UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA - CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RECICLAGEM DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS E SUA FUNCIONALIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL COM VISTA À REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS: UM ESTADO DA ARTE

ALEX FERNANDO DA SILVA DOURADO

ILHA SOLTEIRA – SP
MAIO DE 2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JULIO DE MESQUITA FILHO"FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA - CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RECICLAGEM DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS E SUA FUNCIONALIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL COM VISTA À REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS: UM ESTADO DA ARTE

ALEX FERNANDO DA SILVA DOURADO

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki

Trabalho de Conclusão de Curso apresentadoà Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

ILHA SOLTEIRA – SP

MAIO DE 2022

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de
Biblioteca e Documentação

D739r

Dourado, Alex Fernando da Silva.
Reciclagem de resíduos eletrônicos e sua funcionalidade na construção civil com vista à redução de impactos ambientais: um estado da arte / Alex Fernando da Silva Dourado. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
56 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Jorge Luís Akasaki Inclui bibliografia

1. Construção civil. 2. Lixo eletrônico . 3. Reciclagem. 4. Impacto ambiental.

Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
Cursos: Engª Agronômica, Ciências Biológicas, Eng. Civil, Eng. Elétrica, Eng. Mecânica, Física, Matemática e Zootecnia.
Avenida Brasil Centro, 56 - CEP 15385-000 Ilha Solteira São Paulo Brasil
pabx (18) 3743 1000 fax (18) 3742 2735 scom@adm.feis.unesp.br www.feis.unesp.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: **ALEX FERNANDO DA SILVA DOURADO**

Titulo: **RECICLAGEM DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS E SUA FUNCIONALIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL COM VISTA À REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS: UM ESTADO DA ARTE.**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Ilha Solteira

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki

UNESP – Campus de Ilha Solteira (Orientador)

Profa. Dra. Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque

UNESP – Campus de Ilha Solteira

Eng. Me. Gean Pereira da Silva

Ilha Solteira

31/05/2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que foi meu alicerce em cada momento da minha vida, por me sustentar e me fazer chegar até onde chego nesta ocasião, uma vez que, sem Deus e Jesus Cristo nada seria, sendo que qualquer coisa que eu digitasse neste documento seria pouco perto das maravilhas que faz por mim todos os dias de minha vida.

A minha esposa Andrezza Santos Flores, agradeço por me incentivar, corrigir meus rumos em todos os sentidos da minha vida, inclusive acadêmicos, e me amar de forma que nunca pensei ser amado algum dia, a pessoa que Deus reservou para estar ao meu lado sendo meu porto seguro e companheira para todas as lutas e circunstâncias.

A meu pai Dejanir Neves Dourado por nunca deixar de acreditar no meu potencial, sempre incentivando meus estudos, meus sonhos e minha busca por conhecimento, fazendo o que estivesse ao seu alcance para me proporcionar o necessário para prosseguir com meus objetivos e contribuindo para que eu mantivesse o caráter, a integridade e a ética na minha vida pessoal e profissional.

A minha mãe Rosimeire Silva Dourado por cuidar das minhas necessidades e zelar pela saúde minha e de todos os membros de minha família, incentivando a ser uma pessoa firme em minhas opiniões e a corrigir meus passos iniciais para não tropeçar nos seguintes.

A meu irmão Antônio Lucas da Silva Dourado por me proporcionar momentos necessários de descontração e me desafogar dos problemas cotidianos e acadêmicos. Sem meu irmão não teria condições de digitar no *notebook* em que estou digitando, após inúmeros consertos, sejam em *hardware* ou em *software.*

Gratidão a meus professores em meus anos pré-faculdade, me ensinando o básico que me ajudou a entender melhor o mundo a minha volta e contribuiu sobremaneira com meu sucesso ao entrar na faculdade.

Aos meus parentes que contribuíram com conselhos em cada estágio de minha vida, com carinho e orações para comigo e meus familiares diretos, principalmente à minha falecida bisavó Alvina Rosa Dourado, me dando impagáveis ensinamentos e um ambiente acolhedor que ajudou a moldar o ser humano que hoje sou.

Aos meus sogros pelos ensinamentos e orações e por moldarem o caráter de minha esposa até se tornar a bênção que é na minha vida por todos os anos que estou

ao lado dela.

A todos os meus colegas que conheci em Ilha Solteira, me ajudando em cada um dos desafios acadêmicos, me propiciando uma experiência grandiosa em todos os anos letivos, inclusive aos que abençoaram minha vida e de minha esposa comprando balas baianas e trufas, ajudando sobremaneira para o nosso casamento.

Gratidão aos professores, técnicos, colaborados e funcionários da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, ao qual devo minha formação acadêmica e técnica, proporcionando um ensino de primeiríssimo nível, sempre acessíveis para ensinamentos e dúvidas pontuais, em especial ao Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki que me apoiou na confecção deste trabalho.

A todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização desta produção textual acadêmica.

RESUMO

O presente trabalho teve como intuito um levantamento bibliográfico utilizando artigos, teses e dissertações averiguando pesquisas e estudos no Brasil e no mundo que tratem da reciclagem de lixo eletrônico para aproveitamentos na engenharia civil, com enfoque na construção civil, visando diminuir impactos ambientais e sociais aos indivíduos. Para alcance deste objetivo, tais publicações foram procuradas em locais como Google Acadêmico, site de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e site da Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), com a estipulação do período entre os anos de 2010 e 2021. Estes artigos serão categorizados e organizados segundo os descritores utilizados. O referido trabalho foi pautado pela NBR 10004 – Classificação de Resíduos Sólidos (ABNT, 2004) para a caracterização dos componentes eletroeletrônicos relatados quanto a sua nocividade e periculosidade à natureza e à saúde humana. Quanto aos resultados, foram pesquisadas quinze publicações, bem como as conclusões que cada um dos autores teve com relação às propriedades mecânicas em seus experimentos, refletindo, finalmente, que é possível a viabilidade e bom desempenho de concreto com tais resíduos, desde que empregado sem função estrutural, além de artefatos vítreos e materiais para rodovias, reduzindo os impactos na natureza.

Palavras-Chave: Reciclagem. Lixo eletrônico. Construção civil. Impacto Ambiental.

ABSTRACT

The present work aimed at a bibliographic survey using articles, theses and dissertations investigating researches and studies in Brazil and in the world that deal with the recycling of electronic waste for uses in civil engineering, with a focus on civil construction, aiming to reduce environmental and social impacts to individuals. To achieve this objective, such publications were searched for in places such as Google Scholar, the website of Periodicals of the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) and the website of the Brazilian Digital Library of Theses and Dissertations (BDTD), with the stipulation of the period between the years 2010 and 2021. These articles will be categorized and organized according to the descriptors used. This work was guided by NBR 10004 – Classification of Solid Waste (ABNT, 2004) for the characterization of the electrical and electronic components reported regarding their harmfulness and danger to nature and human health. As for the results, fifteen publications were researched, as well as the conclusions that each of the authors had regarding the mechanical properties in their experiments, reflecting, finally, that it is possible the viability and good performance of concrete with such residues, as long as it is used without structural function, in addition to glass artifacts and materials for highways, reducing impacts on nature.

Keywords: Recycling. Electronic waste. Civil construction. Environmental impact.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS i
RESUMO iii
ABSTRACT iv
SUMÁRIO v
ÍNDICE DE FIGURAS vi
ÍNDICE DE TABELAS vii
1. Introdução 1
2. Objetivo 2
2.1. Objetivo Geral 2
2.2. Objetivos Específicos 2
3. Revisão da Literatura 2
3.1. Estado da arte 2
3.2. Lixo eletroeletrônico 3
3.2.1. Lixo eletroeletrônico no mundo 3
3.2.2. Lixo eletroeletrônico no Brasil 4
3.3. Reciclagem dos materiais eletroeletrônicos 5
3.3.1. Computadores e *notebooks* 6
3.3.2. Celulares e *smartphones* 7
3.4. Riscos à saúde humana 9
3.5. Logística reversa 10
3.6. Incorporação de resíduos eletrônicos na construção civil 11
4. Materiais e métodos 11
5. Resultados e discussão 13
5.1. Tratamento do levantamento bibliográfico 13
5.2. Reutilização dos resíduos eletroeletrônicos na fabricação de concreto 14
5.2.1. Proporção de material utilizado nos ensaios 16
5.2.2. Compressão axial 19
5.2.3. Resistência à tração 22
5.2.4. Absorção de água 24
5.2.5. Análise ótica 26
5.2.6. Análise microscópica 27
5.2.7. Extrato lixiviado 29
5.2.8. Conclusões dos autores 30
5.3. Reutilização dos resíduos eletroeletrônicos na fabricação de artefatos vítreos 31
5.4. Reutilização dos resíduos eletroeletrônicos na fabricação de material para rodovias 37
6. Conclusão 41
Referências Bibliográficas 43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Taxa da coleta de lixo eletrônico pela Europa em 2012 4
Figura 2 - Número de companhias atuantes no Brasil que trabalham com reciclagem de resíduos eletroeletrônicos por estado 5
Figura 3 - Organograma da reciclagem de computadores pela empresa Itautec 6
Figura 4 - Composição básica de um computador 7
Figura 5 - Composição básica do celular 8
Figura 6 - Esquematização geral da logística reversa em uma empresa 10
Figura 7 - Esquematização dos processos de reciclagem de material eletrônico monitorado pela ABREE 11
Figura 8 - Teor de metais pesados presente nas publicações levantadas 14
Figura 9 - Proporção de material para os ensaios mecânicos das publicações 17
Figura 10 - Resultados do ensaio de compressão axial dos trabalhos levantados 19
Figura 11 - Resultados dos ensaios de resistência à tração dos trabalhos levantados 22
Figura 12 - Resultados das análises de absorção de água dos corpos-de-prova 24
Figura 13 - Análise ótica dos corpos-de-prova com fibras de 60 e 120 mm, respectivamente 26
Figura 14 - Análise ótica dos corpos-de-prova de Almeida e Vogt, respectivamente... 26
Figura 15 - Amostra de compósito cimentício. Aumento 50X 27
Figura 16 - Amostra com 30% de Placas de Circuito Impresso com ampliações de 50, 500, 1000 e 1500X 28
Figura 17 - Ampliações de componentes eletroeletrônicos residuais em uma amostra de concreto 28
Figura 18 - Resultado da análise de extrato de lixiviado para classificação do resíduo (mg/L) para Vogt e Schneider *et al.*, respectivamente 29
Figura 19 - Fluxograma da metodologia da pesquisa para obtenção de artefatos vítreos 32
Figura 20 - Retirada dos tubos de raios catódicos localizados nos monitores 32
Figura 21 - Fluxograma das etapas de reciclagem dos resíduos vítreos 33
Figura 22 - Fornos utilizados nos processos 34
Figura 23 - Pastilhas de vidro sem e com acabamento após o processo de reciclagem 35
Figura 24 - Perfil térmico dos artefatos vítreos pelos dois métodos estudados 36
Figura 25 - Artefatos vítreos obtidos pelos dois métodos pesquisados 36
Figura 26 - Resíduos eletroeletrônicos utilizados no estudo de Hasan *et al*. (2016) 37
Figura 27 - Reômetro HAAKE RheoStress 6000 38
Figura 28 - Teste de gravidade específica 40
Figura 29 - Teste de slump 40
Figura 30 - Teste de força de compressão para 7 dias e 14 dias 40

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Substâncias nocivas à saúde encontradas em resíduos eletroeletrônicos e consequências ao meio ambiente 7
Tabela 2 - Componentes dos resíduos eletroeletrônicos e suas consequências à saúde humana 9
Tabela 3 - Descritores utilizados para a coleta das publicações para o levantamento 13
Tabela 4 - Análises mecânicas presentes nos artigos pesquisados 16
Tabela 5 - Comportamento dos resíduos vítreos durante o processo de Termoformado e de Vidro Vertido, respectivamente, por 120 minutos 34
Tabela 6 - Composição química dos componentes estudados 35
Tabela 7 - Propriedades físico-químicas dos componentes da mistura 39
Tabela 8 - Proporção dos componentes na mistura 39

1. Introdução

Cada vez mais está sendo colocada em pauta a questão da sustentabilidade e da reutilização de materiais descartados pela população mundial, principalmente, em uma era repleta de tecnologia e inovação onde os produtos eletrônicos estão cotidianamente presentes, praticamente todos carregando compostos altamente nocivos ao meio ambiente quando descartados de forma irregular na natureza. Mesmo assim, é necessária uma destinação mais utilitária para esse tipo de resíduo do que a mera espera do processo decompositório cuidadoso desse material. Com isso, torna-se mais necessário o debate da situação local e global do descarte de lixos eletrônicos advindos desde celulares, computadores, tablets, smartphones e outros aparelhos mais populares, até maquinários robotizados e eletrônicos com utilização de tecnologia de última geração presentes em montadoras e fábricas industriais, refletindo em impactos ambientais e sociais deste descarte bem como é caracterizado pela NBR 10004 - Classificação dos Resíduos Sólidos (ABNT, 2004), em que se definem os resíduos quanto à sua periculosidade, toxicidade, agentes carcinogênicos, etc.

Em contrapartida, segundo Quintão (2022), o ramo da construção civil teve um crescimento de 8% no ano de 2021, mesmo em um ano conturbado e difícil por conta da pandemia de COVID-19, o que ilustra a importância do ramo para o Brasil e, também, para o planeta.

Dessa forma, a aglomeração destes dois fatores propiciou a confecção deste trabalho procurando-se fazer um levantamento bibliográfico das pesquisas e realizações já existentes em publicações no mundo idealizadas entre o período de 2010 a 2021 sobre a utilização da reciclagem de materiais eletroeletrônicos em prol da construção civil para diminuir os impactos ambientais deste tipo de componentes tóxicos à natureza, otimizando a fabricação de materiais construtivos e verificando se há grande contribuição da incorporação destes agregados diferenciados em suas propriedades mecânicas.

Os resultados serão categorizados e apresentados conforme a exposição dos estudos, normas e artigos pesquisados, além de outros itens pertinentes ao tema.

2. Objetivo

2.1. Objetivo Geral

Analisar, por meio de um levantamento bibliográfico, as produções acadêmicas no que tange às dissertações e teses, perpassando a reciclagem de resíduos eletrônicos atrelado à construção civil no período de 2010 a 2021.

2.2. Objetivos Específicos

- Ampliar conhecimentos teóricos obtidos nas disciplinas do curso de Engenharia Civil;
- Conhecimento de técnicas diferenciadas para o desenvolvimento de materiais alternativos para construção civil.

3. Revisão da Literatura

3.1. Estado da arte

O estado da arte nada mais é do que o mapeamento de um estudo científico sobre um determinado tópico em que se reúnem as conclusões de vários autores em diferentes trabalhos acadêmicos sobre o assunto em questão e possui caráter qualitativo descritivo, destacando aspectos importantes destas pesquisas e apontando também lacunas existentes nas mesmas. Para tanto, é necessário tratamento, categorização e organização das informações coletadas para a confecção de um estado da arte (COELHO, 2021).

Corroborando, Ferreira (2002) trata a denominação "estado da arte", também chamando de "estado do conhecimento", como estudos de caráter essencialmente bibliográfico o inventariante com o intuito de mapear e discutir diferentes textos acadêmicos na busca em conhecer o que já foi pesquisado para, em seguida, se descobrir inovações, procurando arquivos de difícil acesso, de idiomas diferenciados mas que trazem conteúdos relevantes para uma nova produção acadêmica que está sendo redigida. Não obstante, a organização de todas estas produções possui caráter acumulativo, em que se tem como intuito reunir uma gama de trabalhos científicos e tudo o que há de mais avançado sobre o tema preestabelecido dentro de um determinado período na história a fim de que se tenha o máximo possível de informação sobre o assunto.

Segundo Coelho (2021), para se poder caracterizar corretamente um estado da arte, certos padrões devem ser respeitados. Dentre eles temos:

- Indicação evolucionária das pesquisas sobre o tema;
- Possibilidade de integração entre as pesquisas em si;
- Contraposições ou incompatibilidades entre os trabalhos acadêmicos;
- Indicação precisa dos referenciais teóricos;
- Apontamento de sugestões para os textos científicos;
- Identificação dos temas sobressalentes das pesquisas;
- Definição de critérios bem estabelecidos para as pesquisas dos textos acadêmicos;
- Determinação de locais confiáveis de busca para os artigos, dissertações e teses e divulgação dos descritores utilizados para se chegar às publicações.

A divulgação dos descritores, etapa também conhecida como fichamento, é de suma importância no processo de estado da arte para se manter o controle de tudo o que foi pesquisado sobre o tema.

3.2. Lixo eletroeletrônico

O lixo eletroeletrônico, também chamado de e-lixo, é obtido através da degradação de aparelhos e equipamentos eletrônicos, sendo considerado um rejeito de caráter especial que necessita de uma coleta especializada e um descarte correto, uma vez que possui componentes tóxicos e pesados, tanto para a saúde humana quanto para o meio ambiente (BRASIL, 2010).

Com isso, este problema se tornou mais grave à medida que cada vez mais os celulares são adquiridos pelos indivíduos substituindo as tecnologias já existentes, exigindo descartes dos aparelhos mais obsoletos (MOI *et al.*, 2012).

3.2.1. Lixo eletroeletrônico no mundo

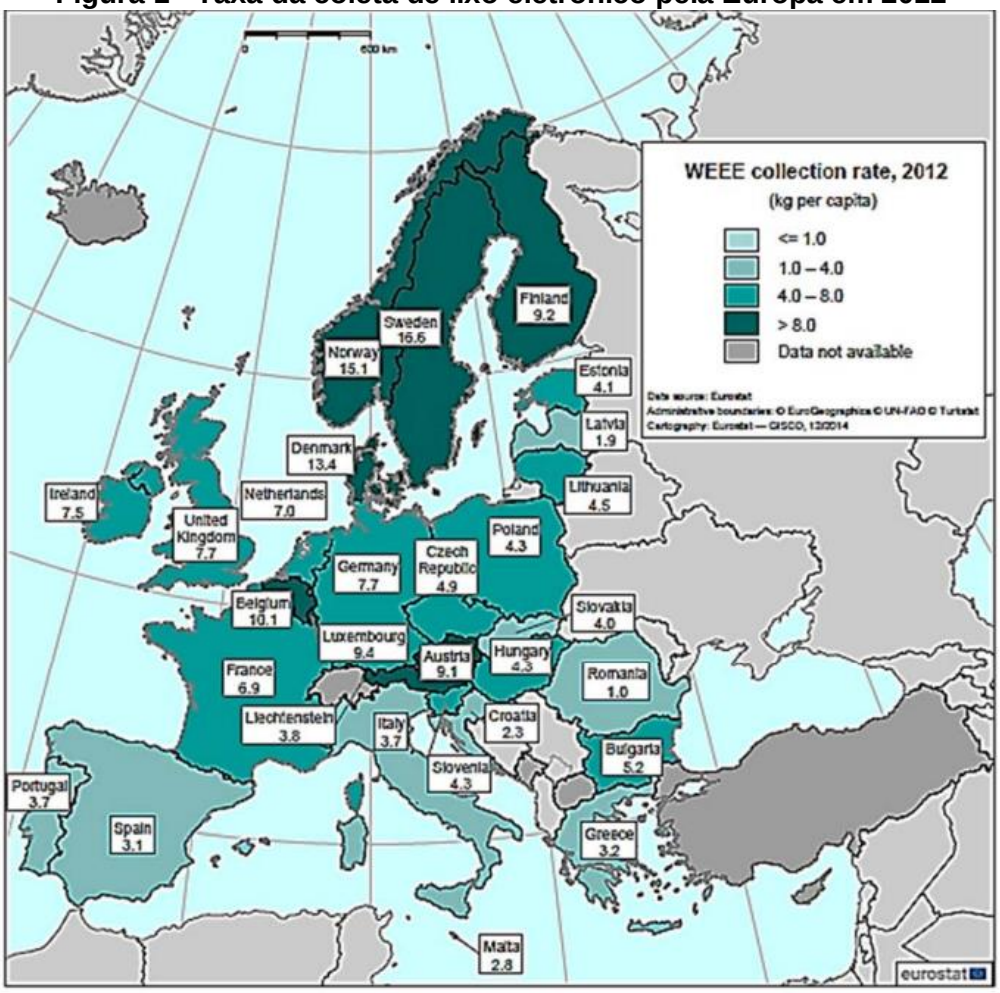
Houve um despertar ao planeta com relação ao descarte de rejeitos eletrônicos pelo mundo, uma vez que, com o aumento da produção de aparelhos celulares e afins, houve um acréscimo importante de 21% na geração de resíduos eletrônicos pelo globo nos últimos cinco anos, sendo a Ásia grande responsável por quase metade desses

dados. (JÚNIOR, 2021).

Por conseguinte, vemos que, no continente africano, Argélia e África do sul são os dois países que mais geram lixo eletroeletrônico por habitante, com taxas de 6,2 kg/hab e de 5,7 kg/hab por ano, respectivamente, que, por sua vez é bastante alta comparada à média do continente, de 1,9 kg/hab (NWAUBANI e PARSONS, 2021).

Em termos europeus, temos que, segundo Schneider (2016), o continente tem sido pioneiro em coleta e reciclagem de e-lixo, incentivando cada vez mais seus cidadãos a cultivar esta prática, como é ilustrado pela Figura 1 apresentada a seguir.

Figura 1 - Taxa da coleta de lixo eletrônico pela Europa em 2012



Fonte: Schneider (2016)

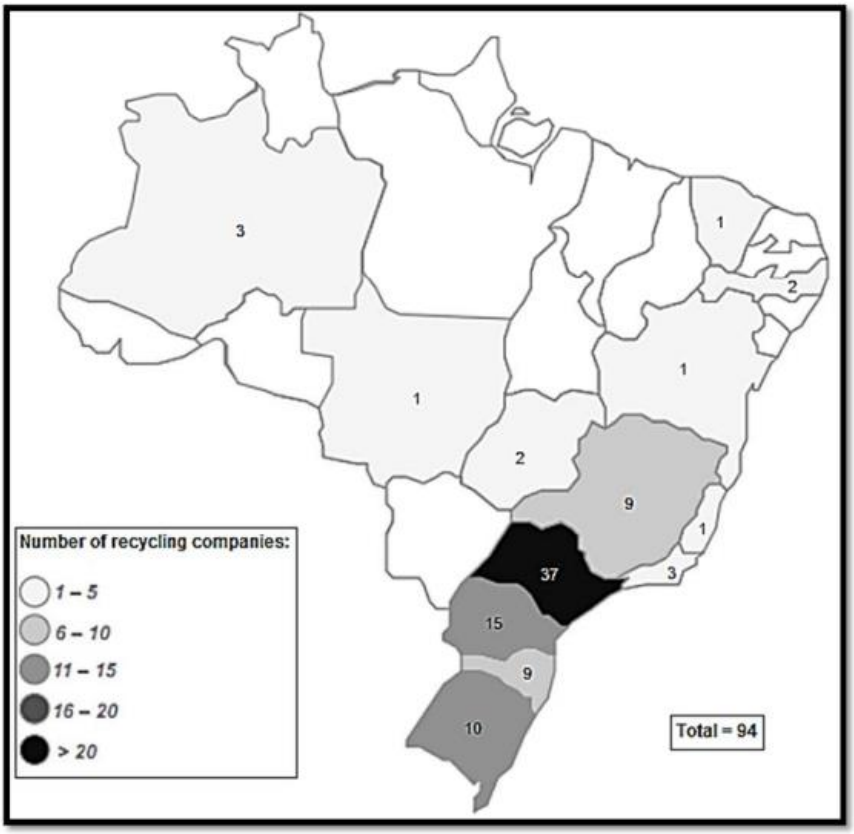
3.2.2. Lixo eletroeletrônico no Brasil

O Brasil, segundo Júnior (2021), é o maior responsável da América Latina com 1,5 de toneladas de lixo por ano, sendo 3% deste rejeito devidamente reciclado, além

de estabelecer um decreto, de que até 2025, 400 municípios deverão instalar ao menos um ponto de coleta de resíduos eletroeletrônicos a cada 25 mil habitantes.

Corroborando, Schneider (2016) relata que ainda há um grande montante de e-lixo não reciclado em território brasileiro, porém ilustra na Figura 2 apresentada logo abaixo um mapa das companhias que fazem o serviço deste tipo de reciclagem, separando por estados.

Figura 2 - Número de companhias atuantes no Brasil que trabalham com reciclagem de resíduos eletroeletrônicos por estado



Fonte: Schneider (2016)

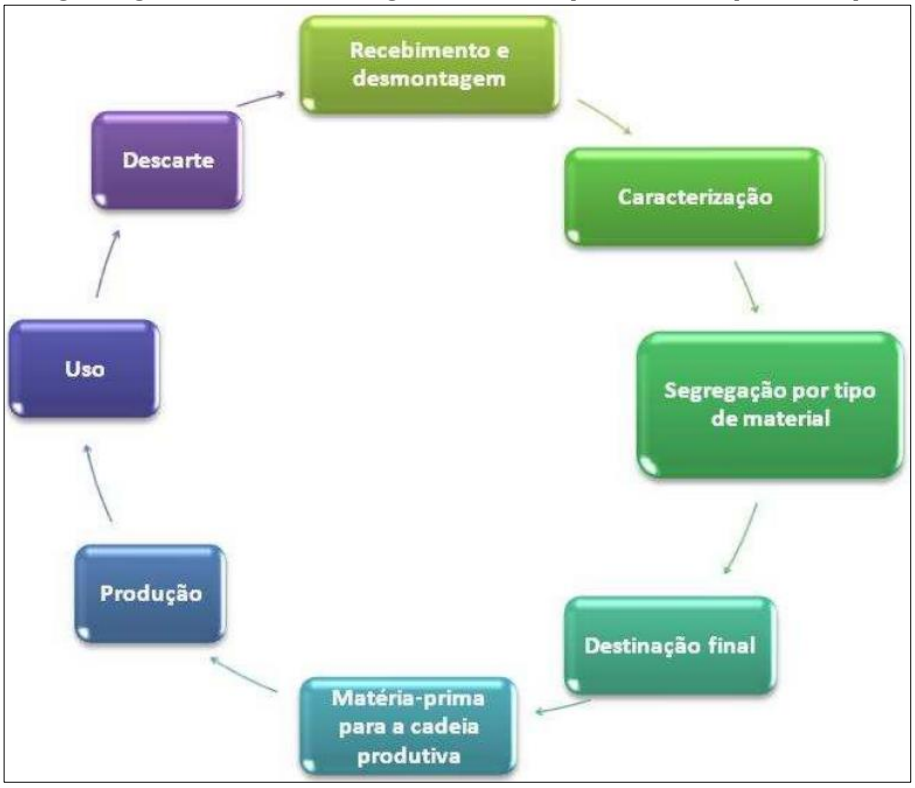
3.3. Reciclagem dos materiais eletroeletrônicos

Certamente que um dos maiores eventos que ocorreram em 2021 foram os Jogos Olímpicos de Verão de Tóquio, no Japão, ainda que estivesse sendo realizados durante a pandemia de COVID-19. Porém, uma das maiores curiosidades sobre as competições, segundo Júnior (2021), trata-se das medalhas entregues, principalmente quanto ao seu material peculiar, foram confeccionados a partir da reciclagem de partes de celulares e computadores, totalizando mais de seis milhões de celulares e 78

toneladas dentre computadores, tablets, monitores e demais aparelhos do gênero.

A Figura 3 ilustra um organograma que, segundo Xavier *et al.* (2011), exemplifica o funcionamento da política da coleta de reciclagem e recondicionamento de computadores antigos da empresa brasileira Itautec em que tais materiais são desmontados, acondicionados e separados por conta do tipo de composições e componentes presentes em cada parte de suas mercadorias.

Figura 3 - Organograma da reciclagem de computadores pela empresa Itautec



Fonte: Xavier *et al.* (2011)

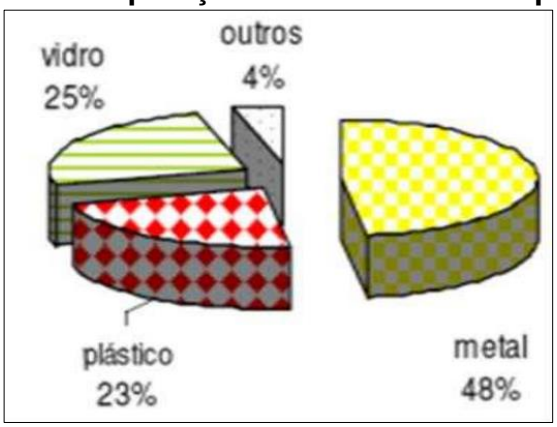
3.3.1. Computadores e *notebooks*

Segundo o Relatório Integrante do Convênio do Porto Digital do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (BRASIL, 2011), os computadores são compostos por substâncias nocivas que, se não forem descartadas de maneira adequada podem danificar sobremaneira o meio-ambiente, causando impactos irreversíveis por conta da alta periculosidade destes componentes, tais como: chumbo, cádmio, mercúrio e arsênio.

Os componentes relatados acima são classificados pela NBR 10004 – Classificação de Resíduos Sólidos (ABNT, 2004) por códigos de identificação, seguido da definição dos agentes nocivos presentes no material e o grau de perigo do agente.

Os computadores, segundo relata Costa (2016), são, em sua grande maioria, mesmo os mais atualizados, compostos por vidro, plástico, metais, dentre outros materiais. A quantidade média de cada uma das composições básicas presentes no computador é encontrada na Figura 4, sendo que os metais relatados por esta figura são expostos mais precisamente, juntamente com os efeitos que podem causar ao meio ambiente, na Tabela 1 apresentada a seguir.

Figura 4 - Composição básica de um computador



Fonte: Costa (2016)

Os metais relatados pela figura acima são expostos mais precisamente, juntamente com os efeitos que podem causar ao meio ambiente, na Tabela 1 apresentada a seguir.

Tabela 1 - Substâncias nocivas à saúde encontradas em resíduos eletroeletrônicos e consequências ao meio ambiente

Metais	Danos Potenciais ao Meio Ambiente
Retardadores de chama bromados	Podem ser solúveis em água, voláteis, bioacumulativos e persistentes. Incinerados geram dioxinas e furanos.
Cádmio	Bioacumulativo, persistente e tóxico para o meio ambiente.
Cromo	Absorção celular dos efeitos tóxicos muito fácil pelas plantas e pelos animais.
Chumbo	Acumulação no ecossistema e efeitos tóxicos na flora e fauna e nos micro-organismos.
Mercúrio	Pode tornar-se solúvel em água; acumula-se nos organismos vivos.

Fonte: Costa (2016)

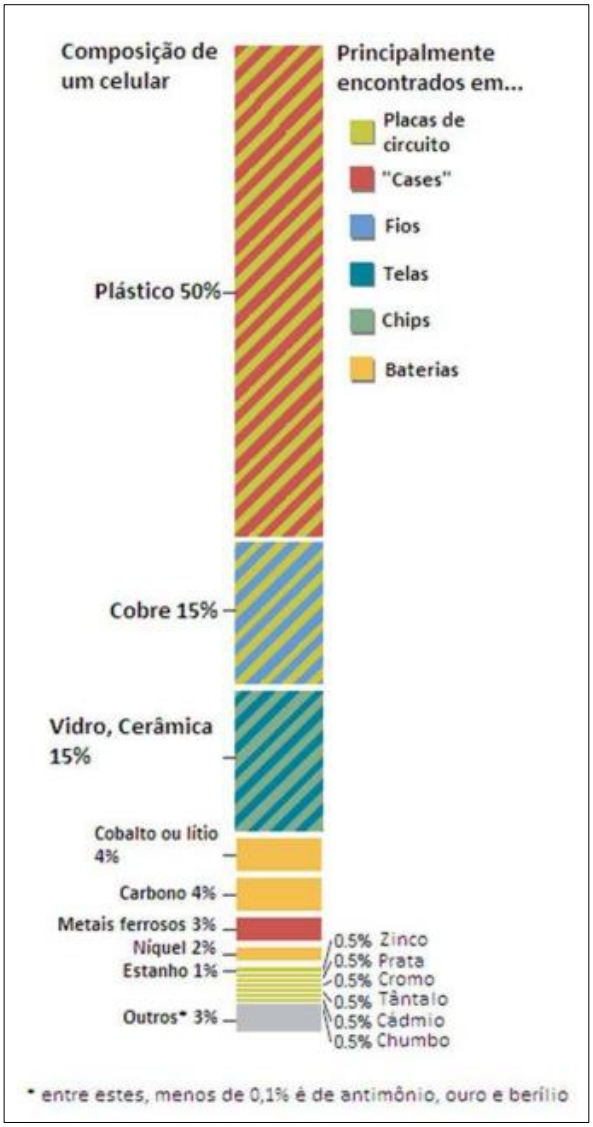
3.3.2. Celulares e *smartphones*

Segundo o Relatório Integrante do Convênio Porto Digital (BRASIL, 2011) os componentes presentes nos computadores estão, de maneira reduzida, presentes

também em celulares e *smartphones* onde a Figura 5 ilustra de maneira resumida a composição básica de um celular.

Lembrando que os dados da Figura 5 quanto às porcentagens dos metais variam dependendo do modelo e ano em que o celular foi fabricado (KASPER, 2011).

Figura 5 - Composição básica do celular



Fonte: Costa (2016)

Corroborando, segundo dados da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (2012), é incorreto o descarte deste tipo de resíduo diretamente na natureza, inclusive em aterros sanitários, pois o contato de metais pesados ao meio ambiente é capaz de contaminar as águas presentes em possíveis lençóis freáticos por conta do chorume expelido por estes materiais sendo, por fim, prejudicial aos seres que a ingerirem.

Não obstante, os efeitos destes aparelhos quando descartados de forma

errônea possuem um período de decomposição muito extenso, chegando a levar quase meio século para este material se decompor na natureza, gerando várias consequências por conta desse processo biológico (COSTA, 2016).

3.4. Riscos à saúde humana

Os componentes nocivos à saúde humana supracitados são largamente relatados pela NBR 10004 (ABNT, 2004), principalmente pelo nível de toxicidade que possuem.

A norma ainda relata o limite permitido dos contaminantes onde é utilizado o ensaio de lixiviação nas concentrações para se determinar este limite.

Também é trazido pela normativa a extensão em que o produto tóxico é capaz de se acumular nos ecossistemas em que está inserido, podendo ser comprovadamente nocivo letalmente ao ser humano e ter efeitos maléficos ao ser humano de caráter mutagênico, cancerígeno e/ou teratogênico.

A Tabela 2 ilustra com mais precisão alguns dos componentes presentes em aparelhos e equipamentos eletroeletrônicos, bem como as ações nocivas à saúde presentes em cada um deles.

Tabela 2 - Componentes dos resíduos eletroeletrônicos e suas consequências à saúde humana

Metais	Danos potenciais à saúde humana	Danos potenciais ao ambiente	Aplicações nos equipamentos eletrônicos
Retardadores de chama bromados	Cancerígenos e neurotóxicos; podem interferir na função reprodutora.	Podem ser solúveis em água, voláteis, bioacumulativos e persistentes. Em incineradores geram dioxinas e furanos.	Computadores e televisores.
Cádmio	Possíveis efeitos irreversíveis nos rins e podem provocar câncer e desmineralização óssea; manifestações digestivas; problemas pulmonares; envenenamento e pneumonite.	Bioacumulativo, persistente e tóxico.	Resistores, detectores de infravermelho e semicondutores. Podem ser encontrados nas versões mais antigas de raios catódicos.
Chumbo	Danos ao sistema nervoso, endócrino, cardiovascular e rins; dores abdominais; disfunção renal; anemia; problemas pulmonares; neurite periférica e encefalopatia.	Bioacumulativo, efeitos tóxicos na flora, fauna e microorganismos.	Solda nos circuitos impressos, tubos de raios catódicos nos monitores e televisores.
Mercúrio	Possíveis danos cerebrais e cumulativos e podem passar para o feto; gengivite, salivação e diarreia; dores abdominais; congestão, anapetência, indigestão; dermatite e elevação da pressão arterial; estomatites, ulceração da faringe e do esôfago, lesões renais e no tubo digestivo; insônia, dores de cabeça, colapso, delírios e convulsões.	Pode tornar-se solúvel em água e se acumulativo nos organismos vivos.	Termostatos, sensores de posição, chaves, relés, lâmpadas, equipamentos de transmissão de dados, equipamentos médicos, telefones celulares, baterias, etc.
Bário	Inchaço no cérebro, fraqueza muscular, danos no coração, fígado e baço.	-	Painel frontal dos tubos de imagem de TV's
Cobre	Pode gerar cirrose hepática	-	Presente em diversos componentes eletrônicos.

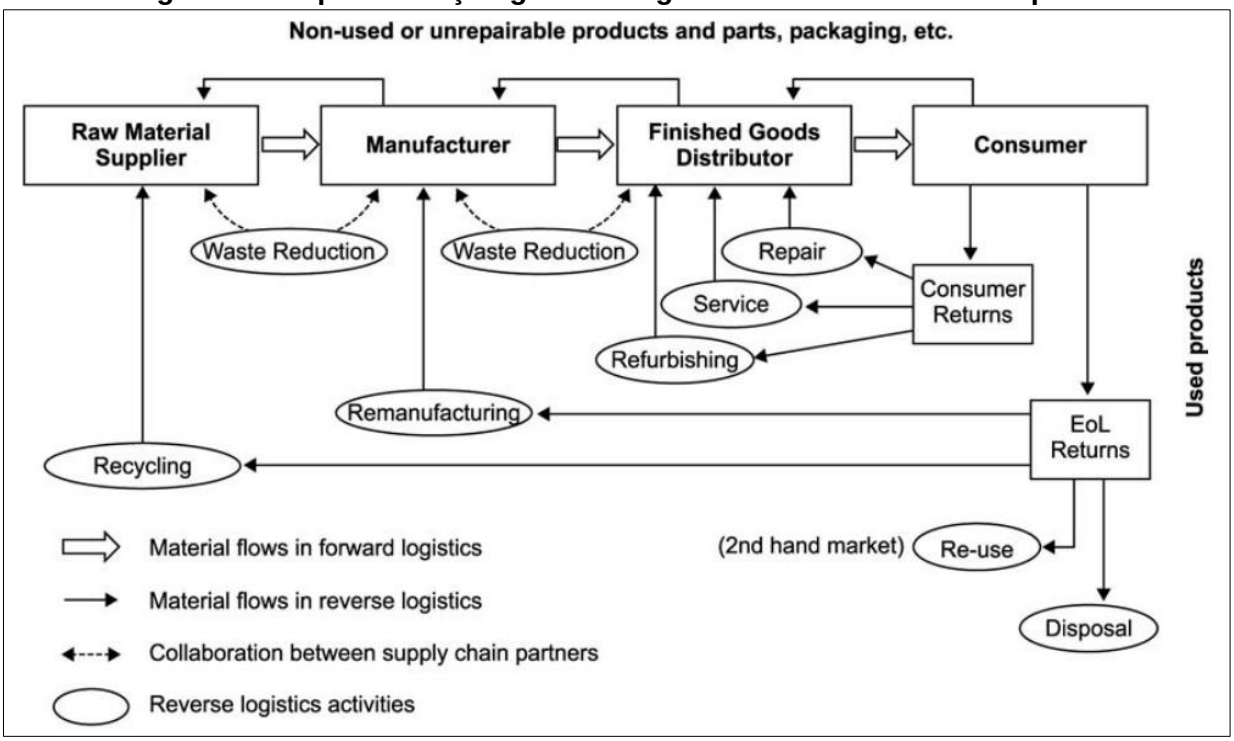
Fonte: Oliveira *et al.* (2021)

3.5. Logística reversa

Xavier *et al.* (2011) explicam a logística reversa como uma ferramenta de gestão ambiental atingindo as diferentes etapas do processamento e gerenciamento dos resíduos em uma empresa, no caso de empresas que lidam com produtos, aparelhos e equipamentos tecnológicos e eletroeletrônicos.

Assim sendo, em sua grande maioria, são construídos fluxogramas como os mostrados nas figuras a seguir, sendo a Figura 6 representando uma empresa do ramo eletrônico.

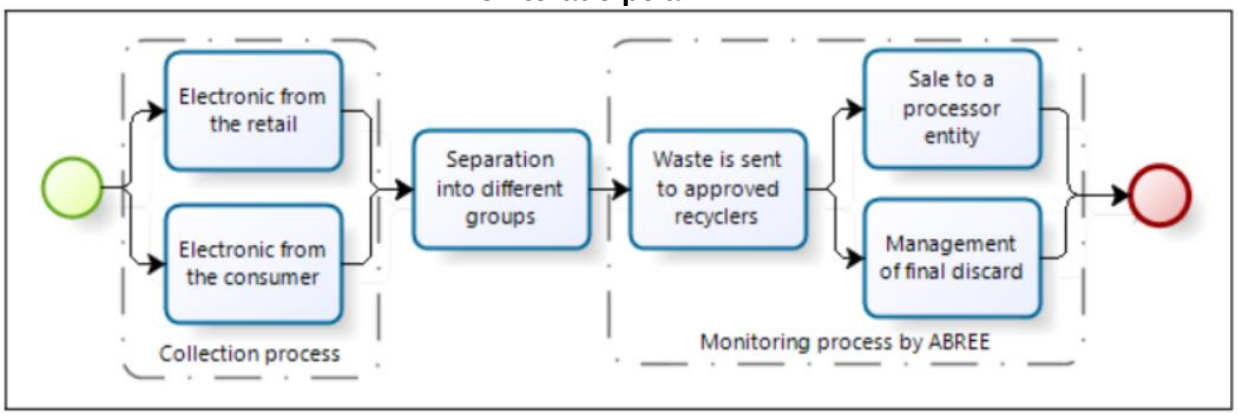
Figura 6 - Esquematização geral da logística reversa em uma empresa



Fonte: Schneider (2016)

Enquanto que a Figura 7 apresenta os processos da reciclagem dos produtos eletrônicos monitorados pela Associação Brasileira de Reciclagem de Eletrônicos e Eletrodomésticos (ABREE), caracterizando as atividades básicas desse serviço de reciclagem, onde a expressão "EoL" (End of Life), presente na Figura 6, remete aos equipamentos que estão no fim da vida útil e que são aptos para a reciclagem ao invés de serem descartados de maneira inadequada (SCHNEIDER, 2016).

Figura 7 - Esquematização dos processos de reciclagem de material eletrônico monitorado pela ABREE



Fonte: Schneider (2016)

3.6. Incorporação de resíduos eletrônicos na construção civil

De acordo com os relatos de Almeida (2017), uma incorporação nada mais é do que a adição ou substituição de parcelas dos constituintes do concreto por outro tipo de material, exercendo características semelhantes quanto à função e desempenho do material substituído, seja cimento ou agregados, miúdos ou graúdos.

Com efeito, é utilizado para tanto uma quantidade menor de elementos para a confecção do concreto, em que há uma intencionalidade de se arrefecer os impactos ambientais causados pelas concreteiras e pela construção civil como um todo, sendo que as matérias primas presentes na natureza serão extraídas em menor número (ALMEIDA, 2017).

4. Materiais e métodos

O desenvolvimento do referido trabalho se realizou em um período de, aproximadamente, cinco meses da seguinte maneira:

- Reuniões para discutir a respeito da literatura utilizada como objeto de estudo;
- Concepção de novas ideias para refinamento do projeto;
- Reuniões para gerenciamento de atividades;
- Troca de arquivos contendo ideias, conceitos, tecnologias e resultados;
- Apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso Final.

Ainda é necessário relatar que foi utilizado o software Microsoft Excel para que

fosse possível fazer o tratamento e organização dos dados obtidos por intermédio de artigos, teses e dissertações pesquisados previamente.

Também foi imprescindível o emprego da NBR 10004/2004 que, por sua vez, trata da classificação dos resíduos sólidos, relatando-se, principalmente, a preocupação com o caráter ambiental quanto à periculosidade dos materiais componentes que estão contidos nos aparelhos eletroeletrônicos e, seus métodos de ensaio.

Por conseguinte, a confecção do referido trabalho contará com a coleta de dados em artigos, teses de doutorado, dissertações de mestrado e demais publicações em três diferentes sites de busca, sendo eles: o Google Acadêmico, o site de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) localizada no site do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), onde os descritores utilizados para a realização das pesquisas para a construção do trabalho foram organizados em um quadro respeitando da melhor forma possível as normas contidas em um estado da arte.

Com efeito, foram encontradas e contabilizadas quinze publicações, onde o trabalho de Schneider *et al.* (2021) é dos Estados Unidos, o de Hasan *et al.* (2016) é do Reino Unido, o de Ingole *et al.* (2020) é da Índia, o de Nwaubani e Parsons (2021) é da África do Sul e os demais trabalhos brasileiros, todos datados em um período preestabelecido entre 2010 e 2021 para o levantamento bibliográfico.

Dessa forma, as publicações contêm assuntos relevantes e inovações tecnológicas pertinentes ao que se propõe ao objetivo deste trabalho para se exemplificar as diferentes maneiras com as quais os rejeitos eletroeletrônicos nocivos ao meio ambiente estão sendo úteis para a engenharia civil, mais precisamente à área da construção civil, bem como relatar as propriedades mecânicas dos materiais construtivos obtidos destes processos no que tange a resistência à tração e compressão, por exemplo.

5. Resultados e discussão

5.1. Tratamento do levantamento bibliográfico

Após um período de coleta de dados e de publicações relevantes ao tema proposto de diferentes estados brasileiros e também em países de diferentes continentes para uma gama de informações maior e mais rica, foram contabilizados quinze trabalhos que relatam a incorporação de componentes presentes em aparelhos eletroeletrônicos em algum método construtivo pertinente à engenharia civil. Tais publicações foram pesquisadas em três diferentes locais de busca de trabalhos científicos, tratados e organizados segundos os descritores utilizados para obtenção dos respectivos trabalhos na Tabela 3 que se segue.

Tabela 3 - Descritores utilizados para a coleta das publicações para o levantamento

Artigos	Ano de publicação	Descritores		
		CAPES	Google Acadêmico	BDTD
Hasan *et al.* (Artigo)	2016		Electronic waste civil engineering	
Xavier *et al.* (Artigo)	2011		Resíduos eletrônicos engenharia civil	
Conceição (Dissertação)	2019		Lixo eletrônico concreto	
Lima (Tese)	2012		Lixo eletrônico vidro	
Vogt (TCC)	2017		Resíduos eletrônicos agregado construção civil	
Almeida (Dissertação)	2017		Resíduos eletrônicos agregado	
Oliveira *et al.* (Artigo)	2021	Resíduos eletrônicos		
Moi *et al.* (Artigo)	2012		Lixo eletrônico consequências	
Nwaubani; Parsons (Artigo)	2021	Electronic waste concrete		
Ingole *et al.* (Artigo)	2020	Electronic waste concrete		
Schneider (Dissertação)	2016			Electronic waste recycling
Schneider *et al.* (Artigo)	2021		Circuit boards cement	
Kasper (Dissertação)	2011			Reciclagem lixo eletrônico
Filho (Dissertação)	2013			Circuitos eletrônicos concreto
Costa (Dissertação)	2016			Lixo eletrônico mundo

Fonte: Autoria própria

5.2. Reutilização dos resíduos eletroeletrônicos na fabricação de concreto

Segundo o levantamento bibliográfico definido acima, as publicações que fazem relato sobre a utilização de materiais eletroeletrônicos reciclados para a fabricação de concreto foram: Almeida (2017), Conceição (2019), Filho (2013), Nwaubani e Parsons (2021), Schneider *et al.* (2021) e Vogt (2017).

De forma geral, a metodologia dos artigos supracitados consiste em triturar objetos tecnológicos pertencentes a aparelhos eletroeletrônicos, como placas de circuitos impressos no caso dos trabalhos de Filho (2013), Conceição (2019) e Schneider *et al.* (2021), pulverizando tais componentes e incorporando ao preparo de concreto, confeccionando corpos-de-prova deixando reagir por certo período e, após o desmolde, aplicar testes de desempenho físico-mecânico para certificar a qualidade do concreto obtido em comparação a corpos-de-prova sem a incorporação destes resíduos eletrônicos.

Com efeito, os testes aplicados foram, geralmente, de resistência à compressão axial e de tração das fibras, de absorção de água, bem como análises microscópicas com o intuito de verificar as ranhuras nas fibras e partículas dos corpos-de-prova em seus rompimentos e, de posse destes dados e informações traçar características mais profundas e avaliações mais embasadas sobre as propriedades estruturais das misturas obtidas.

Para tanto, cada artigo fez um levantamento resultando em uma lista do quantitativo de metais pesados presentes nos resíduos eletroeletrônicos na mistura para a fabricação do concreto.

Figura 8 - Teor de metais pesados presente nas publicações levantadas

Amostra	Ag	Al	As	Ba	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Pb	Se	Zn
PB	0,008	0,07	0,00	0,52	0,00	0,54	0,30	0,02	0,016	0,18	0,00	0,22
CP	0,138	1,01	0,50	0,53	0,04	0,08	0,07	11,29	0,007	0,19	0,66	0,02
2A	0,183	0,67	0,81	0,78	0,06	0,16	0,07	17,10	0,013	0,37	1,01	0,02
5A	0,152	0,70	0,68	0,69	0,05	0,12	0,06	14,90	0,011	0,26	0,84	0,01
2B	0,246	0,62	0,76	0,63	0,06	0,14	0,08	16,30	0,033	0,31	1,02	0,02
5B	0,102	0,80	0,63	0,45	0,04	0,06	0,20	15,20	0,010	0,15	0,32	0,12
NBR	0,05	0,2	0,01	0,7	0,05	2,00	0,3	0,001	0,1	0,01	0,01	5,0

1

2

Si	Ca	Cu	Al	Mg	S	Bi	Sn
14.05	12.63	9.82	7.59	1.40	0.50	0.46	0.39
Fe	Ba	Rb	Th	Ti	Ni	Au	Pb
0.38	0.32	0.27	0.18	0.17	0.13	0.12	0.10
Cl	Zn	Sr	K	Mn	Cr	Ag	Bal
0.10	0.10	0.07	0.05	0.04	0.02	0.01	51.28

3

Componentes de uma PCI	Quantidades médias		
		Metais	Valores médios
Metais	28%	Cu	14%
		Fe	6%
		Ni	2%
		Zn	2%
		Sn	2%
		Ag	0,30%
		Au	0,04%
		Pd	0,02%
Plástico			19,00%
Bromo			4,00%
Mat. Cerâmicos, vidros e óxidos			49,00%

4

Elemento / Teor %	
Na	0.51
Mg	0.56
Al	7.17
Si	57.23
S	0.76
K	4.96
Ca	25.57
Fe	3.23

5

Chemical Oxide Composition (%)	Portland cement	Condensed silica fume	Metakaolin
Al_2O_3	1.010	1.450	42.650
CaO	67.050	0.020	0.060
Cr_2O_3	–	1.450	0.070
Fe_2O_3	0.680	2.460	0.410
K_2O	–	2.140	0.170
MgO	1.230	1.140	0.290
MnO	–	0.770	0.090
Na_2O	–	0.550	<0.010
P_2O_5	–	0.130	0.070
SiO_2	23.520	87.800	54.020
SO_3	0.070	<0.010	<0.010
TiO_2	–	<0.010	1.390

Fontes: 1. Vogt (2017); 2. Schneider *et al.* (2021); 3. Conceição (2019); 4. Filho (2013); 5. Nwaubani e Parsons (2021)

Para efeitos comparativos, os testes mecânicos elaborados pelos autores das publicações foram elencados na Tabela 4 em que é resumida a presença ou não de tais análises nos trabalhos relacionados à fabricação do concreto com a utilização de resíduos eletroeletrônicos.

Tabela 4 - Análises mecânicas presentes nos artigos pesquisados

Testes / Artigos	Compressão axial	Resistência à tração	Absorção de água	Análise ótica	Análise microscópica	Extrato lixiviado
Filho	X	X	X	X	X	
Nwaubani; Parsons	X	X	X		X	
Almeida	X	X	X	X		
Conceição	X	X	X		X	
Schneider *et al.*	X					X
Vogt	X			X		X

Fonte: Autoria própria

5.2.1. Proporção de material utilizado nos ensaios

Conforme supracitado, os autores das pesquisas levantadas neste trabalho incorporaram aos seus corpos-de-prova certas proporções de material eletroeletrônico, sendo estas proporções relatadas abaixo, bem como as proporções dos demais materiais necessários para se confeccionar os corpos-de-prova.

Contudo, tendo em vista que tais informações não estão organizadas em uma tabela, mas sim no corpo do texto de Filho (2013), deve-se relatar que a produção de um corpo-de-prova de seu compósito cimentício possui 624g de Cimento Portland CP II; 32,1872g de areia peneirada e 300g de água,

1

Figura 9 - Proporção de material para os ensaios mecânicos das publicações

Mix design	Sand	Stone	WEEP	Portland cement	MK	CSF	Total mass	Super-plasticiser	Slump
	kg/m^3							% binder	mm
PC (Control mix)	931	706	0	444	0	0	2 312	0.00	80
PC(ABS-5)	908	688	14				2 285	0.00	75
PC(ABS-10)	884	671	28				2 259	0.00	70
PC(ABS-20)	838	635	57				2 205	0.09	65
PC(ABS-30)	791	600	85				2 152	0.16	68
PC(PC/ABS-5)	908	688	18				2 292	0.00	80
PC(PC/ABS-10)	884	671	36				2 272	0.00	80
PC(PC/ABS-20)	838	635	72				2 232	0.00	55
PC(PC/ABS-30)	791	600	108				2 193	0.12	55
PC(HIPS-5)	908	688	21				2 289	0.00	75
PC(HIPS-10)	884	671	42				2 266	0.00	75
PC(HIPS-20)	838	635	84				2 220	0.04	60
PC(HIPS-30)	791	600	126				2 174	0.12	60
PC(Blend-5)	908	688	18				2 289	0.00	65
PC(Blend-10)	884	671	36				2 266	0.00	65
PC(Blend-20)	838	635	71				2 219	0.06	60
PC(Blend-30)	791	600	107				2 173	0.18	65
PCM	931	706	0	333	111	0	2 312	0.33	80
PCM(ABS-5)	908	688	14				2 285	0.67	70
PCM(ABS-10)	884	671	28				2 259	0.67	65
PCM(ABS-20)	838	635	57				2 205	0.87	75
PCM(ABS-30)	791	600	85				2 152	0.94	70
PCM(PC/ABS-5)	908	688	18				2 292	0.33	80
PCM(PC/ABS-10)	884	671	36				2 272	0.33	70
PCM(PC/ABS-20)	838	635	72				2 232	0.33	65
PCM(PC/ABS-30)	791	600	108				2 193	0.67	75
PCM(HIPS-5)	908	688	21				2 289	0.37	70
PCM(HIPS-10)	884	671	42				2 266	0.45	70
PCM(HIPS-20)	838	635	84				2 220	0.52	65
PCM(HIPS-30)	791	600	126				2 174	0.57	60
PCM(Blend-5)	908	688	18				2 289	0.45	70
PCM(Blend-10)	884	671	36				2 266	0.60	60
PCM(Blend-20)	838	635	71				2 219	0.64	65
PCM(Blend-30)	791	600	107				2 173	0.69	60
PCS	931	706	0	400	0	44	2 312	0.00	75
PCS(ABS-5)	908	688	14				2 285	0.04	70
PCS(ABS-10)	884	671	28				2 259	0.10	65
PCS(ABS-20)	838	635	57				2 205	0.22	55
PCS(ABS-30)	791	600	85				2 152	0.22	55
PCS(PC/ABS-5)	908	688	18				2 289	0.00	65
PCS(PC/ABS-10)	884	671	36				2 266	0.00	60
PCS(PC/ABS-20)	838	635	72				2 219	0.19	60
PCS(PC/ABS-30)	791	600	108				2 173	0.27	60
PCS(HIPS-5)	908	688	21				2 289	0.00	60
PCS(HIPS-10)	884	671	42				2 266	0.00	55
PCS(HIPS-20)	838	635	84				2 220	0.10	70
PCS(HIPS-30)	791	600	126				2 174	0.15	65
PCS(Blend-5)	908	688	18				2 292	0.00	60
PCS(Blend-10)	884	671	36				2 272	0.07	55
PCS(Blend-20)	838	635	71				2 232	0.10	55
PCS(Blend-30)	791	600	107				2 193	0.19	55

2

Identificação de traço	Massa de água (L)	Massa de cimento (Kg)	Agregado graúdo (Kg)	Agregado miúdo (Kg)	Agregado polimérico (Kg)
0 %	8,0	15,0	30,0	30,0	0,0
5 %	8,0	15,0	28,5	30,0	1,5
8 %	7,8	15,0	27,6	30,0	2,4
10 %	7,5	15,0	27,0	30,0	3,0
15 %	8,5	15,0	25,5	30,0	4,5
20 %	8,5	15,0	24,0	30,0	6,0

3

%	Material (litros)					
	Areia	Água	Brita	PCI	Cimento	Data
0	4,0	1,0	6,0	-	2,0	28/03/2019
10	4,0	1,0	5,4	0,6	2,0	28/03/2019
20	4,0	1,0	4,8	1,2	2,0	28/03/2019
30	4,0	1,0	4,2	1,8	2,0	28/03/2019

4

Cementitious Matrix (LA%)	Cement (g)	Sand		Lightweight Aggreg. (LA)		Water (g)	water/cement ratio
		Mesh sieve (mm)	Amount (g)	Mesh sieve (mm)	Amount (g)		
0	335	1.2	804	1.2	0	160.8	0.48
		0.6	150.75	0.6	0		
		0.3	20.1	0.3	0		
		0.15	10.05	0.15	0		
		<0,15	20.1	<0,15	0		
25	335	1.2	603	1.2	129.43	160.8	0.48
		0.6	113.06	0.6	24.27		
		0.3	15.08	0.3	3.24		
		0.15	7.54	0.15	1.62		
		<0,15	15.08	<0,15	3.24		
50	335	1.2	402	1.2	258.86	160.8	0.48
		0.6	75.38	0.6	48.54		
		0.3	10.05	0.3	6.47		
		0.15	5.03	0.15	3.24		
		<0,15	10.05	<0,15	6.47		

5

Amostra	Material Substituído	%	Peso Resíduo (g)
1	-	-	-
2	-	-	-
3	-	-	-
4	Areia	2%	48,20
5	Areia	2%	48,20
6	Areia	2%	48,20
7	Areia	5%	120,50
8	Areia	5%	120,50
9	Areia	5%	120,50
10	Brita	2%	36,42
11	Brita	2%	36,42
12	Brita	2%	36,42
13	Brita	5%	93,00
14	Brita	5%	93,00
15	Brita	5%	93,00

Fontes: 1. Nwaubani e Parsons (2021); 2. Almeida (2017); 3. Conceição (2019); 4. Schneider *et al.* (2021); 5. Vogt (2017)

Não obstante, é necessário notificar que Vogt (2017) não inseriu em sua tabela, mas sim no corpo de seu texto que o traço utilizado para a fabricação do concreto foi de 1:3:3 com uma relação água-cimento de 0,75, chegando-se a este valor de modo gradativo.

Nwaubani e Parsons (2021) trazem em sua tabela siglas em inglês do que foi utilizado em seus experimentos, sendo:

- MK (Metacaulim): tratando-se de um tipo de polímero pozolânico;
- CSF: (Sílica Ativa Condensada): Resíduo decorrente da produção de silício.
- PCM: Cimento Portland com 25% de MK
- PCS: Mistura de concreto tradicional com 10% de CSF;
- CoV: Coeficiente da variação;
- SD: Desvio Padrão;
- ABS: Acrilonitrila Butadieno Estireno: Resina utilizada em computadores;
- ABS/PC: Acrilonitrila Butadieno Estireno com Policarbonato;
- HIPS: Poliestireno de Alto Impacto

5.2.2. Compressão axial

Quanto ao ensaio de compressão axial, todos os trabalhos relatados utilizaram esta análise para determinação da qualidade e desempenho do concreto, o que demonstra a importância deste ensaio na obtenção de um concreto estruturalmente bastante resistente. Os resultados advindos dos vários corpos-de-prova confeccionados nas pesquisas levantadas encontram-se abaixo, certificando que os corpos-de-prova de Filho (2013) alcançaram 28 dias de cura, uma vez que tal informação não é diretamente relatada em sua tabela, mas no corpo do texto em sua publicação.

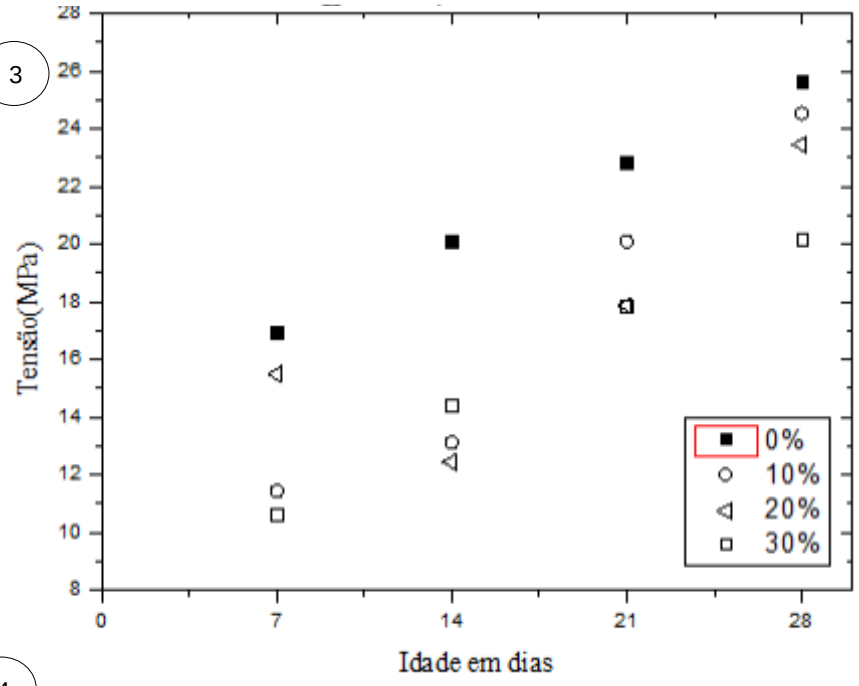
Figura 10 - Resultados do ensaio de compressão axial dos trabalhos levantados

Corpo de Prova	Força (kN)	Tensão (MPa)
1 Cp 1	64,15	32,67
Cp 2	68,86	35,07
Cp 3	68,17	34,72
Cp 4	66,08	33,65
Cp 5	64,09	32,64
Número CPs	5	5
Média	66,27	33,75
Mediana	66,08	33,65
Desv.Padrão	2,214	1,128
Coef.Var.(%)	3,341	3,342
Mínimo	64,09	32,64
Máximo	68,86	35,07

2

Porcentagem de resíduos incorporados	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	63 dias (MPa)
0%	32,9 ± 1,5	40,2 ± 2,1	43,0 ± 1,7
5%	29,18 ± 0,22	35,83 ± 0,74	38,99 ± 0,09
8%	30,26 ± 0,24	34,67 ± 0,36	36,92 ± 0,44
10%	29,86 ± 0,06	35,08 ± 0,26	36,1 ± 0,91
15%	24,7 ± 1,5	27,8 ± 2,1	30,0 ± 1,2
20%	22,6 ± 1,6	25,3 ± 1,3	26,02 ± 0,77

3



4

Content of LA	Age (days)	Average compressive strength (MPa)	SD (MPa)	CV (%)
M0	7	17.67	1.00	5.68
M0	28	13.68	2.38	17.39
M0	91	24.17	2.04	8.43
M25	7	15.98	1.33	8.32
M25	28	15.63	0.07	0.45
M25	91	17.17	1.47	8.57
M50	7	11.13	0.14	1.26
M50	28	13.61	0.21	1.52
M50	91	14.06	0.54	3.81

SD – Standard Deviation.
CV - Coefficient of variation.

5

Configuração do corpo de prova	Idade (d)	Diâmetro (mm)	Força máxima (kN)	Resistência à compressão (MPa)
Concreto Puro	28	100	33,53	4,27
Subst. 2% Areia	28	100	41,36	5,26
Subst. 5% Areia	28	100	27,63	3,51
Subst. 2% Brita	28	100	34,86	4,44
Subst. 5% Brita	28	100	30,8	3,92

Average compressive strength results (fcu) (MPa), coefficient of variance (CoV) (%) at 3, 7, 28, 90 days curing.

6

Concrete mix label	3 Day results			7 Day results			28 Day results			90 Day results		
	fcu	S.D	CoV	fcu	S.D	CoV	fcu	S.D	CoV	fcu	S.D	CoV
PC(Control mix)	37.5	0.8	2.2	46.4	0.4	0.9	57.6	1.0	1.7	60.1	1.8	3.0
PC(ABS-5)	35.2	2.4	6.9	42.6	1.4	3.2	49.6	0.4	0.8	53.3	1.2	2.2
PC(ABS-10)	31.5	0.9	2.8	37.8	0.6	1.7	44.2	1.1	2.6	49.2	1.7	3.4
PC(ABS-20)	28.8	0.5	1.9	34.0	0.6	1.7	38.1	0.8	2.1	42.1	0.5	1.1
PC(ABS-30)	19.1	0.3	1.6	22.1	1.4	6.3	25.1	1.4	5.7	27.0	1.6	6.1
PC(PC/ABS-5)	37.4	1.2	3.2	43.5	1.1	2.5	50.4	1.1	2.2	53.1	0.8	1.4
PC(PC/ABS-10)	36.3	0.4	1.1	40.7	0.6	1.6	46.5	0.5	1.1	46.6	0.3	0.6
PC(PC/ABS-20)	34.2	0.5	1.5	37.5	2.2	5.8	41.6	0.7	1.8	43.8	1.5	3.5
PC(PC/ABS-30)	33.2	2.2	6.6	36.4	1.5	4.2	40.5	1.6	3.8	40.9	1.0	2.5
PC(HIPS-5)	37.0	0.9	2.5	42.2	2.5	5.9	50.5	0.9	1.8	51.1	0.5	1.0
PC(HIPS-10)	34.0	0.2	0.5	39.5	0.4	0.9	46.1	0.1	0.2	46.7	1.4	3.1
PC(HIPS-20)	32.3	0.7	2.2	35.5	0.7	1.8	39.8	1.7	4.3	41.1	0.7	1.8
PC(HIPS-30)	34.0	0.7	2.0	38.5	1.9	4.9	39.5	0.8	2.1	40.7	1.9	4.7
PC(Blend-5)	37.1	0.1	0.3	42.9	0.6	1.5	49.4	1.0	1.9	53.3	1.4	2.6
PC(Blend-10)	34.9	0.9	2.5	41.4	0.4	1.0	46.5	0.6	1.4	49.9	1.2	2.4
PC(Blend-20)	31.3	0.3	0.9	36.8	0.7	1.9	42.0	0.9	2.1	42.5	0.4	1.0
PC(Blend-30)	31.6	0.5	1.6	34.9	1.6	4.5	37.5	1.2	3.1	37.5	1.9	5.1
PCM	41.2	0.6	1.4	59.3	0.4	0.8	70.2	1.3	1.9	73.5	0.6	0.8
PCM(ABS-5)	39.5	0.7	1.7	54.0	0.8	1.4	63.3	1.4	2.3	65.2	1.5	2.4
PCM(ABS-10)	33.0	1.7	5.2	46.4	1.6	3.5	52.4	1.0	2.0	54.8	1.5	2.8
PCM(ABS-20)	28.2	0.6	2.0	34.1	0.5	1.5	41.3	0.2	0.5	43.4	1.3	3.1
PCM(ABS-30)	26.8	0.3	1.0	23.0	0.8	3.3	38.8	0.8	2.2	40.9	3.0	7.4
PCM(PC/ABS-5)	40.2	0.8	2.0	50.8	1.6	3.1	60.0	1.4	2.4	62.1	0.7	1.2
PCM(PC/ABS-10)	41.7	0.7	1.8	52.1	1.6	3.0	61.0	1.7	2.7	61.8	3.3	5.4
PCM(PC/ABS-20)	37.5	0.7	2.0	46.7	1.2	2.5	53.1	0.5	1.0	54.6	0.5	1.0
PCM(PC/ABS-30)	36.3	1.1	3.1	44.5	0.7	1.6	49.1	1.3	2.6	50.9	2.0	3.9
PCM(HIPS-5)	41.0	0.1	0.2	56.4	1.1	1.9	62.6	1.4	2.3	57.2	0.4	0.8
PCM(HIPS-10)	35.2	0.7	2.0	49.1	0.9	1.8	56.0	0.4	0.7	56.4	2.3	4.1
PCM(HIPS-20)	35.2	1.6	4.5	47.6	1.4	2.9	52.7	0.5	1.0	53.3	2.1	4.0
PCM(HIPS-30)	38.7	0.8	2.0	45.8	1.4	3.0	49.0	1.3	2.7	50.8	1.3	2.5
PCM(Blend-5)	41.0	0.4	1.1	56.9	0.5	0.9	66.1	1.5	2.3	69.8	1.4	1.9
PCM(Blend-10)	42.1	0.3	0.7	54.5	3.1	5.6	61.7	1.0	1.6	63.6	1.8	2.8
PCM(Blend-20)	36.4	0.5	1.4	45.4	1.4	3.0	50.3	2.3	4.7	51.0	0.5	1.0
PCM(Blend-30)	34.2	1.4	4.2	43.7	2.0	4.6	47.5	1.9	4.1	47.4	1.0	2.2
PCS	36.7	1.9	5.2	47.6	0.2	0.5	59.5	0.6	1.0	63.7	2.3	3.5
PCS(ABS-5)	30.7	0.8	2.6	39.3	0.3	0.7	52.8	0.7	1.4	57.1	2.4	4.2
PCS(ABS-10)	28.4	0.4	1.5	37.2	0.5	1.3	48.1	0.2	0.5	51.4	0.3	0.6
PCS(ABS-20)	25.3	0.4	1.4	26.1	0.5	2.0	40.2	1.0	2.4	42.1	0.8	1.8
PCS(ABS-30)	17.3	0.4	2.2	23.0	0.8	3.3	32.0	1.2	3.8	33.0	0.7	2.1
PCS(PC/ABS-5)	31.9	0.6	1.9	40.0	0.8	2.0	54.8	1.2	2.1	55.8	2.1	3.8
PCS(PC/ABS-10)	34.2	0.6	1.8	43.9	0.0	0.0	55.5	0.9	1.6	56.4	1.2	2.1
PCS(PC/ABS-20)	31.2	0.8	2.6	39.7	0.8	2.0	46.6	2.3	5.0	48.3	1.9	4.0
PCS(PC/ABS-30)	27.3	1.0	3.7	37.1	0.3	0.9	40.0	0.5	1.3	42.1	5.4	12.9
PCS(HIPS-5)	34.3	0.3	0.9	42.8	0.8	1.9	52.8	1.9	3.5	56.5	0.3	0.5
PCS(HIPS-10)	32.7	1.0	3.0	43.6	0.2	0.6	52.5	3.4	6.5	54.7	0.3	0.5
PCS(HIPS-20)	29.5	0.6	2.2	37.1	0.8	2.2	46.4	0.6	1.2	46.4	1.0	2.1
PCS(HIPS-30)	28.6	0.7	2.6	38.5	1.1	2.8	41.7	0.9	2.1	43.0	0.7	1.7
PCS(Blend-5)	33.5	0.9	2.7	41.3	0.7	1.6	52.6	0.5	0.9	56.4	1.9	3.4
PCS(Blend-10)	33.4	0.3	0.8	40.3	0.2	0.5	49.9	0.3	0.5	53.1	0.8	1.5
PCS(Blend-20)	31.2	0.3	1.0	37.3	0.1	0.3	43.9	0.9	2.1	46.4	2.5	5.4
PCS(Blend-30)	27.7	0.3	1.0	32.7	0.4	1.1	38.6	2.0	5.1	40.3	0.9	2.3

Fontes: 1. Filho (2013); 2. Almeida (2017); 3. Conceição (2019); 4. Schneider *et al*. (2021); 5. Vogt (2017); 6. Nwuabani e Parsons (2021)

Pela análise das tabelas da Figura 10, pode-se notar que, à exceção da substituição de 2% de areia por resíduos eletrônicos no corpo de prova de Vogt (2017), todos os corpos-de-prova tiveram um desempenho resistivo à compressão pior do que os corpos-de-prova padrão fabricados nas publicações pesquisadas.

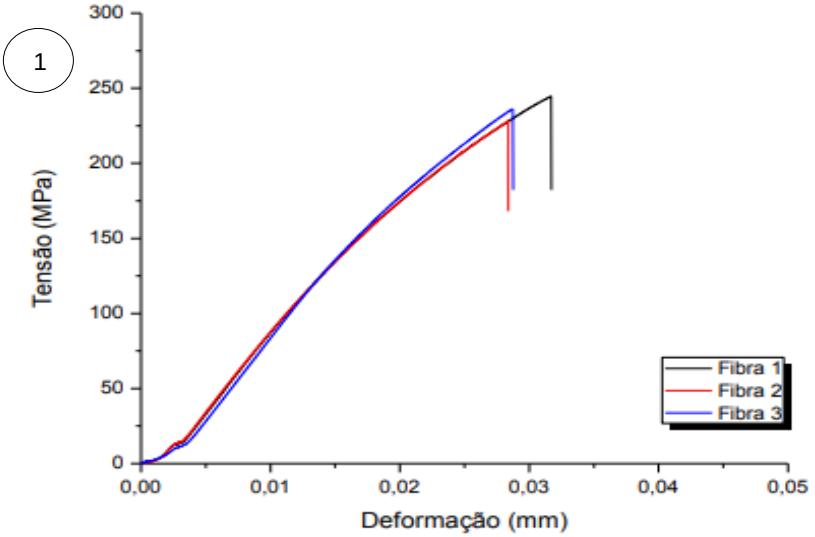
O corpo-de-prova de Vogt (2017) referido no parágrafo teve uma resistência à compressão 23,18% superior em comparação ao corpo-de-prova referência.

5.2.3. Resistência à tração

Filho (2013) empregou em seu ensaio de resistência à tração três fibras com 120 mm de comprimento advindo de resíduos eletroeletrônicos onde, como pode se observar no gráfico do estudo em questão, possuem comportamentos parecidos de fragilidade.

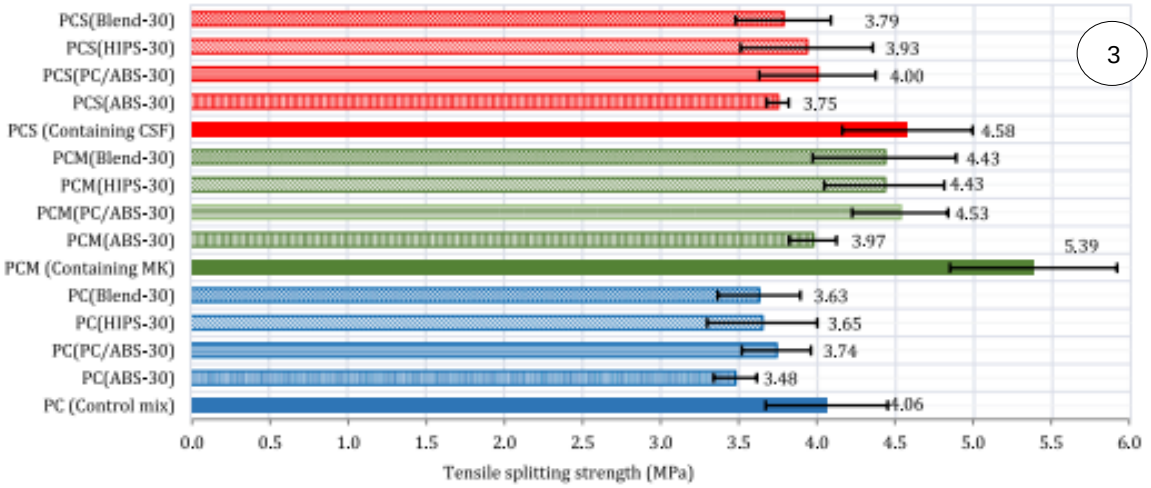
Figura 11 - Resultados dos ensaios de resistência à tração dos trabalhos levantados

1



2

Corpo de Prova	ftD (MPa)	
	7 Dias	28 dias
0 %	0,33 ± 0,04	0,846±0,009
5 %	0,29 ± 0,02	0,726±0,001
8 %	0,32± 0,02	0,759±0,003
10 %	0,25± 0,02	0,747±0,001
15 %	0,26±0,04	0,323±0,069
20 %	0,30±0,05	0,300±0,016



3

4

Corpo de prova prismático 10 x 10 x35 (cm)				Idade:	28 dias
Corpo de prova		Ruptura (kN)	Terço de Ruptura (mm)	Tensão (MPa)	Desvio padrão
0%	CP1	20,01	Meio	6,31	1,59
	CP2	12,62	Meio	4,06	
			Média	5,19	
Corpo de prova		Ruptura (kN)	Terço de Ruptura (mm)	Tensão (MPa)	Desvio padrão
10%	CP1	9,64	Meio	3,04	0,47
	CP2	7,20	Meio	2,37	
			Média	2,70	
Corpo de prova		Ruptura (kN)	Terço de Ruptura (mm)	Tensão (MPa)	Desvio padrão
20%	CP1	6,57	Meio	2,12	0,11
	CP2	6,90	Meio	2,27	
			Média	2,19	
Corpo de prova		Ruptura (kN)	Terço de Ruptura (mm)	Tensão (MPa)	Desvio padrão
30%	CP1	10,87	Meio	3,29	0,73
	CP2	13,70	Meio	4,32	
			Média	3,81	

Fonte: 1. Filho (2013); 2. Almeida (2017); 3. Nwaubani e Parsons (2021); 4. Conceição (2019)

Também é importante salientar que o gráfico obtido por Nwaubani e Parsons (2021) foi obtido com corpos-de-prova com idade de 28 dias de cura, uma vez que tal informação não está contida em seu gráfico.

De posse dos dados obtidos, Filho (2013) verificou que a fibra 1 suporta cerca de 250 MPa de tensão com, aproximadamente, 0,033mm de deformação e a média de tensão obtida dessas fibras foi de 225,09 MPa.

No caso de Almeida (2017), todos os ensaios ficaram abaixo do valor de referência, sendo os maiores para 8% de resíduos eletrônicos para 7 e 28 dias de cura. Já no estudo de Nwaubani e Parsons (2021) todas as misturas padrão, seja o

corpo-de-prova padrão, com apenas MK ou com apenas CSF (descritas pelas barras completamente preenchidas no gráfico) tiveram os maiores valores de resistência.

O mesmo fenômeno é observado por Conceição (2019), ou seja, a resistência do corpo-de-prova padrão é maior do que os que foram incorporados com resíduos eletroeletrônicos, sendo a incorporação de 30% destes resíduos a que resultou em uma melhor média e, portanto, em um melhor desempenho.

5.2.4. Absorção de água

Almeida (2017), além do teste de absorção de água, ainda estimulou outros testes semelhantes como índice de vazios, massa específica das amostras secas e saturadas obtidas em laboratório que se encontra logo abaixo em seu estudo correspondente.

Figura 12 - Resultados das análises de absorção de água dos corpos-de-prova

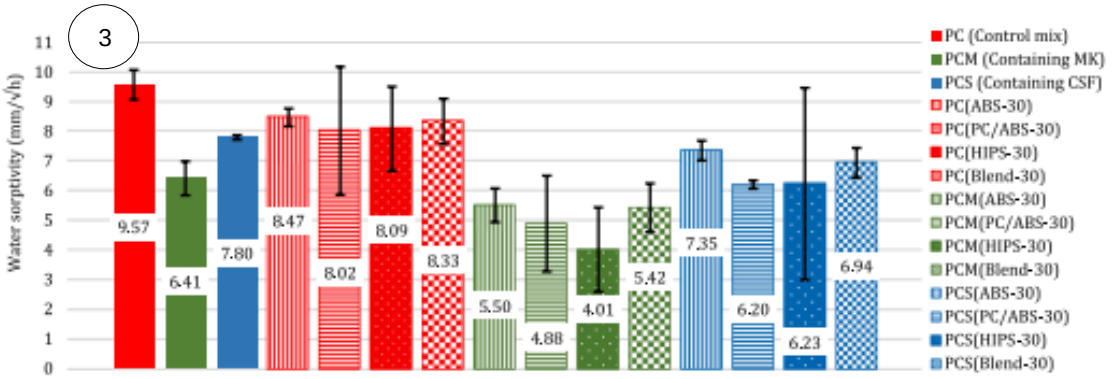
1

Compósito	Peso do corpo de prova (em gramas)				Absorção(%)		
	seco	24 horas	48 horas	72 horas	24 horas	48 horas	72 horas
1	529,120	555,420	556,140	556,210	4,735	4,858	4,870
2	528,950	554,750	555,080	555,210	4,651	4,707	4,730
3	527,360	553,960	554,950	555,060	4,802	4,972	4,990
Media	528,477	554,710	555,390	555,493	4,729	4,846	4,864

2

	Abs %		Iv %		Ms (g/cm³)		Msat (g/cm³)	
	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias
0%	13,9 ± 7,0	6,0 ± 3,0	22,6 ± 1,6	12,8 ± 0,9	1,6 ± 0,1	2,1 ± 0,2	1,8 ± 0,1	2,3 ± 0,2
05 %	8,9 ± 4,5	8,9 ± 4,4	17,5 ± 1,2	17,8 ± 1,2	1,9 ± 0,2	2,0 ± 0,2	2,1 ± 0,2	2,2 ± 0,2
08 %	6,8 ± 3,4	8,7 ± 4,4	17,9 ± 1,2	17,5 ±1,2	2,2 ± 0,2	2,0 ± 0,2	2,3 ± 0,2	2,2 ± 0,2
10 %	5,9 ± 3,0	5,8 ± 2,9	12,8 ± 0,9	11,8 ± 0,8	2,2 ± 0,2	2,0 ± 0,2	2,3 ± 0,2	2,1 ± 0,2
15 %	5,8 ± 3,0	5,9 ± 3,0	11,1 ± 0,8	11,7 ±0,8	1,9 ± 0,1	2,0 ± 0,2	2,0 ± 0,2	2,1 ± 0,2
20 %	6,2 ± 3,1	5,9 ± 3,0	11,8 ± 0,8	11,6 ± 0,8	1,9 ± 0,1	1,9 ± 0,2	2,0 ± 0,2	2,1 ± 0,1

3



4

Corpo de Prova	CP1			CP2			Absorção De água (%)
Comp.	Ms (Kg)	Msat (Kg)	Aag (%)	Ms (Kg)	Msat (Kg)	Aag (%)	(Média/Desv. Padrão)
0%	2,932	2,980	1,64	2,908	2,952	1,51	1,58±0,088
10%	3,050	3,136	2,82	3,040	3,126	2,83	2,82±0,007
20%	3,138	3,226	2,80	3,100	3,194	3,03	2,92±0,161
30%	3,066	3,160	3,07	3,088	3,212	4,02	3,54±0,672

Fontes: 1. Filho (2013); 2. Almeida (2017); 3. Nwaubani e Parsons (2021); 4. Conceição (2019)

Analisando as tabelas e gráficos, nota-se que a média observada para a taxa de absorção de água no trabalho de Filho (2013) em todos os períodos foi muito semelhante aos valores de referência. A saber: 4,62% para 24h; 4,63% para 48h e 4,66% para 72h. O motivo mais provável para o leve acréscimo na taxa de absorção é a porosidade do material que proporciona maior penetração de água.

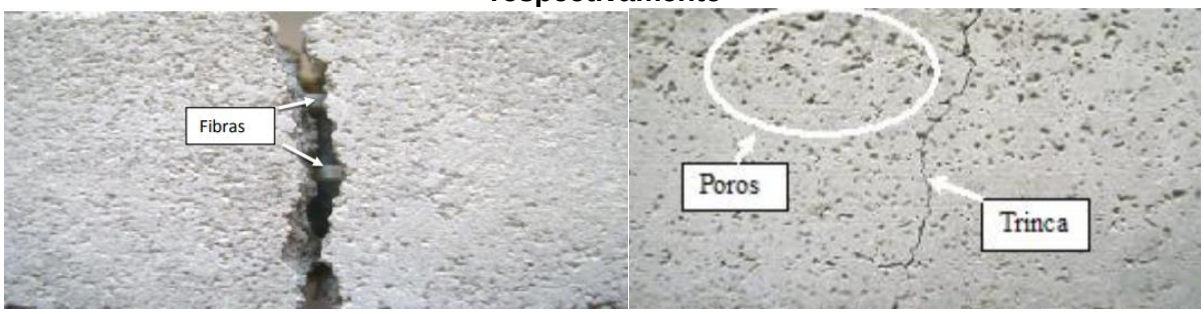
Com relação às publicações de Almeida (2017) e Nwaubani e Parsons (2021), nenhum dos corpos-de-prova que incorporam resíduos eletroeletrônicos obtiveram maior taxa de absorção de água, considerando a margem de erro, do que os valores de referência: respectivamente (13,9 ± 7,0)% e (9,57 ± 0,5)%, caracterizando comportamentos similares e de redução.

Em contrapartida, o trabalho de Conceição (2019) relata que em todos os casos em que foi incorporado algum gênero de lixo eletrônico em suas misturas houve aumento do índice de absorção de água, comparando-se ao corpo-de-prova padrão.

5.2.5. Análise ótica

As análises óticas verificam os aspectos e características dos corpos-de-prova após a ruptura dos mesmos, onde Filho (2013) relata a presença das fibras de 60 mm e seu deslizamento, bem como no caso das fibras de 120 mm de comprimento em que não houve a ocorrência de deslizamento como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Análise ótica dos corpos-de-prova com fibras de 60 e 120 mm, respectivamente



Fonte: Filho (2013)

Além do caso supracitado, Almeida (2017) e Vogt (2017) também observaram as características dos seus respectivos corpos-de-prova como averiguado na Figura 14.

Figura 14 - Análise ótica dos corpos-de-prova de Almeida e Vogt, respectivamente.



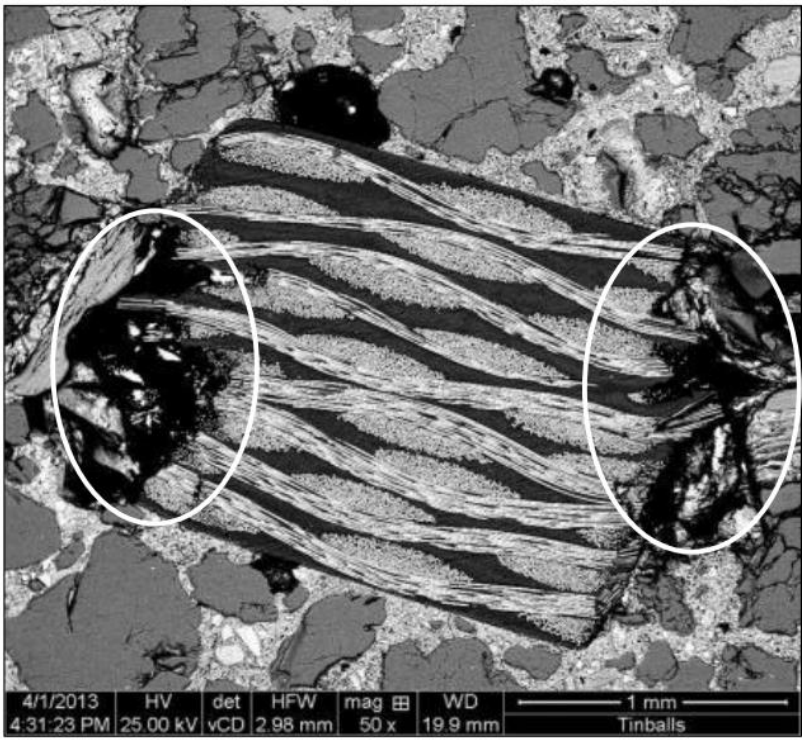
Fonte: Almeida (2017); Vogt (2017)

Dessa maneira, é possível diagnosticar o processo em que cada um dos corpos-de-prova passou, onde as fibras de 60mm presentes no trabalho de Filho (2013) não foram suficientes aguentar as solicitações presentes no ensaio de tração, diferentemente do caso das fibras de 120mm presentes no mesmo trabalho, onde apenas trincas e poros foram relatados, demonstrando um melhor desempenho mecânico.

5.2.6. Análise microscópica

Segundo Filho (2013), foi efetuada uma análise microscópica por um microscópio eletrônico de varredura (MEV) em que é possível observar o interior de um corpo-de-prova com fibras de 60 mm compostas de resíduos eletroeletrônicos rompido no ensaio de tração onde é notado o deslizamento das fibras nos pontos ilustrados.

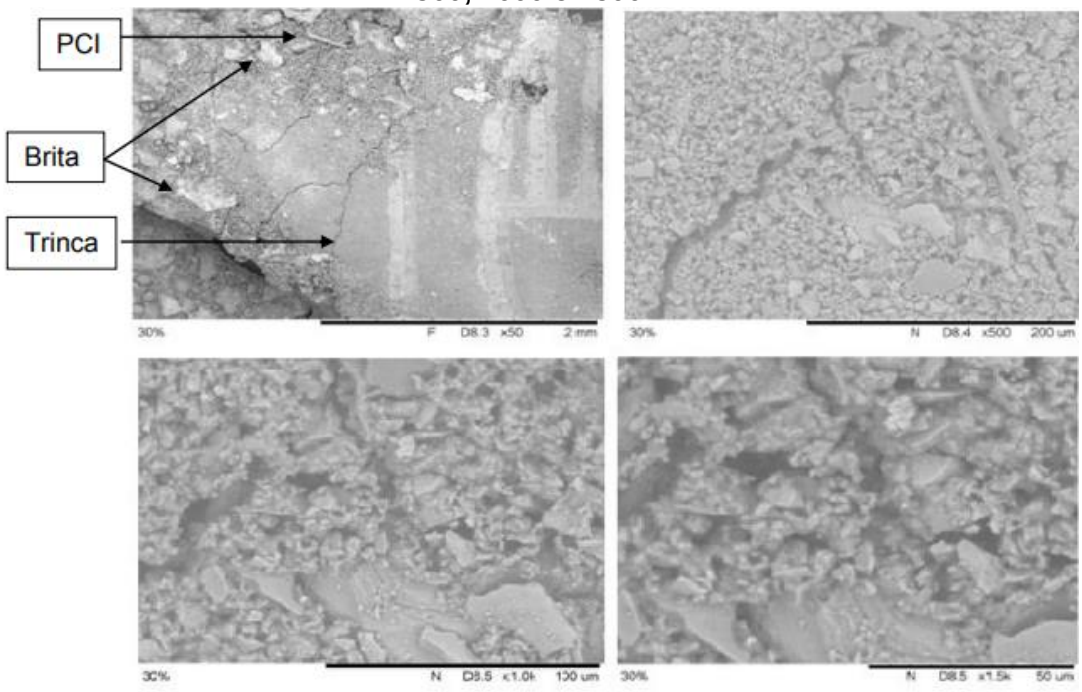
Figura 15 - Amostra de compósito cimentício. Aumento 50X



Fonte: Filho (2013)

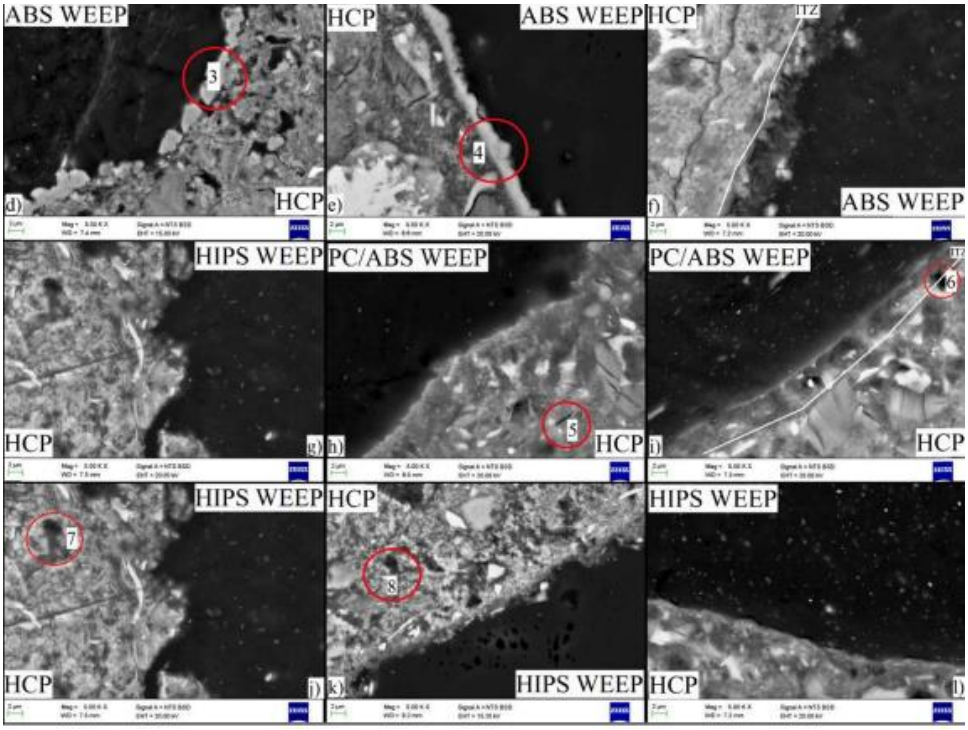
Por conseguinte, Nwaubani e Parsons (2021) e Conceição (2019) também utilizaram da mesma tecnologia, identificando as estruturas advindas dos materiais eletrônicos empregados durante a pesquisa.

Figura 16 - Amostra com 30% de Placas de Circuito Impresso com ampliações de 50, 500, 1000 e 1500X



Fonte: Conceição (2019)

Figura 17 - Ampliações de componentes eletroeletrônicos residuais em uma amostra de concreto



Fonte: Nwaubani e Parsons (2021)

As figuras microscopicamente aumentadas ilustram com precisão a presença dos compostos eletroeletrônicos em meio à mistura obtida para a fabricação do concreto, identificando as particularidades dos corpos-de-prova uma vez que foram

submetidos aos testes físico-mecânicos, como no caso de Filho (2013), onde é possível notar o arrancamento das fibras compostas por resíduos eletroeletrônicos causado pelo atrito entre as fibras no ensaio de tração.

5.2.7. Extrato lixiviado

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica-se como um resíduo tóxico quando uma amostra possuir contaminantes que superem os valores permitidos pelo anexo F da mesma, bem como se suas características apresentarem riscos significativos ao meio ambiente se manuseados de forma inadequada, o resíduo é classificado pela mesma norma em questão como resíduo perigoso.

De posse destas prerrogativas, Schneider *et al.* (2021) e Vogt (2017) aplicam uma análise de extrato lixiviado, utilizando como parâmetro o Anexo F presente na NBR 10004 (ABNT, 2004), sendo que os resultados surgem logo abaixo.

Figura 18 - Resultado da análise de extrato de lixiviado para classificação do resíduo (mg/L) para Vogt e Schneider *et al.*, respectivamente

Amostra	Ag	Al	As	Ba	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Pb	Se	Zn
PB	0,03	3,40	0,36	2,59	0,23	2,13	42,6	7,68	0,12	72,3	0,35	1,51
CP	0,416	0,91	2,63	1,30	0,25	0,36	0,23	55,9	0,16	1,07	3,32	0,04
2A	0,44	0,92	2,73	1,30	0,15	0,38	0,23	56,5	0,45	1,11	3,35	0,04
5A	0,44	0,97	2,77	1,33	0,16	0,67	0,25	57,8	1,32	1,13	3,44	0,34
2B	0,40	0,91	2,62	1,25	0,15	0,36	0,22	54,8	0,50	1,05	3,18	0,03
5B	0,38	0,97	2,71	1,16	0,15	1,12	0,20	56,6	0,82	1,03	3,35	0,84
ANEXO F	5,0		1,0	70,0	5,0			0,1		1,0	1,0	

Obs: Limites de concentração de Alumínio, Cobre, Ferro, Magnésio e Zinco não constam na normativa.

Sample	Cadmium (mg/L)	Plumb (mg/L)	Copper (mg/L)	Mercury (mg/L)
Matrix with 25% of LA	0.014	0.212	18.236	0.03
Matrix with 50% of LA	0.143	0.216	11.694	<D.L
maximum amount allowed by NBR 10004:2004	0.5	1.0	not specified	0.1
D.L.	0.001	0.032	0.004	0.007

<D.L = contents lower than the Detection Limit of the equipment.

Fontes: Vogt (2017); Schneider *et al*. (2021)

Com efeito, é percebido na tabela confeccionada por Vogt (2017) que os valores em vermelho ultrapassam os níveis de concentração determinados pelo anexo F da referida norma. Mesmo assim, é importante relatar que durante o processo de fabricação e preparo da mistura para se elaborar o concreto, tais valores são diluídos, caracterizando a boa utilização dos resíduos eletroeletrônicos para o determinado fim.

Quanto à tabela de Schneider *et al.* (2021), todos os valores estão referendados dentro do limite estabelecido.

5.2.8. Conclusões dos autores

Assim sendo, pode-se afirmar de antemão que os objetivos dos trabalhos de todos os autores relatados para a utilização de materiais eletroeletrônicos incorporados ao concreto foram alcançados e plenamente satisfatórios.

Vogt (2017) relatou perda de resistência à compressão com a substituição de 5% de qualquer dos agregados por resíduos eletrônicos, porém, um aumento na resistência com a substituição de 2%, o que está caracterizado pela tabela do referido autor localizado na Figura 10 deste trabalho.

Contudo, os demais autores observaram redução na resistência à compressão em comparação à referência utilizada por cada um deles, entretanto, chegando-se a valores resistivos superiores a 20 MPa, sendo a partir de 10% de resíduos eletrônicos segundo Conceição (2019), 20% segundo Almeida (2017) e 30% segundo Nwaubani e Parsons (2021), caracterizando um concreto de resistência média sem função estrutural, assim como também explicam Schneider *et al.* (2021).

Filho (2013) percebeu um comportamento mais frágil destes corpos-de-prova quando submetidos à tração. O mesmo apontamento foi efetuado por Almeida (2017), que ainda sugere que se utilize uma armação metálica para compensar a falta de resistência à tração. Em compensação, Conceição (2019) discorre que se obtiveram os melhores resultados em sua pesquisa ao se empregar uma mistura com 30% de placas de circuitos impressos comparando-se com os demais corpos-de-prova estudados que utilizaram tais placas, o que se observa na tabela correspondente à Figura 11 deste trabalho. O aumento na resistência pode ser explicado pelo fator água/cimento e uma mistura mais homogênea entre os materiais.

No tocante à absorção de água, Almeida (2017) e Nwaubani e Parsons (2021) definem que houve redução na utilização de água em comparação com a referência

gerando-se assim maior durabilidade do concreto. Entretanto, Conceição (2019) relata um resultado acima do esperado, muito provavelmente por conta das camadas internas das placas que foram cortadas expondo-as e gerando acúmulo de água, além de Filho (2013) que conta que a adição de fibras advindas de resíduos eletroeletrônicos pouco alterou a absorção de água em comparação com os corpos-de-prova padrões.

Schneider *et al.* (2021) estudaram mais profundamente a questão da lixiviação e do meio ambiente notando-se que as concentrações de chumbo, cobre e cádmio nos testes envolvendo agregados leves em até 50% não extrapolaram o máximo permitido pela NBR 10004 (ABNT, 2004), resultado semelhante ao obtido por Vogt (2017), onde as concentrações de arsênio, chumbo e manganês até ultrapassam os limites permitidos, porém são valores substancialmente diluídos durante o processo de preparo do concreto.

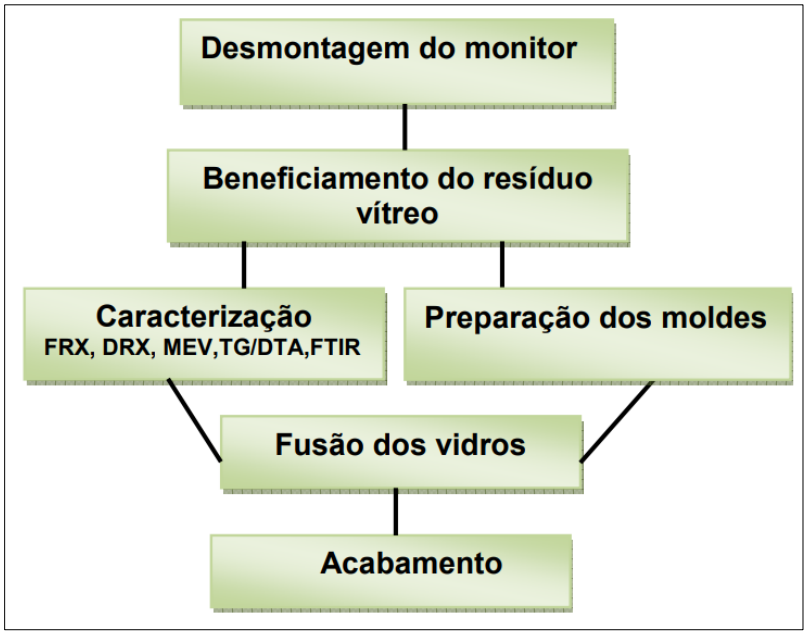
Dessa maneira, há certa unanimidade em se reportar que o concreto obtido com a mistura de materiais eletroeletrônicos é aproveitável, desde que sem função estrutural, podendo ser empregados, segundo Almeida (2017), em calçadas, guias de rua, ciclovias, parques, entre outros afins, além de que se trata de uma ação bastante eficaz para se destinar de maneira mais correta os rejeitos advindos de aparelhos eletroeletrônicos, contribuindo, inclusive, para criação de novos empregos relacionados à reciclagem.

5.3. Reutilização dos resíduos eletroeletrônicos na fabricação de artefatos vítreos

Segundo o levantamento bibliográfico definido na tabela 3, apenas a pesquisa de Lima (2012) faz relato sobre a utilização de materiais eletroeletrônicos reciclados para a fabricação de artefatos vítreos.

Assim sendo, Lima (2012) utilizou em sua metodologia resíduos vítreos retirados de telas e monitores de computadores e celulares, bem como o funil, quartzo, feldspato, utilizando-os na confecção dos moldes e o caulim, responsável por ser um agente desmoldante em um processo descrito pelo fluxograma apresentado na Figura 19, exemplificando desde a etapa de desmontagem do monitor de computador ou da tela de celular, finalizando com o acabamento dos artefatos vítreos obtidos.

Figura 19 - Fluxograma da metodologia da pesquisa para obtenção de artefatos vítreos



Fonte: Lima (2012)

Com efeito, na etapa de desmontagem do monitor, foi retirado o tubo de raios catódicos presente em seu interior conforme Figura 20.

Figura 20 - Retirada dos tubos de raios catódicos localizados nos monitores

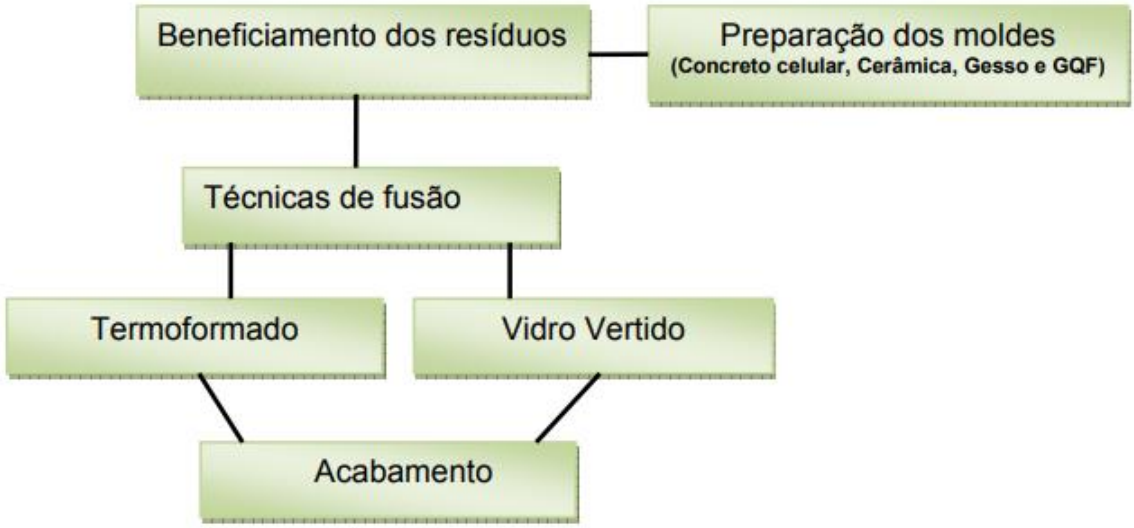


Fonte: Lima (2012)

Não obstante, os resíduos vítreos destes componentes foram retirados e separados em partes distintas, a saber: o vidro da tela e o funil, por apresentarem características de coloração, composição e espessuras diferentes entre si,

influenciando diretamente em seus possíveis produtos finais. Após isso, foram lavados para que as sujeiras encrustadas nestes resíduos fossem exterminadas e foram triturados com o auxílio de um almofariz com pistilo e peneirados e, seguidamente a esta etapa, foram estipulados os processos de reciclagem mostrada no fluxograma abaixo (LIMA, 2012).

Figura 21 - Fluxograma das etapas de reciclagem dos resíduos vítreos



Fonte: Lima (2012)

Deste modo, foram utilizados os fornos para a reciclagem do vidro que são apresentados na Figura 22 com uma temperatura de fusão entre 700 e 900 °C, analisando-se o comportamento do vidro nestas condições por um tempo de 120 minutos e uma abertura do forno de maneira parcial por cerca de 30 minutos, ocasionando propositadamente um choque térmico ao material, evitando-se desta forma a desvitrificação, sendo que o comportamento do material foi observado e descrito na Tabela 5 a seguir (LIMA, 2012).

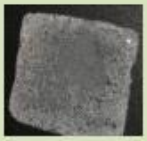
Figura 22 - Fornos utilizados nos processos



Fonte: Lima (2012)

Tabela 5 - Comportamento dos resíduos vítreos durante o processo de Termoformado e de Vidro Vertido, respectivamente, por 120 minutos

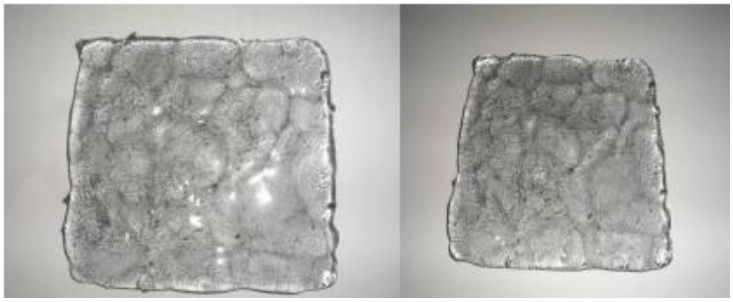
Temperatura (°C)	Observação visual
700	Não ocorreu a termoformação
750	Não ocorreu a termoformação
760	Processo se completa
770	Processo se completa
800	Deformação da amostra
850	Deformação da amostra
900	Deformação da amostra

Temperatura (°C)	Observação visual
700	Não ocorreu fusão
750	Inicio da fusão
800	Processo completo 
850	Cristalização 
900	Cristalização 

Fonte: Lima (2012)

Sequencialmente, Lima (2012) colocou em moldes de materiais descritos na Figura 21 e, após um tempo de espera e de um leve acabamento para a remoção de imperfeições, utilizando técnicas de polimento e lixamento, temos como resultado as pastilhas de vidro da imagem a seguir.

Figura 23 - Pastilhas de vidro sem e com acabamento após o processo de reciclagem



Fonte: Lima (2012)

Como resultado, foram estudados os óxidos presentes dos vidros obtidos por aparelhos eletroeletrônicos (Tabela 6), onde o óxido de silício (SiO_2) é o componente mais abundante em ambos os vidros pesquisados sendo, portanto, o óxido mais representativo para a formação da rede vítrea.

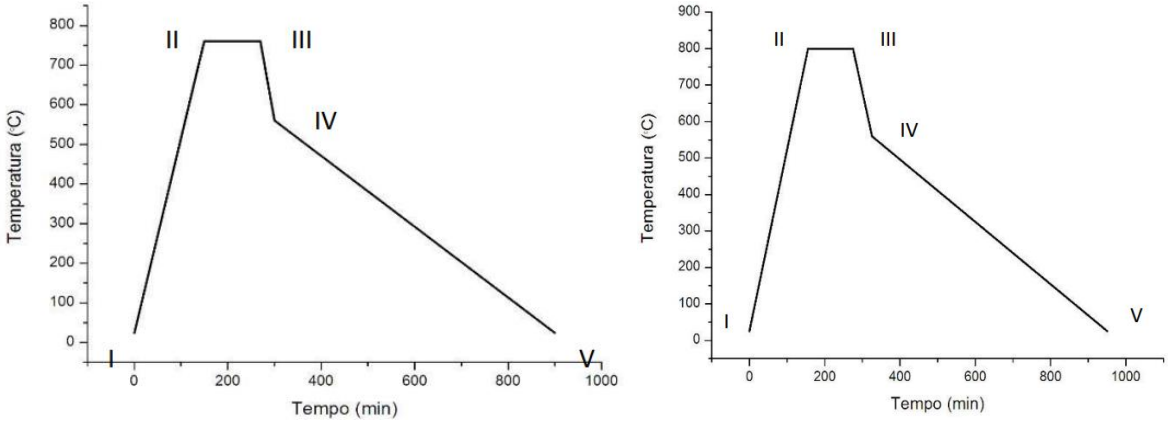
Tabela 6 - Composição química dos componentes estudados

ÓXIDOS	VIDRO TELA (%)	VIDRO FUNIL (%)
SiO_2	59,89	48,63
BaO	10,75	0,35
SrO	7,71	0,28
K_2O	6,92	7,96
Na_2O	6,64	5,15
Al_2O_3	3,20	2,65
ZrO_2	1,97	0,00
CaO	1,43	3,62
P_2O_5	1,28	0,00
Sb_2O_3	0,11	0,00
Fe_2O_3	0,06	0,00
Rb_2O	0,02	0,06
PbO	0,00	29,47
MgO	0,00	1,79
ZnO	0,00	0,02
CuO	0,00	0,02

Fonte: Lima (2012)

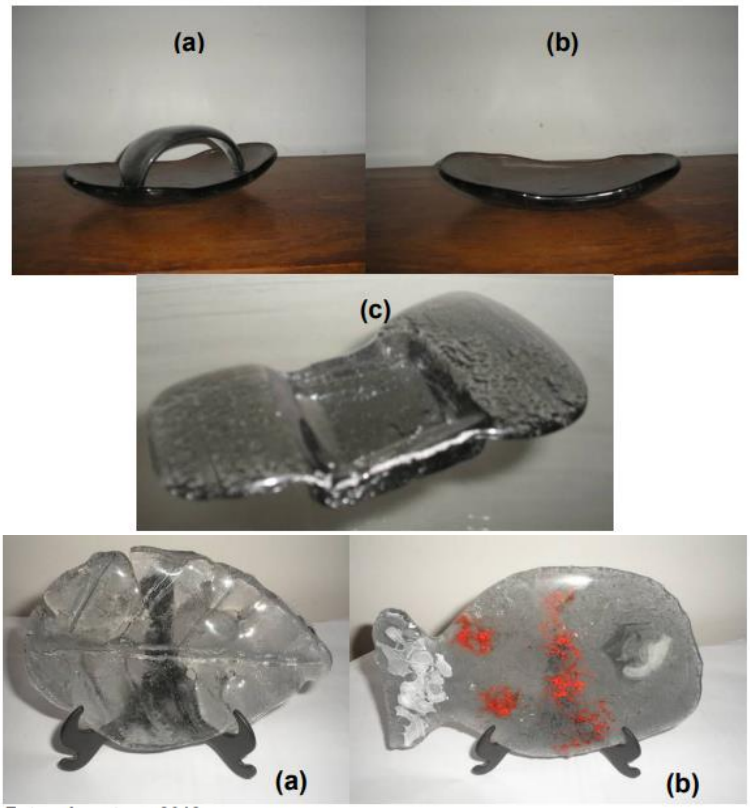
Ainda foi estudado o perfil térmico dos vidros obtidos pelo método Termoformado e de Vidro Vertido (Figura 24) e a obtenção de alguns artefatos vítreos fabricados com a utilização dos dois processos pesquisados com o auxílio dos moldes (Figura 25) (LIMA, 2012).

Figura 24 - Perfil térmico dos artefatos vítreos pelos dois métodos estudados



Fonte: Lima (2012)

Figura 25 - Artefatos vítreos obtidos pelos dois métodos pesquisados



Fonte: Lima (2012)

Conjecturando, segundo Lima (2012), esse tipo de reciclagem proporciona uma vasta gama de possibilidades para criação de inúmeros artefatos vítreos para utilização ampla na engenharia, arquitetura e paisagismo, inclusive. Produzindo resultados satisfatórios em termos, principalmente, estéticos.

5.4. Reutilização dos resíduos eletroeletrônicos na fabricação de material para rodovias

Segundo o levantamento bibliográfico definido na tabela 3 deste trabalho, as publicações que fazem relato sobre a utilização de resíduos eletroeletrônicos reciclados para a fabricação de materiais para rodovias foram: Ingole *et al*. (2020) e Hasan *et al.* (2016).

Assim sendo, no caso da pesquisa feita por Hasan *et al.* (2016) foram utilizados como resíduos eletroeletrônicos a Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Acrilonitrila Butadieno Estireno – Policarbonato (ABS – PC) e Poliestireno de Alto Impacto (HIPS), presentes na composição de computadores (Figura 26) que foram tratados com um misturador de alto teor cisalhante, utilizando para se combinar com um ligante asfáltico, de classificação PG58-28, pós de resíduos eletrônicos e, no caso da amostra tratada quimicamente (T), foi pulverizado hidroperóxido, diferentemente da amostra não-tratada quimicamente (UT) em que o agente químico não foi pulverizado, misturando-se, em seguida, por 45 minutos para se garantir uma mistura homogênea.

Figura 26 - Resíduos eletroeletrônicos utilizados no estudo de Hasan *et al*. (2016)



(a) Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

(b) Acrylonitrile Butadiene Styrene-Polycarbonate (ABS-PC)

(c) High Impact Polystyrene (HIPS)

Fonte: Hasan *et al.* (2016)

Com efeito, foram realizados testes das misturas obtidas, alguns deles utilizando o Reômetro HAAKE RheoStress 6000 (Figura 27) em comparação com uma amostra do próprio ligante asfáltico PG58-28 em seu estado puro com o intuito de avaliar o desempenho do novo ligante asfáltico quanto à sua resistência cisalhante e oscilatória, viscosidade e energia dissipada de trabalho.

Figura 27 - Reômetro HAAKE RheoStress 6000



Fonte: Hasan *et al.* (2016)

Deste modo, com estes estudos foram confeccionados gráficos comparativos de desempenho, bem como levantamento de tabelas, que auxiliou na conclusão de Hasan *et al.* (2016) de que os ligantes de asfaltos modificados para resíduos eletroeletrônicos onde houve a ocorrência de maior elasticidade em comparação com o ligante puro PG58-28, assim como maior viscosidade no uso de 5% de ABS e ABS-PC em comparação com as amostras do ligante puro e, inclusive, do ligante não tratado quimicamente. Também foi notado que o HIPS-T e HIPS-UT não tiveram grandes diferenças mecânicas entre si e que o emprego de componentes advindos de aparelhos eletroeletrônicos foi de grande valia para a melhora de desempenho do ligante asfáltico, carecendo ainda de mais pesquisas para uma maior certificação.

Por outro lado, Ingole *et al*. (2020) propiciaram em sua pesquisa uma mistura mais básica, triturando os materiais eletroeletrônicos até se transformarem em cinzas e juntando-se com cascalho, areia, cimento e água, bem como ilustra a Tabela 7 que também exemplifica suas propriedades físico-químicas e a Tabela 8 informando a proporção de cada um dos componentes da mistura. Também foi confeccionada uma mistura sem a presença das cinzas de lixo eletroeletrônico para comparações no momento de avaliação dos resultados obtidos.

Tabela 7 - Propriedades físico-químicas dos componentes da mistura

Materials	Physical property	Chemical property
Electronic waste ash	Powder particles containing fine particles, spherical in shape. Either solid or hollow and mostly glassy in nature.	Polyethylene, silicon, glassy compound, copper, aluminium components in combination with other non-metals.
sand	Porous rock consisting grains of sand or fine aggregate it has an available size of 160 um, 550 um and 1.15 um	Clay and silica which gives characteristic colours for cementitious substance
Gravel	Small pebbles of rock fragments has coarser than sand have an available size of 3/7", 3/5" and 1/3"	Crystalline silica
Cement	Greyish powder	Limestone or chalk clay which has characterized as paste component

Fonte: Ingole *et al*. (2020)

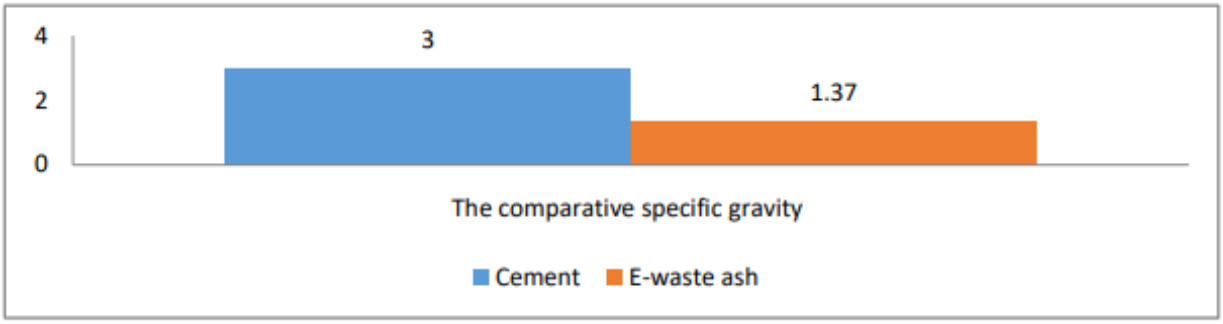
Tabela 8 - Proporção dos componentes na mistura

Raw Materials	Volume per cubic meter of concrete mixture	
	Plain cement concrete	Electronic waste ash and cement concrete
Cement	0.15 m^3	0.1 m^3
Sand	0.30 m^3	0.30 m^3
Gravel	0.55 m^3	0.55 m^3
E-waste ash	-	0.05 m^3
Total Volume	1.0 m^3	1.0 m^3

Fonte: Ingole *et al*. (2020)

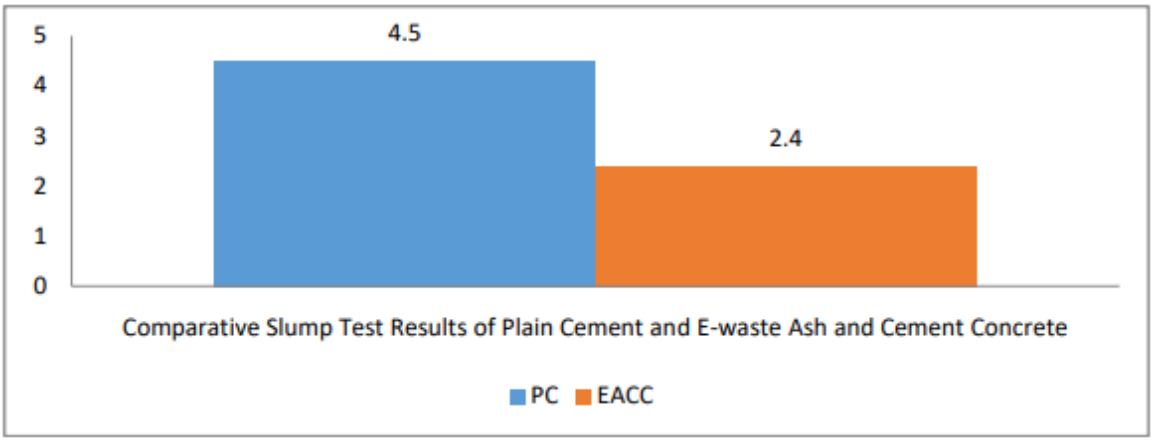
Não obstante, tais misturas foram despejadas em moldes retangulares por 7 e 14 dias, sendo, logo em seguida, estipulados testes de desempenho mecânico e de qualidade nestas misturas com e sem cinzas advindas de resíduos eletroeletrônicos, uma vez que, os resultados dos testes de gravidade específica, Teste de *slump*, e testes de compressão com amostras de 7 dias e de 14 dias obtidos são apresentados nos gráficos abaixo (INGOLE *et al*., 2020).

Figura 28 - Teste de gravidade específica



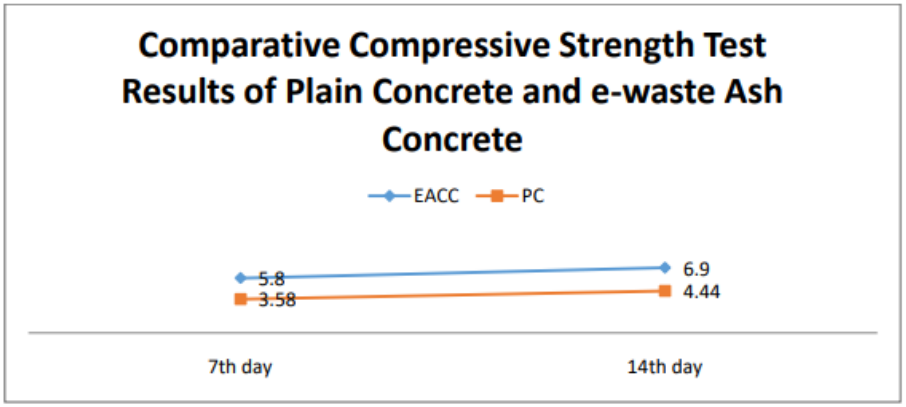
Fonte: Ingole *et al.* (2020)

Figura 29 - Teste de slump



Fonte: Ingole *et al.* (2020)

Figura 30 - Teste de força de compressão para 7 dias e 14 dias



Fonte: Ingole *et al.* (2020)

De posse destes resultados, Ingole *et al.* (2020) concluíram uma significativa eficácia na inclusão de resíduos eletroeletrônicos em materiais utilizados para pavimentação em ruas e estradas, contribuindo com relação à consistência do resultado obtido, posto que os resíduos eletroeletrônicos reduziram a quantidade de espera da cura, aumentando a consistência da mistura em comparação com a mesma mistura sem a adição do lixo eletroeletrônico ultraprocessado, houve favorecimento da

resistência à compressão e flexão, devido à aderência da cinza eletroeletrônica com a cal no concreto expandindo suas qualidades mecânicas, auxiliando, inclusive, em sua resiliência e tempo mais acelerado da cura do concreto, demonstrando satisfatoriamente a viabilidade deste material como aditivo na pavimentação de estradas.

6. Conclusão

O referido estudo fez uso do levantamento bibliográfico de teses e dissertações de mestrado com o intuito de averiguar métodos de reaproveitamento de resíduos eletroeletrônicos para a engenharia civil, mais precisamente a construção civil, no Brasil e no globo terrestre, visando à redução dos impactos ambientais que tanto assolam a humanidade e o ecossistema como um todo.

Não obstante, é de suma relevância a exequibilidade em termos de desempenhos mecânicos, estéticos e ambientais deste tipo de reaproveitamento, uma vez que se trata de materiais que, por muitas vezes são nocivos à natureza e à saúde humana.

Desta feita, foi observado que existem diversos estudos mundo afora preocupados em pesquisar a fundo sobre o tema, onde é relatada a real possibilidade de executar projetos que utilizem resíduos eletroeletrônicos em seus componentes construtivos, desde que, no caso do concreto, não haja uma função estrutural, já que a resistência deste tipo de material não é adequada a suportar altas cargas.

Ainda é viável o emprego deste tipo de reciclagem para criação e fabricação de artefatos vítreos para fins estéticos, podendo ser utilizada em vários ramos da engenharia civil, entre eles a arquitetura e o paisagismo.

Temos também a ocorrência do uso de cinzas advindas do ultraprocessamento de resíduos eletroeletrônicos para fabricação de materiais para rodovias com resultados satisfatórios quanto à resistência à compressão e flexão demonstrando favorecimento do tempo de cura e resiliência do material obtido.

Em termos ambientais, o levantamento bibliográfico comprovou que, principalmente no caso da fabricação do concreto, os metais pesados presentes nos rejeitos e tomados como nocivos, tóxicos e de alta periculosidade são diluídos durante o processo de obtenção do concreto, contribuindo sobremaneira para o ecossistema.

Portanto, o referido trabalho teve seus objetivos satisfatoriamente alcançados,

sabendo que vários estudos sobre o tema ainda necessitam ser aprofundados e que a logística envolvida para que haja este tipo de reciclagem de uma forma mais ampla é dispendiosa financeiramente e intelectualmente, porém entendendo que, cientificamente é possível amenizar a carga ambiental que a humanidade impõe.

Referências Bibliográficas

Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **Logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos**. Análise de viabilidade técnica e econômica. Brasília/DF. 2012.

Almeida, F. F. **Avaliação da utilização de resíduos eletroeletrônicos (REEE) incorporados ao concreto em substituição ao agregado graúdo.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Faculdade de Engenharia – Campus de Bauru. Bauru/SP. 2017.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Ciclo de vida dos equipamentos eletroeletrônicos.** Relatório Integrante do Convênio Porto Digital. Contrato no 7/2010, MCT no 01.0102.00/2008. Recife/PE, 2011.

_____. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** 2010.

Coelho, B. **Você sabe como fazer o estado da arte de sua pesquisa científica?** Mettzer. Disponível em: <https://blog.mettzer.com/estado-da-arte/>. Acesso em: 17 mar 2022.

Conceição, L. A. **Produção e caracterização de concreto com adição de resíduos de placas de circuitos impressos.** Dissertação (Mestrado). Centro Universitário de Volta Redonda: UniFOA. Volta Redonda/RJ. 2019.

Costa, C. B. S. **Percepção dos consumidores em relação aos impactos decorrentes do descarte de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa/MG. 2016.

Ferreira, N. S. A. **As pesquisas denominadas "Estado da Arte".** Revista Educação e Sociedade. n 79, p 258-272. Universidade de Campinas (UNICAMP). Campinas/ SP. 2002.

Filho, H. R. **Avaliação de compósitos cimentícios com adição de fibras curtas originadas de placas de circuito impresso.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto – Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT). Ouro Preto/MG. 2013.

Hasan, M. R. M.; Colbert, B.; You, Z.; Jashidi, A.; Heiden, P. A.; Hamzah, M. O. **A simple treatment of electronic-waste to produce asphalt binder additives with improved properties. Revista Construction and Building Materials.** Ed. Elsevier. Edimburgo, Reino Unido. P 79-88. 2016.

Ingole, A. R.; Gulhane, S. W.; Shirbhate, S. S.; Chavhan, M. P.; Makde, T. N. **Use of Electronic Waste Concrete for Road Construction.** International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), Blue Eyes Intelligence Engeneering and Sciences Publication (BEIESP). Vol. 9; p. 974-980. Índia. 2020.

Júnior, A. F. **Medalhas das Olímpiadas de Tóquio foram feitas com partes de celulares e computadores reciclados.** G1. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/tecnologia/noticia/2021/07/14/medalhas-das-olimpiadas-de-toquio-foram-feitas-com-partes-de-celulares-e-computadores-reciclados.ghtml>. Acesso em: 20 mar 2022.

Kasper A. C. **Caracterização e reciclagem de materiais presentes em sucatas de telefones celulares.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS. 2011.

Lima, N. M. O. **Desenvolvimento de artefatos vítreos obtidos pela reciclagem de lixo eletrônico – caracterização e processamento.** Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 126 f. 2012.

Moi P. C. P.; Souza, A. P. S.; Oliveira, M. M.; Faitta, A. C. J.; Rezende, W. B; Moi G. P.; Freire, F. A. L. **Lixo eletrônico: consequências e possíveis soluções.** Connection Line - Revista Eletrônica do UNIVAG. Centro Universitário de Várzea Grande (UNIVAG). n. 7; p 37-45. Várzea Grande/MT. 2012.

NBR 10004. **Resíduos sólidos – classificação.** Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Rio de Janeiro/RJ. 2004.

Nwaubani, S. O.; Parsons, L. A. **Properties, durability and microstructure of concrete incorporating waste electrical and electronic plastics as partial replacement for aggregates in concrete.** Case Studies in Construction Materials. Ed. Elsevier. Universidade de Witwatersrand, Johannesburgo, África do Sul. p: 1-22. 2021.

Oliveira, E. M.; Andrade, J. A. B.; Galvão, T. W. F. B.; Souza, P. D. S.; Penedo, L. S.; Galvão, T. W. F. B. **Cumprimento de políticas públicas ambientais e destinação de resíduos eletrônicos: uma análise dos fatores dificultadores.** Revista Teccen. n 14. p 7-13. Universidade de Vassouras. Vassouras/RJ. 2021.

Quintão, C. **PIB da construção civil cresceu 8% em 2021, diz Sinduscon-SP.** Valor Globo. Disponível em: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2022/01/13/pib-da-construcao-civil-cresceu-8percent-em-2021-diz-sinduscon-sp.ghtml>. Acesso em 17 mar 2022.

Schneider, E. L.; Veit, H. M.; Hartman, W. L.; Stolz, C. M.; Robinson, L. C.; Oliveira, C. T.; Vargas A. S. **Cement matrix containing lightweight aggregate based on Non-Metallic Fraction Printed Circuit Boards (NMFPCB'S).** Journal of Materials Research and Technology. Ed: Elsevier. n 14, p 2992-2997. Universidade de San Diego, California, Estados Unidos. 2021.

Schneider, A. F. **The Recycling of electronic waste: Regulations and corporate strategies in Brazil and in Europe.** Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo (USP). São Paulo/SP. 2016.

Vogt, W. A. **Reciclagem de resíduos sólidos eletrônicos como agregado na fabricação de concreto para a construção civil, visando a redução de impactos ambientais.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal da Fronteira Sul – Campus Erechim. Erechim/RS. 2017.

Xavier, L. H.; Lucena, L. C.; Costa, M. D.; Xavier, V. A.; Cardoso, R. S. **Gestão de resíduos eletroeletrônicos: mapeamento da logística reversa de computadores e componentes no Brasil.** 2º Seminário da Região Nordeste sobre Resíduos Sólidos. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Recife/PE. 2011.