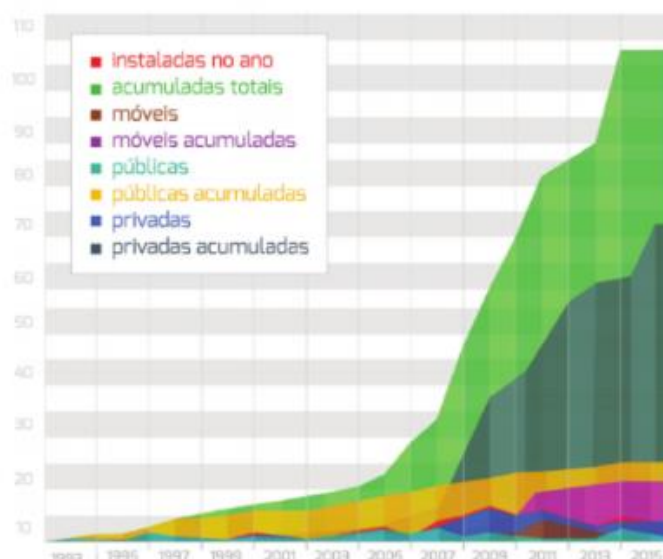
No período de 2010 a 2019, os RCD's coletados no Brasil passaram de 33 milhões de toneladas para cerca de 44 milhões, um aumento médio de 39 quilogramas por habitante, por ano. O maior volume tem como origem a região Sudeste (23 milhões de toneladas) e a maior taxa per capita provém da região Centro-oeste, com cerca de 300,8 kg/hab/ano (Figura 4; ABRELPE,2020).

Figura 4 - Coleta total e per capita de RSU no Brasil por região (Fonte: Abrelpe, 2020).



A PNRS acelerou a implementação de usinas de reciclagem dos resíduos sólidos e de demolição, que passaram de 10 em 1997 para cerca de 105 em 2015, conforme **Error! Reference source not found..** Dessas, 54% concentram-se no estado de São Paulo, sendo seguido pelos estados do rio Grande do Sul, Rio de Janeiro e Paraná (ambos com cerca de 7%). O setor privado representa a maior parte do mercado, respondendo por 83% das usinas de reciclagem (MIRANDA; ANGULO; CARELI, 2009).

Figura 5 - Quantidade de usina de reciclagem de RCD no Brasil (Fonte: Miranda et al, 2009).



Segundo Miranda, Angulo e Careli (2009), a adoção do registro da geração de RCD's possibilitou entender a composição desses resíduos e notar a sua variação segundo diferentes tipos de obras. A Tabela 1, mostra a composição dos resíduos em um edifício residencial multipiso de 11.984 m² em São Paulo (obra A) e um edifício residencial multipiso de 26.613 m² em Recife.

Tabela 1 - Composição de RCD em duas obras distintas (Fonte: Miranda et al, 2009).

Resíduo	Obra A (%) – toda a obra		Obra B (%) – apenas fase de estrutura	
	Vol.	Massa	Vol.	Massa
Classe A	50,8	79,6	37,6	80,5
Madeira	31,4	10,2	42,0	16,6
Gesso	7,1	9,2	-	-
Papel	6,9	0,6	1,6	0,2
Plástico	3,2	0,3	6,2	0,7
Metal	0,6	0,1	12,6	2,0
Total	100	100	100	100

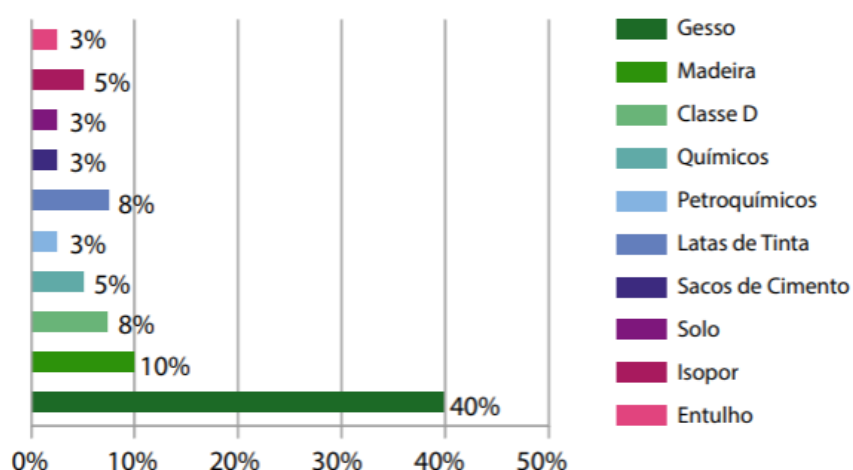
A norma brasileira (ABNT, 2004) classifica os RCD em duas grandes classes, sendo essas definidas pela cor predominante do resíduo:

- I. Cinza – Inclui cimentos, argamassas e componentes cimentícios.
- II. Vermelho – Compostos cerâmicos, predominantemente de cerâmica vermelha.

Estimativas sobre o custo para transporte e deposição desses materiais giram em torno de R\$ 45 milhões ao ano, com custo de remoção variando de R\$9 a R\$20 por m³ de material para a cidade de São Paulo (SCHNEIDER, 2003).

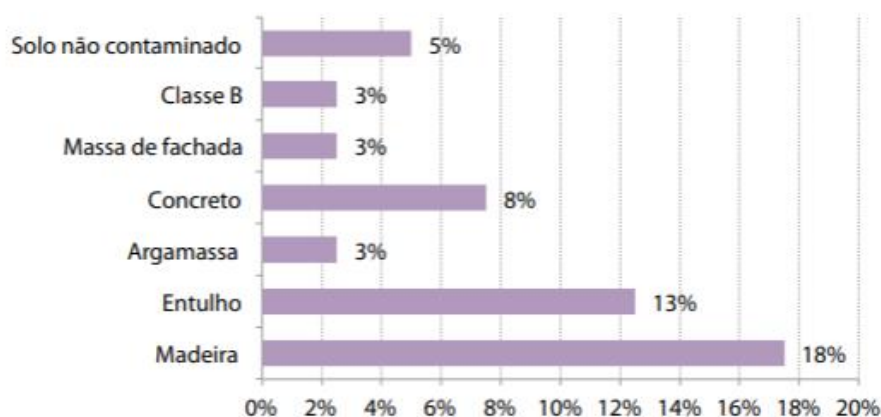
No estado de São Paulo, as empresas que lidam com o gerenciamento de resíduos enfrentam maior dificuldade principalmente ao lidar com gesso, madeira e compostos da classe D (Figura 6; SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, 2012).

Figura 6 – Enquete realizada com construtoras do Estado de São Paulo (Fonte: Secretaria do Meio Ambiente, 2012).



O mesmo levantamento supracitado, também demonstra que resíduos como madeira e entulho possuem reutilização nas próprias obras com taxas de 18 e 13% (em volume) respectivamente. Por outro lado, argamassa, massa de fachada e resíduos classe B apresentam o menor índice de reaproveitamento (3%; Figura 7; SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, 2012).

Figura 7 - Taxa de reutilização de resíduos em obras de São Paulo (Fonte: Secretaria do Meio Ambiente, 2012).



2.4 RESÍDUOS METÁLICOS

Foram selecionados alguns resíduos para maior destaque, sendo estes metais com maior valor econômico agregado e por estarem relacionados com as atividades de mineração.

Os resíduos metálicos são chamados de sucatas metálicas e compõe cerca de 2,3% da geração de resíduos do país, segundo levantamento da Abrelpe (2020). Compõe essas sucatas diversos metais de interesse como ferro, aço, cobre, alumínio, zinco e magnésio.

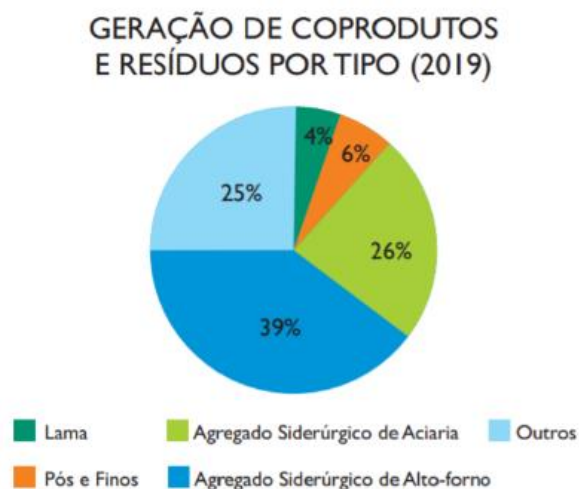
2.4.1 OS RESÍDUOS DO AÇO

A indústria do aço brasileira é composta por cerca de 32 usinas, tendo uma capacidade instalada para a produção de 51,5 milhões de toneladas ao ano. O país desponta como o 9º maior produtor mundial desse metal, empregando 112 mil pessoas e um faturamento líquido anual de 98,2 bilhões de reais (INSTITUTO DO AÇO, 2020).

Em 2019, essa indústria consumiu como matéria prima 37 milhões de toneladas de ferro, mais de 12 milhões de toneladas de carvão mineral, 1 milhão de toneladas de ferro gusa e 5 milhões de toneladas de sucata externa. Somam-se a esses números mais 23 milhões de toneladas de ferro gusa e 3 milhões de

toneladas de sucata de fontes internas e recirculação de subprodutos dentro da cadeia produtiva. Como resultado anual, foram produzidos 29 milhões de toneladas de aço bruto e 18 milhões de toneladas de coprodutos (Figura 8; INSTITUTO DO AÇO, 2020).

Figura 8 - Geração de resíduos pela indústria do aço (Fonte: Instituto do aço, 2020).



Os principais coprodutos gerados foram agregados para a siderurgia de aciaria e para altos-fornos. Desses, cerca de 94% foram reaproveitados pela própria indústria, 4% foi descartado e apenas 2% ficaram alocados como estoque.

Existem iniciativas e estudos para reaproveitamento industrial dos altos teores de ferro, cromo, níquel e chumbo presentes nas poeiras e lamas de aciarias. Essa reciclagem permite a geração de uma liga, rica em ferro, níquel e cromo, que pode ser utilizada como matéria prima para a produção de aço. Outro benefício dessa abordagem, é a geração de um resíduo livre de compostos tóxicos como o chumbo e cromo hexavalente (NOLASCO SOBRINHO; TENÓRIO, 2004).

2.4.2 OS RESÍDUOS DO COBRE

A indústria de cobre brasileira demanda primariamente da importação dos grandes centros produtores mundiais, sendo esses o Chile, China, Peru, EUA e Austrália. O metal possui suas reservas mundiais bem concentradas, o que faz com que Chile, Peru e Austrália detenham mais de 53,3% dos depósitos do mundo (ROCIO; SILVA; CARVALHO; CARDOSO*, 2012).

Dados de 2010, mostram que o Brasil importou 468 toneladas de concentrado de cobre (sendo 91% vindas do Chile) e exportou 631 toneladas de cobre metálico. As principais minas do país localizam-se no Pará e Goiás, responsáveis por 85% da produção nacional (ROCIO; SILVA; CARVALHO; CARDOSO*, 2012).

Uma das grandes vantagens do cobre e seu alto potencial de reaproveitamento. A reciclagem do metal corresponde por aproximadamente um sexto da produção mundial. O cobre e suas ligas metálicas podem ser reaproveitados indefinidamente, sem que haja perda de suas propriedades químicas e mecânicas. O processo de reciclagem utiliza apenas um sexto da energia requerida na produção de metal “virgem” e ajuda a explicar que cerca de 80% do material já produzido até hoje no mundo ainda esteja dentro de rotas de produção (ROCIO; SILVA; CARVALHO; CARDOSO*, 2012).

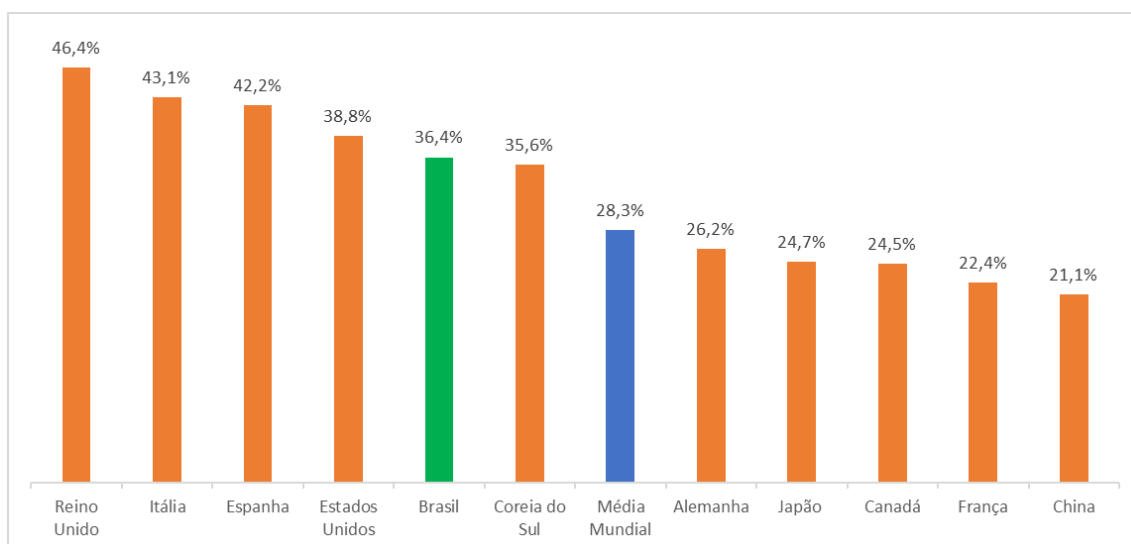
2.4.3 OS RESÍDUOS DO ALUMÍNIO

Em 2011, o Brasil produziu cerca de 1428,8 mil toneladas de produtos derivados de alumínio, dos quais cerca de 26,9% foram consumidos pelo setor de embalagens, 20,7% pelo setor de transportes e 15,1% pelo setor de construção civil. O consumo interno do país representou 1451,7 mil toneladas do material (ABAL,2011).

A indústria nacional emprega cerca de 114 mil pessoas diretamente no setor, gerando um faturamento de R\$ 30,7 bilhões, cerca de 3% do PIB industrial do Brasil. O país é o segundo maior produtor mundial do minério de Bauxita, o terceiro em produção de alumina e o sétimo na geração de alumínio primário (ABAL,2011).

O país é um dos maiores recicladores de latas de alumínio para bebidas do mundo, chegando a índices de reaproveitamento nesse setor próximos a 97,6% do que é comercializado, movimentando um setor que gera R\$ 1,8 bilhão de reais e oferece renda para cerca de 250 mil pessoas. O alumínio pode ser reciclado continuamente independente da forma em que é comercializado. No cenário nacional, o reaproveitamento desse metal é de cerca de 36,4% frente a uma média mundial de 28,3% do que é produzido (Figura 9; ABAL,2011).

Figura 9 - Reutilização média da produção de alumínio por país (Adaptado de Abal,2011).



2.5 RESÍDUOS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS (REEE)

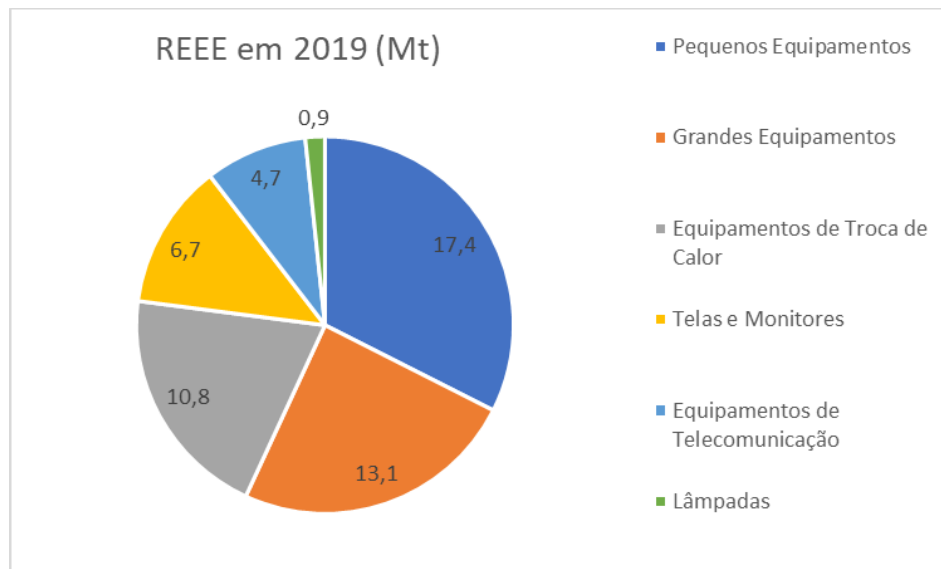
Os REEE são definidos pela legislação europeia como equipamentos que funcionam a base de correntes elétricas ou por meio da indução de campos magnéticos que já não mais exercem suas funções adequadamente ou que já chegaram ao fim da sua vida útil. (UNIÃO EUROPEIA, 2003). Já Williams, Kahhat, Allenby, Kavazanjian, Kim e Xu (2005) consideram os REEE como quaisquer equipamentos eletroeletrônicos que tenham deixado de ser valor ou função para os consumidores finais.

Com o avanço tecnológico cada vez mais rápido, temos uma diminuição da vida útil dos equipamentos eletroeletrônicos. Esse avanço, aliado aos designs de obsolescência programada (onde os produtos são feitos com vida útil limitada) e o crescimento econômico de diversas nações (tornando a tecnologia mais acessível) colaboram para explicar o aumento exponencial na geração e disposição dos REEE (AWASTHI ET AL, 2018).

Dados levantados pelo portal Global E-waste Monitor (2020), estimam que o volume de REEE passou de 44,4 milhões de toneladas em 2014, para patamares de 53,6 milhões de toneladas em 2019, com projeções de em 2030 chegar a 74,7 milhões de toneladas, apresentando ritmo de crescimento três vezes maior do que qualquer outro resíduo urbano. A principal parcela desse volume é composta por pequenos equipamentos (17,4 milhões de toneladas e um

aumento de 4% desde 2014), seguido pela parcela de grandes equipamentos (13,1 milhões de toneladas com aumento de 5% desde 2014) com o menor volume sendo composto por lâmpadas (0,9 milhão de toneladas e crescimento de 4% desde 2014) (Figura 10; CUCCHIELLA *ET AL*, 2015).

Figura 10 - Composição dos REEE no mundo em 2019 (Adaptado Global E-Waste, 2020).



A geração per capita dos REEE alcançou em 2019 os 7.3 quilogramas no mundo, porém com ampla variação de acordo com o nível de industrialização e avanço econômico da região. Enquanto a África contribuiu com 2,9 milhões de toneladas, a Ásia gerou 24,9 milhões de toneladas no mesmo ano. Nas Américas, Europa e Oceania esse número chegou a 13,1, 12 e 0,7 milhões de toneladas de resíduos respectivamente. Desse volume, apenas cerca de 17,4% foi documentado, coletado e devidamente reciclado, tendo a Europa como maior taxa de reaproveitamento (42,5%) e a África como a pior (0,9%) (FORTI; BALDÉ; KUEHR; BEL, 2020).

Um dos grandes problemas quanto aos REEE é a baixa vida útil desses produtos. Geladeiras e televisões apresentam tempo de uso, em média, de 10 a 7 anos, respectivamente. Já em celulares e computadores pessoais, essa vida cai para um intervalo de 1 a 5 anos (Figura 11; FORTI; BALDÉ; KUEHR; BEL, 2020).

Figura 11 - Vida útil de equipamentos eletroeletrônicos (Fonte: Forti, 2020).



O Brasil é o quinto maior gerador de REEE no mundo e o segundo maior nas Américas. No ano de 2019, o país gerou 2,1 milhões de toneladas, com uma produção per capita de 10,2 quilograma por habitante. Dados do IBGE de 2002, 2009 e 2015 mostram que, no período, a porcentagem de residências brasileiras com acesso a equipamentos elétricos e eletrônicos aumentou (Tabela 2 **Error! Reference source not found.**). Em 2015, cerca de 58% das casas no país contavam com pelo menos 1 aparelho celular, atualmente a densidade de celulares no país é de 113,04 cel/100 hab, segundo a Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações).

Tabela 2 - Porcentagem de residências com equipamentos eletroeletrônicos no Brasil (Fonte: IBGE, 2001, 2008, 2015).

Equipamento	Porcentagem de residências		
	2001	2008	2015
TVs	89	95	97
Refrigeradores	85	92	98
Freezers	19	16	17
Máquinas de lavar	34	42	61
Aparelhos de som	88	89	69
Computadores	13	35	46
Celulares	8	42	58

Tomando como exemplo o estado de São Paulo, principal polo econômico do país, o uso de EEE está principalmente concentrado em celulares e televisões de tubos de raios catódicos que, somados, representam 21,6% dos produtos utilizados (Figura 12). Equipamentos como televisões LCD, freezers e notebook

compõe menor parcela do acumulado total (RODRIGUES, BOSCOV, GÜNTHER, 2019).

Figura 12 - Composição do EEE em São Paulo (Fonte: Rodrigues et al, 2019).

Equipamento	(%)	Itens/domicílio
Celular	11,3	2,1
TV CTR (tubo de raios catódicos)	10,3	1,9
Ferro elétrico	6,1	1,1
Geladeira	5,8	1,1
Máquina de lavar roupas	5,6	1,0
Ventilador	5,5	1,0
Liquidificador	5,4	1,0
Secador de cabelo e prancha	5,3	1,0
DVD player	5,3	1,0
Aparelho de som	5,3	1,0
Forno microondas	3,8	0,7
Batedeira	3,6	0,7
Gril ou sanduicheira	3,2	0,6
Computador	3,1	0,6
Furadeira	2,9	0,5
Radio	2,6	0,5
MP3/MP4 player	2,4	0,4
Aspirador de pó	2,2	0,4
Impressora	2,2	0,4
LCD display	1,6	0,3
CRT display	1,4	0,3
Notebook	1,3	0,2
TV LCD	1,1	0,2
Videocassete	1,0	0,2
Barbeador	1,0	0,2
Freezer	0,7	0,1
Total	100,0	18,2

Desde 2019, existe um acordo setorial em vigor no país, para assegurar iniciativas de logística reversa para os REEE. Tomando como exemplo a Green Eletron, a empresa coletou 514 toneladas de resíduos eletroeletrônicos (sendo 342 toneladas de eletrônicos e 171 de baterias). De todo esse volume, foram reaproveitadas 100 toneladas de metais ferrosos e 47,5 toneladas de plásticos, poupando a emissão de 69 toneladas de gás carbônico (ABRELPE, 2020).

A composição dos REEE pode ser muito variada e afetada por diversos aspectos, como o nível econômico e a riqueza de uma região. Levantamento empírico feito no Japão pelo HARL (*Home Appliance Recycling Laws*)

caracterizou alguns aparelhos como mostrado na Tabela 3 (GOODSHIP; STEVELS; HUISMAN, 2019).

Tabela 3 - Composição de REEE por tipo de equipamento (Fonte: Adaptado, Harl, 2019).

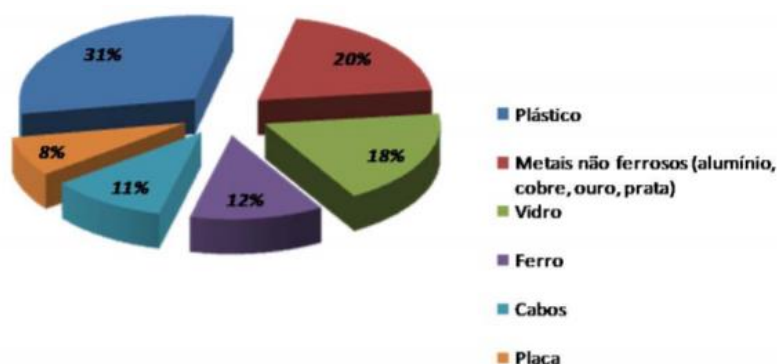
Material	Televisão	Máquina de Lavar	Ar-condicionado	Geladeira
Vidro	57	-	-	-
Plástico	23	36	11	40
Ferro	10	53	55	50
Cobre	3	4	17	4
Alumínio	2	3	7	3
Outros	5	4	10	3

Outro estudo feito no Instituto de Energia e Ambiente da USP, conferiu as seguintes composições para um desktop e um notebook conforme Tabela 4 e Figura 13.

Tabela 4 - Composição média de um desktop (Fonte: Xavier et al, 2012).

Materiais	Peso	Percentual
Ferro	5,4 Kg	67%
Placas eletrônicas	1,2 Kg	15%
Plástico	0,6 Kg	7%
Alumínio	0,5 Kg	6%
Fios e cabos	0,4 Kg	5%
TOTAL	8,1 Kg	100%

Figura 13 - Composição média de um notebook (Fonte: Xavier et al, 2012).



(*) Ensaios realizados na área de reciclagem da Itaútec

Este mesmo estudo prático, criou uma estimativa da recuperação mássica de uma tonelada de REEE, que teria um potencial de reaproveitamento de 350

quilogramas de ferro, 70 quilogramas de alumínio, 1000 a 300 gramas de prata, 170 gramas de cobre, 300 gramas de ouro e de 30 a 70 gramas de platina (XAVIER; SANTOS; FRADE; CARVALHO, 2012).

2.5.1 Alternativas Para Recuperação Metálica Nos REEE

Dado o potencial econômico do reaproveitamento dos resíduos eletroeletrônicos, existem algumas rotas possíveis de beneficiamento, dentre as quais destacam-se a hidrometalúrgica, a pirometalúrgica e a biohidrometalúrgica. Cada qual, com seu processo para recuperação de metais de interesse, mas baseando-se em princípios químicos, térmicos ou biológicos, respectivamente (HONG; VALIX, 2014; TUNCUK *et al.*, 2012; Figura 14).

Figura 14 - Comparação entre as rotas de beneficiamento de REEE. (Adaptado: CUI et al, 2008).

Pirometalurgia	
Aspectos positivos	Altas taxas de produção Instalação que permite expansão
Aspectos negativos	Alto gasto energético Alto investimento econômico necessário Baixa taxa de reaproveitamento de metais Requer uso de técnicas adicionais em um pós processamento
Hidrometalurgia	
Aspectos positivos	Altas taxas de extração Menor investimento inicial Trabalha em baixas temperaturas Baixa emissão de gás carbônico
Aspectos negativos	Alta periculosidade Alta produção de lixiviado Uso de equipamentos resistentes a corrosão Diversos processos químicos para cada tipo de metal
Biohidrometalurgia	
Aspectos positivos	Tecnologia moderna e ecológica Recuperação de ampla gama de metais Baixo investimento Permite lixiviar metais específicos
Aspectos negativos	Aplicação prática apenas em escala laboratorial Requer cuidados com os microrganismos Metais tóxicos podem diminuir a biomassa Processos lentos

Para aumentar a eficiência dessas técnicas de recuperação, processos de beneficiamento como separação magnética, separação por corrente de ar,

separação eletrostática e separação por vácuo são utilizadas e incentivadas (RENE *et al.*, 2021).

Rota Hidrometalúrgica

Os princípios da hidrometalurgia consistem na extração dos materiais de interesse pelo uso de produtos químicos, fazendo primeiro uma lixiviação para solubilizar os metais e em um segundo momento a recuperação desses compostos lixiviados. Quanto maior for a presença de compostos economicamente atrativos, maiores serão a eficiência e retorno desse método (RENE *et al.*, 2021).

Essa técnica já se mostrou eficaz para a recuperação de metais como cobre, zinco, manganês, metais preciosos como ouro, prata e platina e até mesmo terras raras como neodímio (SETHURAJAN *et al.*, 2019)

Por outro lado, os impactos ambientais associados ao uso de compostos lixiviantes merece atenção. A lixiviação pode ser feita com líquidos altamente ácidos ou básicos, além de envolver compostos inflamáveis e produzir um efluente tóxico e corrosivo (CUI *et al.*, 2008).

Ainda assim, dado seu potencial de recuperação, os processos hidrometalúrgicos tem recebido cada vez maior atenção e se mostrado necessários para viabilizar a mineração urbana (RENE *et al.*, 2021).

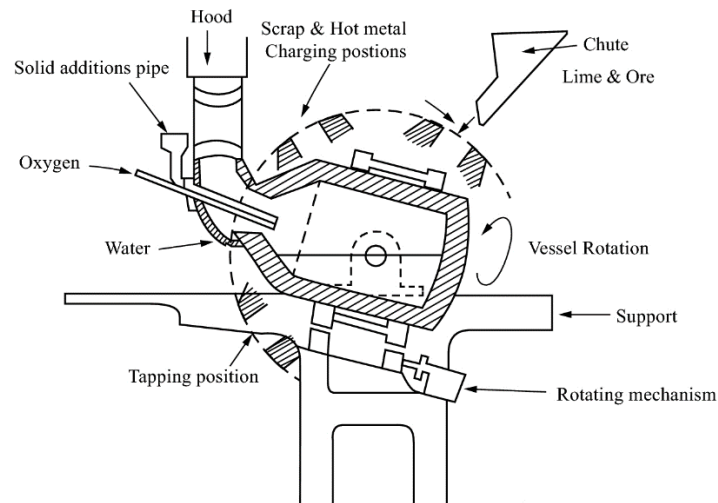
Rota Pirometalúrgica

As rotas de pirometalurgia utilizam como princípio básico altas temperaturas para fundir e volatilizar metais de interesse, que podem então serem recolhidos e solidificados em uma etapa posterior. O problema dessa técnica é a pureza dos materiais recuperados, uma vez que as placas de circuito impresso, por exemplo, ao serem derretidas apresentam tanto metais puros como ligas metálicas, que formaram o produto final recuperado (MA *et al.*, 2019).

Essa tecnologia é bastante abrangente e capaz de reciclar uma grande gama de metais, mas sempre com um pós-processamento seja por hidrometalurgia ou tratamentos eletroquímicos. Tendo também um alto gasto energético e econômico. Um dos processos mais famosos de pirometalurgia é o método de Kaldo, onde o material é lavado, passa por uma lixiviação ácida de

alta pressão, uma fundição redutiva, um sopro de oxigênio e, por fim, refino eletrolítico. Essa abordagem garante boas taxas de recuperação e de produção. (DUTTA *et al.*, 2020; Figura 15).

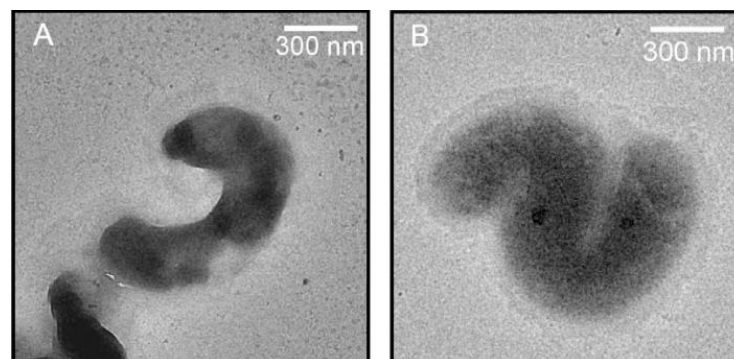
Figura 15 - Demonstração do método de Kald. (Fonte: DUTTA *et al.*, 2020)



Rota Biohidrometalúrgica

Dentre as alternativas citadas até o momento, essa caracteriza a rota mais inovadora e recente para o reaproveitamento de metais de interesse. Utilizando microrganismos como *Acidithiobacillus* sp. e o *Leptospirillum* sp., pode-se fazer a extração de metais tanto de fontes primárias como secundárias (KAKSONEN *et al.*, 2020; Figura 16).

Figura 16 - Exemplar de *Leptospirillum* sp. (Fonte: ROJAS-CHAPANA; TRIBUTSCH, 2004).



A biohidrometalurgia possui duas etapas chaves. A primeira é a biolixiviação, em que os organismos produzem ácidos orgânicos que dissolvem os metais chave. A segunda fase do processo consiste em uma recuperação biológica, que se pode dar tanto por bioabsorção como bioprecipitação. Na bioabsorção, a

biomassa absorve os metais por meio de sua membrana celular, utilizando esses compostos como parte de seu mecanismo de defesa. A bioprecipitação tem como mecanismo base a reação dos compostos metálicos com resíduos metabólicos dos microrganismos que gera compostos que são insolúveis no meio (BRANDL *et al.*, 2008).

Apesar de estudos recentes terem demonstrado que a biohidrometalurgia pode recuperar cobalto de baterias, cobre de placas de circuito impresso e até ouro de REEE, essa técnica ainda possui apenas escala laboratorial e um ponto de atenção de uma vez iniciada, demorar para poder ser contida (RENE *et al.*, 2021).

3 METODOLOGIA

A formulação desse trabalho é com base em revisão de literatura, análise de dados, estatísticas e considerações acerca dos trabalhos sobre o assunto de interesse.

A estrutura é apoiada em revisão bibliográfica e estudos sobre os resíduos sólidos urbanos. Buscou-se artigos e relatórios técnicos que fornecessem um panorama geral da geração de RSU. A partir desse cenário, a busca foi aprofundada em resíduos de maior interesse econômico e que estão relacionados com o conceito de mineração urbana: metais (como aço, cobre, alumínio), RCD e REEE.

Uma vez quantificados, a próxima etapa de estudo foi uma análise qualitativa para a caracterização desses resíduos de interesse, de modo a entender seu real potencial econômico e propriedades como grau de liberação de minerais chave e concentração destes por granulometria.

Essa análise qualitativa foi realizada por meio de uma análise bibliométrica de literatura de artigos acadêmicos. Na sessão 3.2.1 e 3.2.2 será discutida mais a fundo a relevância desses temas e dessa abordagem.

De posse dessa estruturação, a etapa final será uma discussão sobre os problemas e dificuldades para que os resíduos sejam mais bem explorados, para explorar mais a fundo a implementação de técnicas de mineração urbana.

3.1 REVISÃO DE LITERATURA

Para quantificar os resíduos sólidos, buscou-se relatórios técnicos que fornecessem uma visão geral dos RSU no Brasil. Apoiado no resultado dessas pesquisas, criou-se um panorama de geração, porcentagem de coleta, destinação desses resíduos e uma análise da composição da “matriz de resíduos” no país.

A próxima etapa foi o aprofundamento da pesquisa pensando em alguns tipos de resíduos. Para essa definição, realizou-se estudos prévios para

entender o potencial de reaproveitamento de certos compostos e seu possível valor econômico. Com isso, os pontos de interesse foram definidos principalmente em resíduos com composição mineral, alto valor econômico e reciclagem possível. Metais (aço, cobre, alumínio), resíduos de construção e demolição e, por fim, os resíduos elétricos e eletroeletrônicos foram definidos como pontos focais.

Os próximos passos foram em direção a trabalhos qualitativos. Por meio de artigos acadêmicos e teses, o foco será na caracterização desses resíduos de interesse. Será necessário entender um panorama de caracterização tecnológica desses materiais.

3.2 COLETA DE DADOS

Para entender mais a fundo sobre a caracterização e quantificação do potencial de reciclagem dos resíduos de interesse, realizou-se uma busca na plataforma virtual *Scopus* (disponível no endereço www.scopus.com) para entender-se os temas de interesse e a abrangência de artigos e teses publicados sobre o assunto.

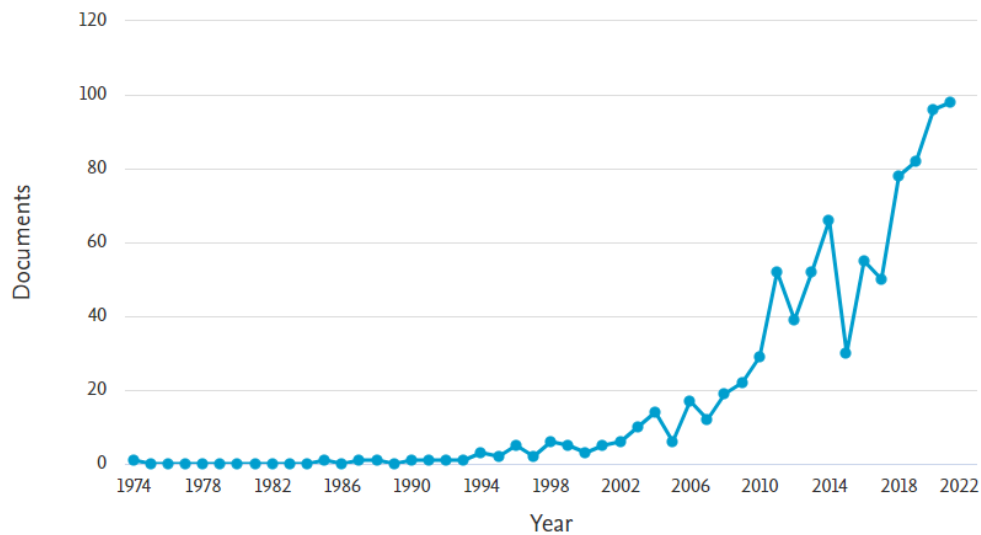
Foram escolhidos os artigos de maior relevância, seguindo os seguintes critérios:

- i. Autores com maior número de publicações e com maior conhecimento sobre o assunto.
- ii. Artigos mais recentes e com maior número de citações em outros textos.
- iii. Publicações em revistas de renome e prestígio nas áreas de interesse.

3.2.1 ESTUDOS SOBRE RCD

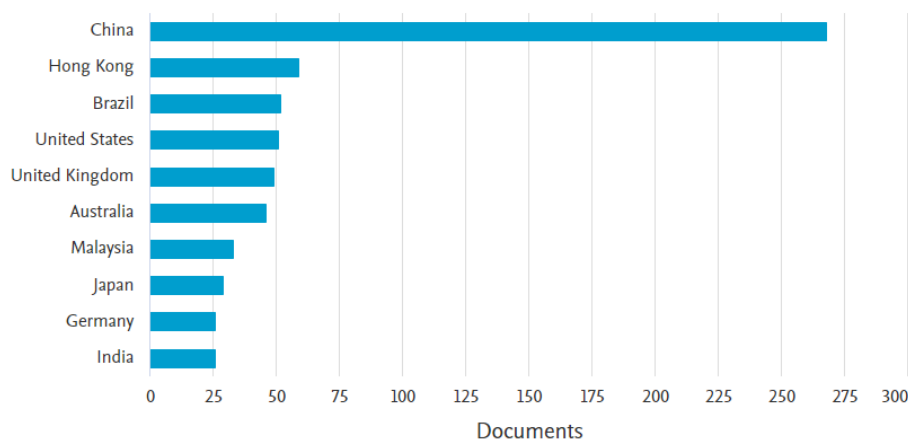
Os estudos sobre RCD foram buscados por meio das palavras-chave “construction and recycling” e mostram a crescente importância do assunto e o maior número de publicações ano a ano. As publicações que eram da ordem de 6 ao ano em 2002 passaram para 98 até setembro de 2021, crescendo 1633% no período (Figura 17).

Figura 17 - Documentos sobre "Construction waste and recycling" ao longo dos anos. (Fonte: Scopus, 2021)



No período acumulado, a China lidera o ranking de publicações por país, com 268 publicações na plataforma. O segundo lugar é ocupado por Hong Kong com 59 publicações. O Brasil aparece logo em seguida, com suas 52 publicações (Figura 18Error! Reference source not found.).

Figura 18 - Publicações por país. (Fonte: Scopus, 2021).

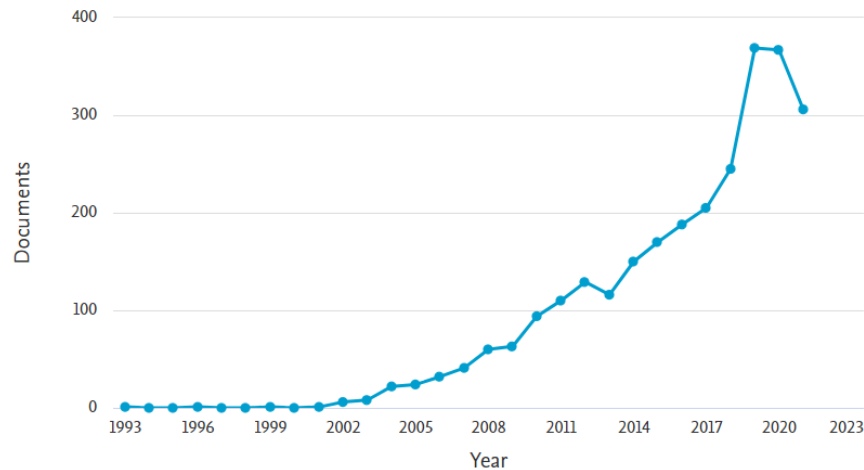


3.2.2 ESTUDOS SOBRE REEE

A análise desse tipo de resíduo foi feita através das palavras-chave “e-waste and recycling” de modo a entender um panorama mais amplo sobre o assunto. Obteve-se cerca de 2.709 resultados diferentes, com artigos textos de 1993 até 2021. O número de publicações a cada ano mostra a grande relevância do assunto e como o interesse na reciclagem de eletroeletrônicos é crescente.

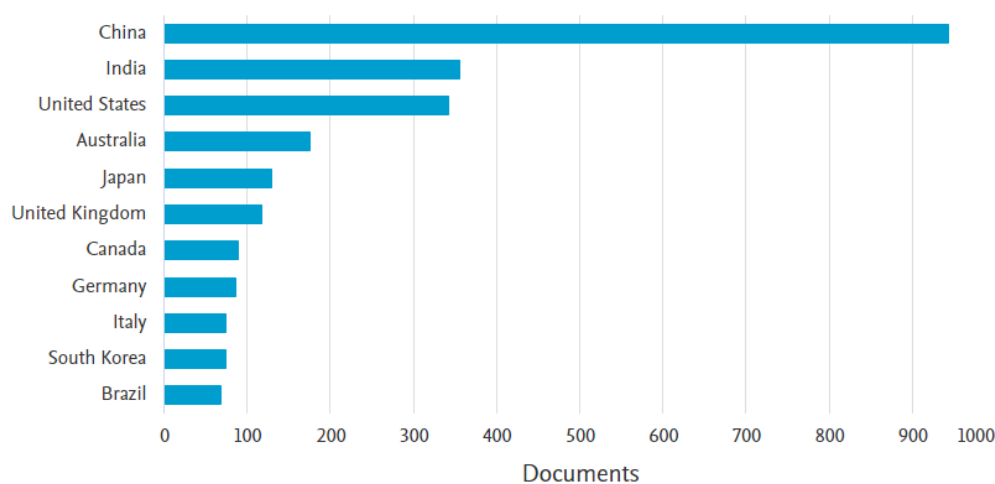
Conforme Figura 19, pode-se perceber que a plataforma passou de 2 artigos por ano, por volta de 2002, para 306 em setembro de 2021, um aumento de 15.200%.

Figura 19 - Documentos sobre "E-waste and recycling" ao longo dos anos. (Fonte: Scopus, 2021).



A China domina o cenário internacional de publicações, com cerca de 943 documentos publicados e os principais autores, dentre eles Huo, X. com 73 textos. Índia e Estados Unidos posicionam-se em segundo e terceiro lugares, com 355 e 342 publicações, respectivamente. O Brasil ocupa a 16ª posição, com seus 68 artigos, conforme Figura 20 (Scopus, 2021).

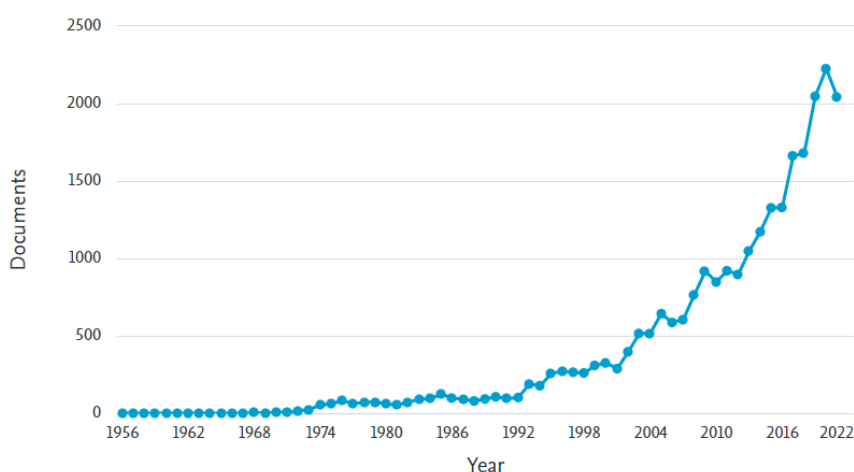
Figura 20 - Publicações por país. (Fonte: Scopus, 2021).



3.2.3 ESTUDOS SOBRE RESÍDUOS METÁLICOS

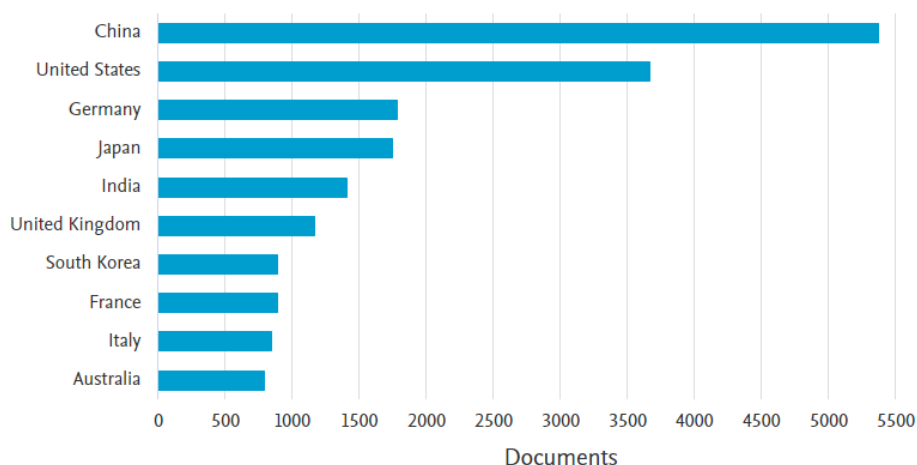
Os resíduos metálicos são objetos de estudo há mais tempo, com a primeira publicação com as palavras-chave “Metal and Recycling” na plataforma em 1956. O número de documentos também apresenta uma crescente, passando de 397 em 2002, para 2042 até setembro de 2021, um aumento de 514%, conforme Figura 21.

Figura 21 - Publicações por ano sobre "Metal and Recycling". (Fonte: Scopus, 2021)



Novamente temos um domínio da China, que com 5375 documentos, é o país com maior número de publicações. Completam as primeiras posições Estados Unidos e Alemanha, com 3671 e 1789 textos, respectivamente (Figura 22).

Figura 22 - Publicações por país. (Fonte: Scopus, 2021).



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO COMPOSICIONAL DOS REEE

A caracterização dos resíduos eletroeletrônicos é de extrema importância para entender-se como os metais de interesse encontram-se nesse tipo de material. Parâmetros técnicos importantes como grau de liberação, porcentagem mássica auxiliam a indicar o real potencial econômico de cada composto.

Uma revisão da literatura mostra uma ampla gama de composições, a variar pela origem do REEE, sua idade de fabricação e região de manufatura. Apesar dessa variação, é possível consolidar uma média da presença de metais de acordo com o equipamento (CHU, *et al.* 2008; Tabela 5).

Tabela 5 - Composição metálica média por tipo de REEE. (Fonte: CHU, 2008).

REEE	Massa (%)			Massa (ppm)	
	Fe	Cu	Al	Ag	Au
Sucata placa de TV	28,0	10,0	10,0	280	20
Sucata placa de PC	7,0	20,0	5,0	1000	250
Sucata de celular	5,0	13,0	1,0	1380	350
Sucata de DVD	62,0	5,0	2,0	115	15
Sucata de calculadora	4,0	3,0	5,0	260	50
Sucata de placa mãe de PC	4,5	14,3	2,8	639	566
Sucata de placa de circuito interno	12,0	10,0	7,0	280	110
Sucata eletrônica	8,3	8,5	0,7	29	12
Sucata de PC	20,0	7,0	14,0	189	16
Placa de circuito impresso	5,3	26,8	1,9	3300	80
Sucata de REEE (amostra de 1972)	26,2	18,6	-	1800	220

4.1.1 COMPOSIÇÃO PONTUAL POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A MEV é uma técnica de caracterização química de materiais. Por meio da emissão de um feixe de elétrons, o equipamento excita os átomos da amostra que emitem um sinal característico. Esse sinal pode ser convertido em uma imagem de alta resolução do material analisado, com elevada profundidade de campo (LÓPEZ *et al.*, 2016).

A análise permite uma caracterização mássica de uma amostra. Tendo como base pó de REEE diverso obtido pela moagem de material reciclado, por exemplo, foi feito um ensaio por um microscópio eletrônico JEOL JSM-6300 em ambiente de alto vácuo, com ampliação de 20X e voltagem média de aceleração de 20kV. Os resultados obtidos representam uma média de diversas aferições realizadas. Pode-se notar maior presença mássica de cobre e níquel, com teores altíssimos de ouro (LÓPEZ *et al.*, 2016; Tabela 6).

Tabela 6 - Resultados análise MEV. (Fonte: LÓPEZ *et al.*, 2016).

Element	average weight / %
Cu	58.4 ± 2.1
Ni	25.0 ± 2.8
Zn	0
Ag	0.04 ± 0.06
Au	10.01 ± 0.1
Sn	6.6 ± 4.8
Pt	0

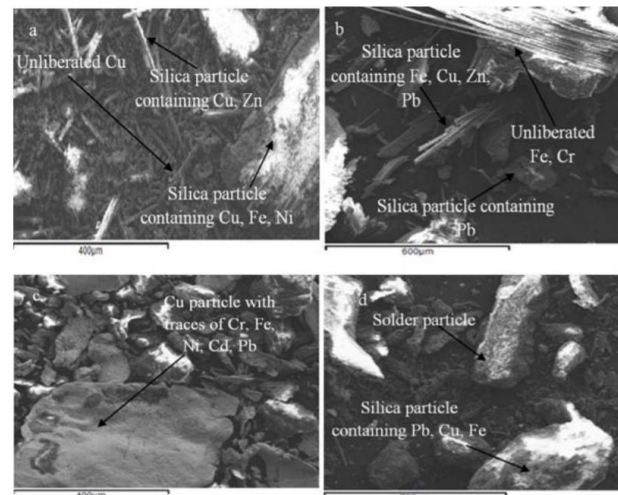
Outro uso interessante do MEV é o estudo do grau de liberação de partículas que, de acordo com Gaudin (1939) é a porcentagem de um mineral como partícula livre, em relação ao total de partículas livres e mistas de um mineral. Entender o grau de liberação de certos elementos é necessário para otimizar a recuperação mássica destes. Pensando em placas de circuito interno, por exemplo, talvez seja necessário um processo de cominuição para obter mais partículas metálicas livres.

Priya e Hait (2017) conduziram um ensaio prático para entender o grau de liberação metálica em placas de circuito interno. O preparo do material consistiu na remoção de capacitores e outros aparelhos periféricos dessas placas, que então foram cominuídas por um moinho de facas SM200 da alemã Retsch GmbH. O ensaio de caracterização foi feito com um microscópio EVO 18 da também alemã Zeiss, com ampliação de 100x e operação de 20 keV.

Os resultados demonstraram grande heterogeneidade de formas e tamanhos de partículas. Os metais apresentaram baixo grau de liberação, muito pela liga formado com sílica. As partículas com tamanho menor que 1 mm

apresentaram rica gama de metais, porém muitas vezes em amálgamas com outros metais (PRIYA; HAIT, 2017; Figura 23).

Figura 23 - Ensaio MEV em placas de circuito interno. (Fonte: PRIYA; HAIT, 2017).

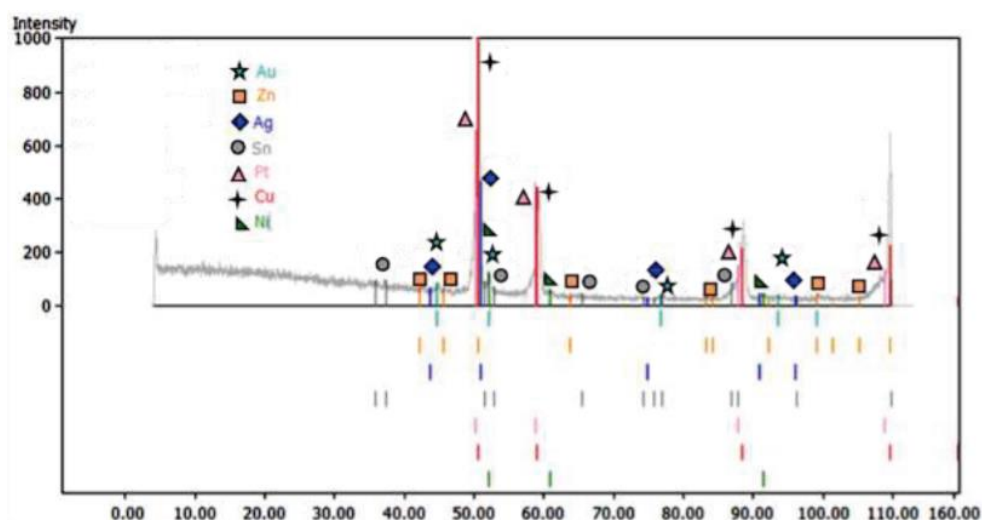


4.1.2 CARACTERIZAÇÃO POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

A Difractometria por Raios-X é um ensaio para caracterização da estrutura cristalina de uma amostra ou material. A técnica consiste na emissão de raios X cujos fótons chocam-se com os átomos do material analisado e mudam de trajetória, tendo energia e fase constantes. A organização estrutural da amostra ditará os ângulos que os fótons espalhados farão em relação a rota original. Assim, temos uma quantificação da estrutura cristalina (FONSECA FILHO; LOPES, 2013).

Tomando como base a mesma amostra analisada na Tabela 6, o ensaio de DRX mostrou maior intensidade nos picos correspondentes as fases de cobre, níquel, zinco e estanho. Metais como prata, ouro e platina também puderam ser notados (LÓPEZ *et al.*, 2016; Figura 24).

Figura 24 - Padrões de difração de REEE em ensaio de DRX. (Fonte: LÓPEZ et al, 2016).

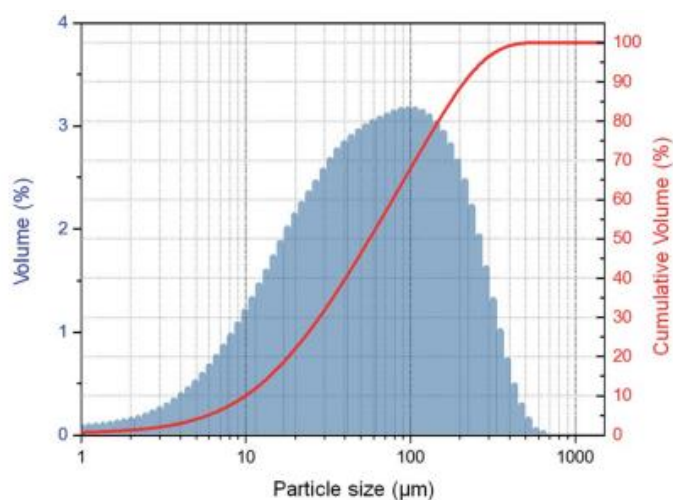


4.1.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA POR ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA COM PLASMA (ICP)

A análise de ICP serve para quantificar diversos tipos de elementos por meio da emissão de radiação eletromagnética emitida por material excitado por plasma de argônio. Por meio dessa radiação, pode-se ionizar um átomo que emite uma radiação característica, a depender do tipo de elemento químico estudado. A vantagem da utilização de plasma é a alta temperatura de operação (de 7000 a 10.000 K) que pode excitar uma ampla gama de elementos (YATSUZUKA *et al.*, 2021).

Andrade, Machado, Bacchi e Pereira-Filho (2019) conduziram um ensaio de ICP para entender a caracterização mássica de placas de circuito interno. Foram coletados 4,72 quilos desse material, que passaram por um processo de separação manual de componentes externos, com a posterior cominuição por britagem, moinho de martelo e moinho de facas. Por fim, deu-se um processo de homogeneização de 20 minutos para uma análise do tamanho de partículas da amostra (Figura 25).

Figura 25 - Distribuição de tamanho de partículas pós cominuição. (Fonte: ANDRADE et al, 2019).



Um estudo de amostragem estatística dessa mistura homogênea então foi realizado. Foram coletadas amostras de 100, 300 e 500 mg para analisar qual massa coletada forneceria uma porcentagem máxima de metais de interesse. Os resultados do ensaio de ICP dessas parcelas são expressos pela Tabela 7 e demonstram que a amostra de 300 mg maximizou a recuperação metálica (ANDRADE; MACHADO; BACCHI; PEREIRA-FILHO, 2019).

Tabela 7 - Concentração mássica por amostra. (Fonte: ANDRADE et al, 2019).

Element (% m m ⁻¹)	100 mg	RSD (%)	300 mg	RSD (%)	500 mg	RSD (%)
Ag	0.09 ± 0.01	11	0.034 ± 0.005	15	0.018 ± 0.002	11
Al	6.3 ± 0.5	8	5.9 ± 0.7	11	4.1 ± 0.3	8
As (mg kg ⁻¹)	32 ± 2	5	36 ± 2	5	34 ± 1	4
Au (mg kg ⁻¹)	146 ± 54	37	116 ± 46	39	111 ± 20	18
Ba	0.58 ± 0.04	6	0.61 ± 0.03	5	0.65 ± 0.02	4
Cr	0.41 ± 0.02	5	0.6 ± 0.1	17	0.39 ± 0.08	22
Cu	14.6 ± 0.3	2	19 ± 3	15	22 ± 4	20
Fe	7.7 ± 0.5	6	8 ± 1	14	10 ± 3	28
Ni	0.46 ± 0.02	4	0.57 ± 0.03	6	0.43 ± 0.06	15
Pb	1.28 ± 0.06	5	1.17 ± 0.03	3	1.29 ± 0.09	7
Sb	0.80 ± 0.06	8	0.6 ± 0.1	19	0.39 ± 0.03	7
Si	4.3 ± 0.6	14	1.5 ± 0.1	8	0.84 ± 0.02	2
Sn	4.4 ± 0.6	14	4.9 ± 0.8	17	4.5 ± 0.4	9
Zn	2.45 ± 0.05	2	3.2 ± 0.3	11	2.3 ± 0.4	19

O ensaio também analisou a recuperação desses metais após um processo de hidrometalurgia desses metais, com lixiviação de água régia, para entender se a massa que foi encontrada poderia ser utilizada e reaproveitada (Tabela 8; ANDRADE; MACHADO; BACCHI; PEREIRA-FILHO, 2019).

Tabela 8 - Recuperação de metais por lixiviação. (Fonte: ANDRADE et al, 2019).

Analyte (mg kg ⁻¹)	Added	Determined $\pm$ standard deviation	Recovery (%)
Ag	6	5.3 $\pm$ 0.1	89
Al	60	58.9 $\pm$ 0.6	98
As	9	8.2 $\pm$ 0.6	91
Au	1	0.91 $\pm$ 0.01	91
Ba	10	10.3 $\pm$ 0.7	103
Cr	10	8.8 $\pm$ 0.4	88
Cu	100	87.1 $\pm$ 0.8	87
Fe	60	60 $\pm$ 2	100
Ni	10	8.4 $\pm$ 0.5	84
Pb	20	17 $\pm$ 1	87
Sb	10	10 $\pm$ 1	101
Si	40	36.4 $\pm$ 0.5	91
Sn	40	37.0 $\pm$ 0.4	93
Zn	30	25 $\pm$ 2	85

Pode-se perceber a grande taxa de recuperação para uma ampla gama de metais. A taxa de recuperação variou entre as faixas de 84 a 103%, com destaques para metais valiosos como ouro (92%) e prata (89%). Os resultados também corroboram as análises mássicas prévias e ajudam a reforçar a eficiência da lixiviação, como técnica de reciclagem de materiais em REEE (ANDRADE; MACHADO; BACCHI; PEREIRA-FILHO, 2019).

5 CONCLUSÃO

A geração de resíduos é um produto inerente à atividade humana e, com o incremento populacional e maior poder aquisitivo das famílias, vai se tornar cada vez um problema mais relevante. A finitude de recursos minerais e ambientais também coloca pressão e potencializa os efeitos da geração de resíduos.

Esse problema possui algumas soluções práticas. O incentivo a técnicas de redução, reuso e reciclagem podem ajudar a diminuir o volume de resíduos gerados. Outra solução interessante é explorar o potencial econômico desse material, trazendo retorno financeiro e ajudando a diminuir ainda mais o volume gerado.

Resíduos como eletroeletrônicos, de construção e demolição e sucata de diversos metais possuem grandes riquezas minerais e podem ser reaproveitados com grande expectativa de retornos. No caso das sucatas, a própria indústria utiliza aparas e peças como matéria-prima mineral. A indústria da construção civil também reutiliza diversos materiais como matéria-prima ou com o foco em reaproveitamento. O caso dos REEE tem materiais com teores de ouro, por exemplo, muitas vezes superior ao que as minas mais “ricas” apresentam.

Um estudo mais a fundo sobre os eletroeletrônicos mostrou que as rotas de exploração desse material são três vias principais. Por sua escala menor, a biohidrometalurgia apresenta-se como solução para o futuro, ainda a depender de novos estudos. A pirometalurgia possui maior passivo ambiental envolvido, com seu amplo consumo energético e dependência de outras técnicas para o real aproveitamento de metais. Assim, a hidrometalurgia aparece como candidata de maior potencial presente para suportar a mineração urbana de REEE.

A caracterização tecnológica por diversas técnicas (MEV, DRX e ICP) também ajuda a entender o potencial da reciclagem. Análises por meio das técnicas citadas, mostram que os metais de interesse apresentam grau de liberação apenas em parcelas de granulometria muito pequena, fator esse que não é limitante para a lixiviação. Além disso, a taxa de recuperação metálica pela hidrometalurgia apresentou níveis muito satisfatórios, mostrando grande viabilidade.

Como aspectos que dificultam uma maior implementação de técnicas de mineração urbana temos a diversidade dos resíduos. Os REEE apresentam composição muito heterogênea a depender do tipo de material que os origina, ano de fabricação de produtos e até país de manufatura. Além disso, sem o uso de separação manual de componentes plásticos ou de menor potencial econômico antes da lixiviação, temos uma menor concentração metálica no material. A dificuldade de obter-se uma matéria prima adequada também é ponto de atenção, visto que a coleta seletiva de resíduos ainda não é 100% distribuída.

Por fim, pode-se concluir que a hipótese inicial de que a mineração urbana possui muito potencial foi corroborada pelos diversos estudos e artigos analisados. O que dificulta a maior utilização dessas técnicas é a grande mistura nos resíduos urbanos e a dependência de técnicas que exigem maior controle técnico, como a lixiviação. Mas esses aspectos não são suficientes para inviabilizar o reaproveitamento de metais e outros minerais de interesse nos RSU.

Em um mundo cada vez mais povoado, com uma população cada vez mais dependente de tecnologia, a mineração urbana apresenta-se como parte da solução para todo o passivo ambiental advindo desse desenvolvimento. Em um primeiro momento, baseando-se em técnicas de hidrometalurgia, podemos reaproveitar grande parte dos constituintes dos REEE. Em um futuro, próximo, o olhar das mineradoras deve voltar-se das grandes reservas naturais para as reservas cada vez mais ricas construídas pelo próprio ser-humano, com o fruto de seu avanço tecnológico.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL (São Paulo). Associação Brasileira do Alumínio. **Anuário Estatístico de 2011**. São Paulo: Abal, 2011. 68 p.

ABRECON. **Relatório Pesquisa Setorial 2014/2015**. São Paulo: Sancho Comunicação, 2015. 30 p

ABRELPE. **Panorama Dos Resíduos Sólidos No Brasil 2020**. São Paulo: Abrelpe, 2020. 52 p

ANDRADE, Daniel Fernandes; MACHADO, Raquel Cardoso; BACCHI, Márcio Arruda; PEREIRA-FILHO, Edenir Rodrigues. Proposition of electronic waste as a reference material – part 1: sample preparation, characterization and chemometric evaluation. **Journal Of Analytical Atomic Spectrometry**, [S.L.], v. 34, n. 12, p. 2394-2401, 2019. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c9ja00283a>.

ARORA, Rachna *et al.* Potential and relevance of urban mining in the context of sustainable cities. **Iimb Management Review**, [S.L.], v. 29, n. 3, p. 210-224, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.iimb.2017.06.001>.

AWASTHI A.K., CUCCHIELLA F., D'ADAMO I., LI J., ROSA P., TERZI S., WEI G., ZENG X., (2018). Modelling the correlations of e-waste quantity with economic increase. **Science of the Total Environment**, 613-614, 46-53.

BILLARD, Isabelle. Green solvents in urban mining. **Current Opinion In Green And Sustainable Chemistry**, [S.L.], v. 18, p. 37-41, ago. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.11.013>.

BRANDL, Helmut *et al.* Biomobilization of silver, gold, and platinum from solid waste materials by HCN-forming microorganisms. **Hydrometallurgy**, [S.L.], v. 94, n. 1-4, p. 14-17, nov. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.016>.

Cucchiella, C.; D'Adamo, I.; Koh, S. C. L.; Rosa, P. **Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams**. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 2015, 51, 263

CUI, Jirang *et al.* Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 158, n. 2-3, p. 228-256, 30 out. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.001>.

DUTTA, Sujay Kumar *et al.* Oxygen Steelmaking Processes. **Basic Concepts Of Iron And Steel Making**, [S.L.], p. 343-399, 2020. Springer Singapore. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-2437-0_15.

FONSECA FILHO, Henrique Duarte da; LOPES, Gerson Anderson de Carvalho. Avanços em caracterização de amostras sólidas cristalinas através de Difractometria de Raios-X. **Unifap Estação**, Macapá, v. 1, n. 3, p. 31-45, 2013.

FORTI, Vanessa; BALDÉ, Cornelis Peter; KUEHR, Ruediger; BEL, Garam. **The Global E-waste Monitor 2020**. Onu: World Health Organization, 2020. 120 p.

GOODSHIP, Vannessa; STEVELS, Ab; HUISMAN, Jaco. **Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook**. Usa: Woodhead Publishing, 2019. 728 p.

HONG, Y.; VALIX, M.. Bioleaching of electronic waste using acidophilic sulfur oxidising bacteria. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 65, p. 465-472, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.043>.

INSTITUTO DO AÇO. **Aço & Sustentabilidade 2020**. São Paulo: Instituto do Aço Brasil, 2020. 11 p.

KAKSONEN, Anna H. *et al.* Prospective directions for biohydrometallurgy. **Hydrometallurgy**, [S.L.], v. 195, p. 105376, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105376>.

LIEBERKNECHT, Gabriela. **Análise bibliométrica sobre a flotação de caulinita**. 2016. 175 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

LÓPEZ, C. Cortés *et al.* Speciation and Characterization of E-Waste, Using Analytical Techniques. **Characterization Of Minerals, Metals, And Materials 2016**, [S.L.], p. 629-636, 2016. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-48210-1_79.

MA, En et al. Recovery of Waste Printed Circuit Boards Through Pyrometallurgy. **Electronic Waste Management And Treatment Technology**, [S.L.], p. 247-267, 2019. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-816190-6.00011-x>.

MIRANDA, Leonardo Fagundes Rosemback; ANGULO, Sérgio Cirelli; CARELI, Élcio Duduchi. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 1, n. 9, p. 57-71, mar. 2009.

NOLASCO SOBRINHO, Pedro José; TENÓRIO, Jorge Alberto Soares. Reciclagem da poeira e lama geradas na fabricação de aço inoxidável. **Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 2, n. 57, p. 121-127, jun. 2004.

OTTONI, Marianna et al. A circular approach to the e-waste valorization through urban mining in Rio de Janeiro, Brazil. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 261, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120990>.

PRIYA, Anshu; HAIT, Subrata. Qualitative and quantitative metals liberation assessment for characterization of various waste printed circuit boards for recycling. **Environmental Science And Pollution Research**, [S.L.], v. 24, n. 35, p. 27445-27456, 4 out. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-017-0351-1>.

RENE, Eldon R. et al. Electronic waste generation, recycling and resource recovery: technological perspectives and trends. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 416, p. 125664, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125664>.

ROCIO, Marco Aurélio Ramalho; SILVA, Marcelo Machado da; CARVALHO, Pedro Sergio Landim de; CARDOSO*, José Guilherme da Rocha. Perspectivas atuais da indústria de cobre no Brasil. **BNDES Setorial**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 397-428, nov. 2012.

RODRIGUES, Angela Cassia; BOSCOV, Maria Eugênia Gimenez; GÜNTHER, Wanda Maria Risso. Domestic flow of e-waste in São Paulo, Brazil: characterization to support public policies. **Waste Management**, Amsterdam, v. 102, p. 474-485, 2020.

ROJAS-CHAPANA, José A.; TRIBUTSCH, Helmut. Interfacial activity and leaching patterns of *Leptospirillum ferrooxidans* on pyrite. **Fems Microbiology Ecology**, [S.L.], v. 47, n. 1, p. 19-29, jan. 2004. Oxford University Press (OUP). [http://dx.doi.org/10.1016/s0168-6496\(03\)00221-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0168-6496(03)00221-6).

SCHNEIDER, D. M. **Transporte de resíduos de construção e demolição na cidade de São Paulo**. 2003. 103p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE (São Paulo). **Resíduos da Construção Civil e o Estado de São Paulo**. São Paulo: Governo de São Paulo, 2012. 85 p.

SETHURAJAN, Manivannan *et al.* Recent advances on hydrometallurgical recovery of critical and precious elements from end of life electronic wastes - a review. **Critical Reviews In Environmental Science And Technology**, [S.L.], v. 49, n. 3, p. 212-275, 17 jan. 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10643389.2018.1540760>.

SHARMA, Manu *et al.* Issues and solutions of electronic waste urban mining for circular economy transition: an indian context. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 290, p. 112373, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112373>.

TUNCUK, A.; STAZI, V.; AKCIL, A.; YAZICI, E.y.; DEVECI, H.. Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: hydrometallurgy in recycling. **Minerals Engineering**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 28-37, jan. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.019>.

UNIÃO EUROPEIA. **Directive 2002/96/EC of the European parliament and the council of 27 january 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)**. Official Journal of the European Union, Luxemburg, v. 46, p. 24–39, 2003.

WILLIAMS, E; KAHHAT, R; ALLENBY, B; KAVAZANJIAN, E; KIM, J; XU, M. Environmental, Social, and Economic Implications of Global Reuse and Recycling of Personal Computers. **Environmental Science & Technology**, Iowa, v. 17, n. 42, p. 6446-6454, 2005

XAVIER, Lúcia Helena; SANTOS, Maria Cecília Loschiavo dos; FRADE, Neuci Bicov; CARVALHO, Tereza Cristina Melo de Brito (org.). **Aspectos Socioambientais E Técnicos Da Gestão De Resíduos De Equipamentos Eletrônicos**. São Paulo: Usp, 2012. 42 p.

YATSUZUKA, Rebeca *et al.* **Espectrometria de emissão óptica com plasma ICP OES**. 2021. Disponível em:
http://ca.iq.usp.br/novo/paginas_view.php?idPagina=13. Acesso em: 02 out. 2020.